



U.PORTO

Universidade do Minho

Universidade de Aveiro Departamento de Física
2014

**Luís Carlos de
Oliveira Carvalheiro**

Prevenção e Detecção de Incêndios

**Luis Carlos de
Oliveira Carvalheiro**

Prevenção e Detecção de Incêndios

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Física do Programa Doutoral em Física conjunto das Universidades do Minho, Aveiro e Porto - MAPFIS, realizada sob a orientação científica da Doutora Maria Dolores Josefa Manso Orgaz, Professora Associada do Departamento de Física da Universidade de Aveiro e do Doutor Yoshihiro Yamasaki, Professor Adjunto da Faculdade de Meteorologia da Universidade Federal de Pelotas.

Apoio financeiro da FCT e do FSE no âmbito do III Quadro Comunitário de Apoio, pela Bolsa de Doutoramento com a referência SFRH/BD/28602/2006

o júri

presidente

Doutor Manuel João Senos Matias
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Doutor Moisés Egido Manzano
Professor Catedrático da Universidade de Salamanca

Doutor José-Luís Casanova Roque
Professor Catedrático da Universidade de Valladolid

Doutora Ana Maria Rodrigues Monteiro Sousa
Professora Catedrática da Faculdade de Letras da Universidade do Porto

Doutor Mário Jorge Modesto Gonzalez Pereira
Professor Auxiliar da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Doutor Victor Manuel Martins Soares Prior
Meteorologista Superior do Instituto Português do Mar e da Atmosfera

Doutor Yoshihiro Yamasaki
Professor Adjunto da Faculdade de Meteorologia da Universidade Federal de Pelotas
(Coorientador)

Doutora Maria de los Dolores Josefa Manso Orgaz
Professora Associada da Universidade de Aveiro (Orientadora)

agradecimentos

Ao longo desta jornada, longa e, por vezes, tortuosa, tive a felicidade de nem sempre navegar só neste vasto oceano, que muitas (e tantas...) vezes se tornou maior do que a sua imensidão. Vários faróis iluminaram o meu caminho, a quem estas palavras de gratidão são, para além de devidas, sentidas. Assim, o meu muito obrigado à minha esposa Verónica, pelo alento, carinho, apoio incondicional e compreensão. Nos momentos de maior tempestade, foi ela a âncora que, apesar da(s) tormenta(s), manteve o meu bote frágil a salvo.

À minha filha Lara Sofia, nascida no decurso desta jornada, minha luminosa estrela polar, pela experiência maravilhosa que me proporciona, enquanto seu pai, a cada dia. Ao João Castanheira, por me ajudar a descobrir-me, dentro desta pequena casca de noz, ao encontro desta viagem. Aos meus pais, pela confiança que depositaram em mim, por todo o alento que forneceram, bem como por todo o auxílio. À Ana Cristina Carvalho pelas sempre muito úteis e pertinentes observações a respeito deste trabalho, bem como pela amizade.

À Professora Doutora Maria Paula Carvalho, por acreditar nas minhas capacidades, pelos incentivos e pelas grandes lições de vida. À Professora Doutora Anabela Novais, pelos incentivos. Aos amigos Nelson Gonçalves e Maria Figueiredo pelo companheirismo de ideais e percursos e pela amizade. Aos colegas do Laboratório de Atmosfera do Departamento de Física da Universidade de Aveiro, nomeadamente ao Juan Ferreira, ao Carlos Marques e à Susana Cardoso Pereira, entre outros, o meu obrigado pela paciência e tolerância que tiveram, enquanto ocupámos o mesmo espaço de trabalho.

A Peter Hollemans, da *Terrenus Earth Sciences*, pela disponibilização das *Coastwatch Utilities* e do *HRPT ingestor*, bem como pelo valioso auxílio prestado. Ao Tenente Coronel José Augusto Lopes Machado, Chefe da SOITRP/SEPNA, pela cedência de dados oriundos do SGIF. Por fim, um grande bem-haja sentido, a todos os outros que, ainda que não sejam aqui mencionados, sabem que o seu lugar na minha vida e no meu coração é perene.

palavras-chave

Fogos florestais, perigo de incêndio, FWI, meteorologia, WRF, satélite, detecção remota, NOAA, MSG.

resumo

Os fogos florestais, embora possam ser encarados como um fenómeno natural, constituem igualmente uma ameaça com impactos negativos a vários níveis. A alteração dos regimes naturais do fogo por acção antrópica tem vindo a maximizar o potencial catastrófico do fenómeno em diferentes regiões do planeta, destacando-se, em particular, a Região Mediterrânica, onde o fogo constitui uma perturbação recorrente associada, por um lado, às características climáticas desta região e, por outro, às práticas tradicionais decorrentes da presença humana nessa área, numa extensão temporal de milhares de anos. Em Portugal, o problema dos fogos florestais assume uma expressividade de particular relevo, colocando-o entre os países do sul da Europa mais atingidos pelo fogo a cada Verão. Reconhecendo o papel das condições meteorológicas nas interações envolvidas no processo de deflagração e propagação de incêndios, a identificação de condições meteorológicas propícias à ocorrência de incêndios, expressa sob a forma de índices de risco reveste-se de crucial importância para as operações de prevenção e combate aos incêndios, para além da mais-valia que constituem para os restantes sectores da sociedade.

Adicionalmente, a detecção e monitorização de ocorrências de incêndios a partir de satélites tem vindo a assumir um papel preponderante, revelando-se fundamental enquanto fonte de alerta e pelas potencialidades que as bases de dados resultantes da observação contínua da Terra pelos satélites oferecem, no que às mais diversas áreas de investigação diz respeito. O presente trabalho explora, nas vertentes da prevenção de incêndios, a utilização de previsões de tempo de alta resolução espacial obtidas com o modelo WRF para a determinação das componentes do sistema FWI canadiano e sua disponibilização operacional. Os resultados apontam para um impacto positivo, em virtude do incremento da resolução espacial, da representação espacial do risco meteorológico de incêndio no território português. Paralelamente, apresentam-se os resultados do desenvolvimento de produtos de detecção de incêndios activos a partir da infra-estrutura de recepção de dados de satélite implementadas na Universidade de Aveiro, destacando a sua adequabilidade para a monitorização e identificação, em tempo quase-real, da ocorrência de fogos florestais em Portugal Continental.

keywords

Forest fires, fire danger, FWI, meteorology, WRF, satellite, remote sensing, NOAA, MSG.

abstract

Albeit forest fires can be recognized as a natural phenomenon, they also constitute a threat with major negative impacts in several levels. The changes on natural fire regimes by anthropic action has been maximizing the catastrophic potential of this phenomenon in several regions of the planet, with particular emphasis on the Mediterranean Region, where fire constitutes a recurrent disturbance, associated both to the climatic characteristics of the region, and, conversely, to the traditional practices deriving from the temporal extension of the human presence in the area for thousands of years. In Portugal, the problem of forest fires assumes a particular importance, as this is one of the southern European countries most affected by fire each summer. Acknowledging the role of meteorological conditions on the interactions associated with the onset and spreading of fires, the identification of meteorological conditions favourable to the occurrence of forest fires, expressed by means of fire weather indexes, it is of utmost importance for the prevention and fire-fighting operations, besides the added-value they bring to many other sectors of society. Moreover, the detection and monitoring of forest fires occurrences by means of satellite-collected data has been playing an important role as an alert source, as well as constituting/contributing to invaluable databases for the most diverse research areas. This study explores, as far as forest fires prevention is concerned, the usage of high-resolution weather forecasts with the WRF model for determining the Canadian FWI system components, bearing in mind its operational delivery. The results show a positive impact, due to its higher resolution, on the representation of fire weather danger throughout the Portuguese territory. Additionally, the results from the development of fire detection products relying on the data collected by the University of Aveiro satellite receiving infrastructures are presented, showing its adequacy to monitoring and identifying, in near real-time, forest fire occurrences in mainland Portugal.

Índice

	Página
Índice	i
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	xvii
Lista de Acrónimos	xix
1 Introdução	1
1.1 Considerações Gerais sobre o Tema	1
1.2 Objectivos Gerais do Trabalho	5
1.3 Justificação do Trabalho	6
1.4 Etapas do trabalho de investigação	6
1.5 Organização da Tese	8
2 Da problemática dos Incêndios florestais	11
2.1 Física e Química dos Incêndios Florestais	11
2.2 Breve caracterização do clima em Portugal	14
2.3 A Floresta em Portugal	22
2.4 Incêndios florestais em Portugal	26
2.5 Origem e causas dos incêndios em Portugal	31
2.6 Enquadramento legal	32
2.7 Meteorologia e Incêndios Florestais	35
2.7.1 O efeito da precipitação	36
2.7.2 O efeito da humidade relativa	36
2.7.3 O efeito da temperatura do ar	37
2.7.4 O efeito do vento	38
2.8 Índices de Risco e Perigo de Incêndio	38
2.9 O sistema <i>Fire Weather Index</i> (FWI) Canadiano	39

3	Modelos de Previsão Numérica de Tempo	51
3.1	Introdução	51
3.2	Um breve apontamento histórico	52
3.3	Formulação geral do problema de previsão numérica do tempo: as equações primitivas	55
3.4	O modelo <i>Weather Research and Forecast</i> (WRF)	65
3.4.1	O sistema de pré-processamento WPS	67
3.4.2	O núcleo dinâmico ARW	68
4	Detecção Remota e Incêndios Florestais	75
4.1	Conceitos fundamentais	75
4.2	Base Física da detecção remota de incêndios florestais	80
4.3	Descrição geral dos algoritmos de detecção de incêndio	84
4.3.1	Algoritmos de <i>threshold</i> mono-canal	84
4.3.2	Algoritmos de <i>threshold</i> multi-canal	85
4.3.3	Algoritmos contextuais	85
4.4	Evolução do processo de detecção de focos de incêndio por satélite	87
5	Detecção de Incêndios com base no produto FIR, da EUMETSAT	91
5.1	A Estação de Recepção <i>EUMETCast</i> da Universidade de Aveiro	91
5.2	O radiómetro SEVIRI	93
5.3	O produto FIR da EUMETSAT	94
5.4	A aplicação de visualização de focos de incêndio desenvolvida	97
5.5	Sistemática da ferramenta de visualização de focos de incêndio	98
5.6	Validação dos dados FIR sobre Portugal Continental	100
6	Detecção de Incêndios com dados AVHRR	109
6.1	Os satélites de órbita polar da NOAA	109
6.2	O radiómetro AVHRR	110
6.3	A Estação de Recepção HRPT da Universidade de Aveiro	112
6.3.1	<i>Hardware</i>	114
6.3.2	<i>Software de aquisição de sinal</i>	116
6.3.3	<i>Software</i> de processamento de sinal	116
6.4	Processamento de imagens AVHRR com vista à detecção de incêndios	118
6.4.1	Máscara de nuvens	118
6.4.2	Algoritmo de detecção de focos de incêndio	120
6.5	Implementação do algoritmo	123
6.6	Resultados obtidos com o modelo de detecção proposto	124

6.7	Validação dos resultados obtidos	125
7	Implementação do sistema FWI canadiano com base em previsões WRF de alta resolução	141
7.1	Dados Meteorológicos	141
7.1.1	<i>Internet Data Distribution/Local Data Manager</i>	142
7.2	Configuração do Modelo WRF	143
7.2.1	Configuração dos domínios	145
7.2.2	Parametrização Física	149
7.2.3	Inicialização operacional e articulação com o modelo FWI	150
7.3	Sistema computacional de modelação numérica	152
7.4	Resultados obtidos e sua discussão	153
7.4.1	Metodologia de validação das previsões WRF e respectivas medidas de erro	159
7.4.1.1	Validação das previsões obtidas para 2009	162
7.4.1.2	Validação das previsões obtidas para 2010	174
7.4.2	Análise das componentes do sistema FWI canadiano para as épocas de incêndio de 2009 e de 2010	184
7.4.2.1	Análise à escala nacional	184
7.4.2.1.1	Caso da época de incêndios de 2009	184
7.4.2.1.2	Caso da época de incêndios de 2010	192
7.4.2.2	Análise à escala distrital	198
7.4.2.2.1	Caso da época de incêndios de 2009	198
7.4.2.2.2	Caso da época de incêndios de 2010	202
8	Conclusões	207
8.1	Considerações conclusivas sobre o trabalho efectuado	207
8.2	Limitações inerentes ao estudo	211
8.3	Perspectivas para trabalhos futuros	212
	Referências Bibliográficas	213
	Apêndice A Código-fonte do modelo FWI para observações pontuais	227
	Apêndice B Código-fonte do modelo FWI estendido para uma matriz de dados	232
	Apêndice C Código-fonte da máscara de nuvens utilizada	241

Apêndice D Código-fonte do modelo de detecção de incêndios baseado em dados AVHRR	243
Apêndice E Comparação entre dados observados e dados simulados, para 2009	248
Apêndice F Comparação entre dados observados e dados simulados, para 2010	283

Lista de Figuras

1.1	Esquematisação das tarefas inerentes ao trabalho de investigação.	7
2.1	Representação parcial da estrutura da celulose. Crédito do modelo Jmol: http://www.lsbu.ac.uk/water/hycel.html	13
2.2	Mapa de Portugal. Créditos da imagem: Pendergast e Pendergast (2002).	14
2.3	Mapa de elevação do terreno em Portugal Continental, obtido através de um modelo digital de terreno à resolução de 30 m. Fonte dos dados: ASTER GDEM.	15
2.4	Distribuição espacial das Estações Meteorológicas do IPMA cujos dados, no período de 2000 a 2010, foram utilizados para a caracterização do clima em Portugal Continental.	17
2.5	Média das temperaturas do ar (°C): média anual, mínima no Inverno e máxima no Verão. Dados de observações no período 2000-2010.	17
2.6	Número médio de dias com temperatura máxima superior a 35 °C. Dados de observações no período 2000-2010.	19
2.7	Média da precipitação anual acumulada (mm). Dados de observações no período 2000-2010.	20
2.8	Média da precipitação sazonal acumulada (mm): média de Inverno, média da Primavera, média de Verão e média de Outono. Dados de observações no período 2000-2010.	21
2.9	Intensidade média e máxima do vento (m/s), no Verão. Dados de observações no período 2000-2010.	22
2.10	Mapa de caracterização do uso e ocupação do solo em 2006 para Portugal Continental, segundo o projecto Corine Land Cover. Fonte dos dados: Instituto Geográfico Português.	23
2.11	Distribuição distrital das espécies de árvores existentes nas florestas portuguesas. Fonte dos dados: <i>software</i> Areastat, do ICNF.	25

2.12	Evolução temporal do número de ocorrências de fogos florestais e da respectiva área ardida em Portugal, entre 1980 e 2010. Fonte dos dados: AFN2011/SGIF.	26
2.13	Evolução temporal do número de ocorrências de incêndios em Portugal, entre 2001 e 2010. Fonte dos dados: AFN2011/SGIF.	28
2.14	Percentagem de área total ardida por distrito, comparativamente com a área total de cada distrito, entre 2001 e 2010. Fontes de dados: AFN2011/SGIF e IGEO.	29
2.15	Diagrama esquemático dos diversos componentes do sistema FWI. Adaptado de van Wagner (1987).	42
3.1	Fluxo de massa ao longo direcção x , numa unidade infinitesimal de volume.	56
3.2	Parcela de ar sujeita a um gradiente de pressão na direcção x	58
3.3	Componentes da aceleração de Coriolis.	60
3.4	Friso cronológico do desenvolvimento do modelo WRF.	66
3.5	Esquematização da infraestrutura do sistema WRF. Créditos: Mesoscale & Microscale Meteorology Division (2010).	67
3.6	Esquematização da infraestrutura do sistema WRF baseado no núcleo ARW. Créditos: Mesoscale & Microscale Meteorology Division (2010).	68
3.7	Componentes do sistema de pré-processamento WPS.	69
3.8	A coordenada vertical η , utilizada no WRF. Créditos: Skamarock et al. (2008). 69	
3.9	Grelhas computacionais horizontal e vertical utilizadas no WRF. Créditos: Skamarock et al. (2008).	71
4.1	Espectro electromagnético. Crédito da imagem: Ibarra-Castanedo (2005, p. 128).	77
4.2	Absorção da radiação pelos principais gases presentes na atmosfera. Crédito da imagem: Ahrens (2011, p. 36).	78
4.3	Curvas de resposta espectral para diferentes alvos sobre a superfície terrestre. Fonte dos dados: ASTER Spectral Library Version 2.0 (Baldrige et al., 2009). 80	
4.4	Grandezas geométricas inerentes à definição das grandezas fundamentais utilizadas em Detecção Remota. Adaptado de Matsapey et al. (2013). . .	82
4.5	Traçado gráfico da exitância espectral de corpos negros a diferentes temperaturas e da linha que une os picos de máximos de intensidade de radiação emitida.	83
5.1	Cobertura global do sistema GEONETCast. Créditos da imagem: Foerster et al. (2013).	92
5.2	Esquematização geral da estação de recepção MSG da Universidade de Aveiro.	93

5.3	Ilustração do campo de visão dos satélites Meteosat Second Generation. . .	94
5.4	Estrutura e conteúdos típicos dos ficheiros resultantes do processamento do produto FIR (adaptado).	97
5.5	Diagrama de fluxo da cadeia de processamento.	99
5.6	Visualização de dados com o FOMA, na página web criada.	99
5.7	Exemplo da visualização, por intermédio do FOMA, da detecção de uma ocorrência de incêndio, confirmada no terreno pelos dados do relatório de incêndios para a época de 2008, a 5 de Agosto de 2008.	100
5.8	Exemplo de utilização da aplicação FOMA em modo retrospectivo e offline, para visualização de ocorrências de incêndio nas regiões da Europa e parte do Norte de África, nas duas últimas semanas de Agosto de 2008.	101
5.9	Comparação das detecções de incêndio via FIR e MOD14 para o dia 26 de Julho de 2010.	102
5.10	Exemplo ilustrativo das premissas efectuadas para a validação das detecções FIR contra as detecções MODIS.	105
5.11	Exemplo ilustrativo das premissas efectuadas para a validação das detecções FIR comparativamente com as detecções MODIS.	106
6.1	O radiómetro AVHRR	111
6.2	Visão esquemática geral do <i>hardware</i> que compõe a estação de recepção HRPT da Universidade de Aveiro (Dartcom, 2003).	113
6.3	A antena de recepção da estação HRPT da UA.	114
6.4	Visão da <i>rack</i> de recepção da Estação HRPT da UA.	115
6.5	Exemplo de possível renderização dos produtos obtidos mediante o uso do <i>software CoastWatch utilities</i> : composição colorida RGB(1,2,4) de dados AVHRR reprojectados sobre um mapa de projecção Mercator, com informação adicional sobre os dados de origem.	117
6.6	Esquematização dos testes efectuados para a obtenção da máscara de nuvens.	119
6.7	Resultado comparativo da <i>performance</i> da máscara de nuvens aplicada.	120
6.8	Esquematização dos testes efectuados para a detecção da presença de fogo num pixel de uma imagem AVHRR.	121
6.9	Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 25 de Julho de 2010.	127
6.10	Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 26 de Julho de 2010.	128
6.11	Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 27 de Julho de 2010.	129

6.12	Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 28 de Julho de 2010.	130
6.13	Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 29 de Julho de 2010.	131
6.14	Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 4 de Agosto de 2010.	132
6.15	Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 5 de Agosto de 2010.	133
6.16	Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 6 de Agosto de 2010.	134
6.17	Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 7 de Agosto de 2010.	135
6.18	Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 13 de Agosto de 2010.	136
6.19	Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 14 de Agosto de 2010.	137
6.20	Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 27 de Agosto de 2010.	138
6.21	Exemplo ilustrativo da metodologia utilizada para a validação das detecções de incêndio com o algoritmo proposto, comparativamente às detecções de incêndio MODIS.	140
7.1	Topologia do IDD, a 28 de Junho de 2010.	142
7.2	Latências na recepção dos dados do <i>feed</i> CONDUIT.	144
7.3	Volume diário de dados recepcionados, de 26 a 28 de Junho de 2010. . . .	144
7.4	Representação gráfica dos domínios de simulação do modelo WRF.	146
7.5	Representação da separação Terra/Água nos domínios de simulação do WRF. . . .	147
7.6	Representação da topografia nos domínios de simulação do WRF.	148
7.7	Representação gráfica dos domínios de simulação do modelo WRF.	149
7.8	Esquematização dos procedimentos inerentes ao acoplamento <i>ad hoc</i> do modelo FWI canadiano com os resultados das previsões WRF, a 24 horas. . .	151
7.9	Esquematização dos procedimentos inerentes ao acoplamento <i>ad hoc</i> do modelo FWI canadiano com os resultados das previsões WRF, a 48 horas. . .	152
7.10	Exemplo da visualização dos resultados do modelo FWI segundo as previsões WRF.	153
7.11	Representação espacial do índice FWI sobre Portugal Continental, para 4 de Agosto de 2003.	154

7.12	Resultado do produto de detecção de focos de incêndio activos segundo o radiómetro MODIS, para 4 de Agosto de 2003.	155
7.13	Séries temporais do índice FWI à escala nacional, mediante previsões WRF a 24 e 48 horas, para as épocas de incêndios de 2009 e 2010.	156
7.14	Comparação entre a distribuição espacial do índice FWI obtido mediante simulações WRF, a distribuição espacial de FWI e RCM do IPMA e detecções de incêndios MODIS, para 26 de Julho de 2010.	157
7.15	Comparação entre a distribuição espacial do índice FWI obtido mediante simulações WRF, a distribuição espacial de FWI e RCM do IPMA e detecções de incêndios MODIS, para 27 de Julho de 2010.	158
7.16	Comparação entre os mapas de SSR para as épocas de incêndio de 2009 e 2010, obtidos a partir de previsões WRF a 24 horas e os mesmos dados, segundo o relatório da época de incêndios de 2010, do Instituto Português do Mar e da Atmosfera.	160
7.17	Áreas ardidadas para os anos de 2009 e 2010, segundo dados oficiais do ICNF.	161
7.18	Distribuição espacial das estações meteorológicas automáticas utilizadas para validação.	163
7.19	Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões de temperatura para as 24 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2009.	166
7.20	Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões da intensidade do vento para as 24 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2009.	167
7.21	Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões de humidade relativa para as 24 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2009.	168
7.22	Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões, para as 24 horas seguintes, de precipitação acumulada em 24 horas, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2009.	169
7.23	Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões de temperatura para as 48 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2009.	170
7.24	Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões da intensidade do vento para as 48 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2009.	171

7.25	Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões de humidade relativa para as 48 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2009.	172
7.26	Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões, para as 48 horas seguintes, de precipitação acumulada em 24 horas, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2009.	173
7.27	Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões de temperatura para as 24 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2010.	176
7.28	Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões da intensidade do vento para as 24 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2010.	177
7.29	Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões de humidade relativa para as 24 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2010.	178
7.30	Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões, para as 24 horas seguintes, de precipitação acumulada em 24 horas, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2010.	179
7.31	Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões de temperatura para as 48 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2010.	180
7.32	Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões da intensidade do vento para as 48 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2010.	181
7.33	Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões de humidade relativa para as 48 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2010.	182
7.34	Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões, para as 48 horas seguintes, de precipitação acumulada em 24 horas, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2010.	183
7.35	Média mensal, à escala nacional, do índice DSR, obtido mediante previsões do WRF a 24 e 48 horas, e respectiva área ardida mensal, para a época de incêndios de 2009.	185
7.36	Média mensal, à escala nacional, do índice FWI, obtido mediante previsões do WRF a 24 e 48 horas, e respectiva área ardida mensal, para o ano de 2009.	186

7.37 Média mensal, à escala nacional, do índice FWI, obtido mediante previsões do WRF a 24 e 48 horas e respectivo número mensal de ocorrências, para o ano de 2009.	186
7.38 Média mensal, à escala nacional, do índice DSR, obtido mediante previsões do WRF a 24 e 48 horas e respectivo número mensal de ocorrências, para o ano de 2009.	187
7.39 Modelos de regressão linear aplicados à área ardida mensal em função da média mensal de DSR e ao logaritmo neperiano da área ardida mensal em função da média mensal de DSR, obtidos mediante previsões WRF a 24 horas, para o período de Maio a Setembro de 2009.	189
7.40 Modelos de regressão linear aplicados à área ardida mensal em função da média mensal de DSR e ao logaritmo neperiano da área ardida mensal em função da média mensal de DSR, obtidos mediante previsões WRF a 48 horas, para o período de Maio a Setembro de 2009.	190
7.41 Distribuição, por número de dias, das classes de DSR à escala nacional e totais mensais de área ardida.	191
7.42 Distribuição, por número de dias, das classes de DSR à escala nacional e número total de ocorrências.	191
7.43 Média mensal, à escala nacional, do índice DSR, obtido mediante previsões do WRF a 24 e 48 horas, e respectiva área ardida mensal, para o ano de 2010.193	
7.44 Média mensal, à escala nacional, do índice FWI, obtido mediante previsões do WRF a 24 e 48 horas, e respectiva área ardida mensal para o ano de 2010.193	
7.45 Média mensal, à escala nacional, do índice FWI, obtido mediante previsões do WRF a 24 e 48 horas e respectivo número mensal de ocorrências, para o ano de 2010.	194
7.46 Média mensal, à escala nacional, do índice DSR, obtido mediante previsões do WRF a 24 e 48 horas e respectivo número mensal de ocorrências, para o ano de 2010.	194
7.47 Logaritmo da Área Ardida mensal <i>versus</i> média mensal de DSR, obtido mediante previsões WRF a 24 horas, para o período de Maio a Setembro de 2010.	195
7.48 Logaritmo da Área Ardida mensal <i>versus</i> média mensal de DSR, obtido mediante previsões WRF a 48 horas, para o período de Maio a Setembro de 2010	196
7.49 Distribuição, por número de dias, das classes de DSR à escala nacional e totais mensais de área ardida.	197

7.50	Distribuição, por número de dias, das classes de DSR à escala nacional e número total de ocorrências.	197
E.1	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 535 (Lisboa/Geofísico).	249
E.2	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 541 (Sines/Monte dos Chãos).	250
E.3	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 545 (Porto/Pedras Rubras).	251
E.4	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 548 (Coimbra/Cernache).	252
E.5	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 551 (Viana do Castelo/Chafé).	253
E.6	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 554 (Faro/Aeroporto).	254
E.7	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 558 (Évora/C.C.).	255
E.8	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 560 (Viseu/C.C.).	256
E.9	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 562 (Beja).	257
E.10	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 567 (Vila Real/C.C.).	258
E.11	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 568 (Penhas Douradas/Observatório).	259
E.12	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 570 (Castelo Branco/C.C.).	260
E.13	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 571 (Portalegre/C.C.).	261
E.14	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 575 (Bragança/C.C.).	262
E.15	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 579 (Lisboa/Gago Coutinho).	263
E.16	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 616 (Chaves/Aeródromo).	264
E.17	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 687 (Covilhã/Aeródromo).	265

E.18	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 535 (Lisboa/Geofísico).	266
E.19	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 541 (Sines/Monte dos Chãos).	267
E.20	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 545 (Porto/Pedras Rubras).	268
E.21	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 548 (Coimbra/Cernache).	269
E.22	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 551 (Viana do Castelo/Chafé).	270
E.23	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 554 (Faro/Aeroporto).	271
E.24	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 558 (Évora/C.C.).	272
E.25	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 560 (Viseu/C.C.).	273
E.26	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 562 (Beja).	274
E.27	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 567 (Vila Real/C.C.).	275
E.28	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 568 (Penhas Douradas/Observatório).	276
E.29	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 570 (Castelo Branco/C.C.).	277
E.30	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 571 (Portalegre/C.C.).	278
E.31	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 575 (Bragança/C.C.).	279
E.32	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 579 (Lisboa/Gago Coutinho).	280
E.33	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 616 (Chaves/Aeródromo).	281
E.34	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 687 (Covilhã/Aeródromo).	282
F.1	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 535 (Lisboa/Geofísico).	284

F.2	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 541 (Sines/Monte dos Chãos).	285
F.3	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 545 (Porto/Pedras Rubras).	286
F.4	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 548 (Coimbra/Cernache).	287
F.5	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 551 (Viana do Castelo/Chafé).	288
F.6	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 558 (Évora/C.C.).	289
F.7	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 560 (Viseu/C.C.).	290
F.8	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 562 (Beja).	291
F.9	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 567 (Vila Real/C.C.).	292
F.10	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 568 (Penhas Douradas/Observatório).	293
F.11	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 570 (Castelo Branco/C.C.).	294
F.12	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 571 (Portalegre/C.C.).	295
F.13	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 575 (Bragança/C.C.).	296
F.14	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 579 (Lisboa/Gago Coutinho).	297
F.15	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 616 (Chaves/Aeródromo).	298
F.16	Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 687 (Covilhã/Aeródromo).	299
F.17	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 535 (Lisboa/Geofísico).	300
F.18	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 541 (Sines/Monte dos Chãos).	301
F.19	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 545 (Porto/Pedras Rubras).	302

F.20	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 548 (Coimbra/Cernache).	303
F.21	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 551 (Viana do Castelo/Chafé).	304
F.22	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 558 (Évora/C.C.).	305
F.23	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 560 (Viseu/C.C.).	306
F.24	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 562 (Beja).	307
F.25	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 567 (Vila Real/C.C.).	308
F.26	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 568 (Penhas Douradas/Observatório).	309
F.27	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 570 (Castelo Branco/C.C.).	310
F.28	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 571 (Portalegre/C.C.).	311
F.29	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 575 (Bragança/C.C.).	312
F.30	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 579 (Lisboa/Gago Coutinho).	313
F.31	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 616 (Chaves/Aeródromo).	314
F.32	Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 687 (Covilhã/Aeródromo).	315

Lista de Tabelas

2.1	Distribuição mensal das ocorrências de incêndio e área total ardida, no ano de 2009.	30
2.2	Distribuição mensal das ocorrências de incêndio e área total ardida, no ano de 2010.	31
2.3	Duração efectiva do dia, para o cálculo de DMC.	45
2.4	Factores de ajuste da duração do dia, para o cálculo de DC.	46
2.5	Valores limite do índice FWI para as classes de risco em cada distrito, conforme descrito em Viegas et al. (2004).	49
3.1	Conjuntos de parametrizações disponíveis na versão 3.1 do WRF.	73
4.1	Grandezas fundamentais utilizadas em Detecção Remota, respectivas unidades de medida e esquematização.	81
5.1	Caracterização geral do radiómetro SEVIRI.	95
5.2	Datas e horas de aquisição dos ficheiros MOD14 e FIR utilizados para validação.	103
5.3	Exemplo de matriz de erro aplicada para a determinação das medidas de avaliação de precisão das detecções FIR.	104
5.4	Sistematização dos resultados da avaliação das detecções FIR comparativamente às detecções MODIS.	107
6.1	Estado da missão POES, relevando os satélites activos.	110
6.2	Caracterização geral dos canais do radiómetro AVHRR (3ª versão).	111
6.3	Fogos de grandes dimensões na base de dados de fogos do ICNF detectados pelo modelo de detecção proposto.	126
6.4	Resultados da validação do modelo de detecção de incêndios implementado.	140
7.1	Detalhes dos parâmetros relevantes para a construção dos domínios de simulação do WRF.	146

7.2	Parametrização física do WRF-ARW para as simulações levadas a cabo neste estudo.	150
7.3	Características das estações meteorológicas automáticas utilizadas para a validação das simulações WRF.	164
7.4	Sistematização das medidas de erro nas previsões WRF a 24 e 48 horas, para 2009.	165
7.5	Sistematização das medidas de erro nas previsões WRF a 24 e 48 horas, para 2010.	174
7.6	Médias mensais, à escala nacional, dos índices FWI e DSR e respectivas ocorrências e áreas ardidas, de Maio a Setembro de 2009. Fonte dos dados de ocorrências e área ardida: European Commission et al. (2010).	185
7.7	Resultados dos testes de normalidade à área ardida e ao número de ocorrências, de Maio a Setembro de 2009, e respectivos logaritmos naturais.	188
7.8	Coeficientes de correlação, para os dados da época de incêndio de 2009.	188
7.9	Médias mensais, à escala nacional, dos índices FWI e DSR e respectivas ocorrências e áreas ardidas, de Maio a Setembro de 2010. Fonte dos dados de ocorrências e área ardida: European Commission et al. (2011).	192
7.10	Resultados dos testes de normalidade à área ardida e número de ocorrências, de Maio a Setembro de 2010, e respectivos logaritmos naturais.	195
7.11	Matriz de correlação, para os dados da época de incêndios de 2010.	196
7.12	Ocorrências e Área Ardida, por distritos, no período de Maio a Setembro de 2009. Dados de área ardida aproximados à unidade. Fonte dos dados: SIGIF/2013 por intermédio da GNR/SEPNA.	199
7.13	Resultados do teste de Shapiro-Wilk, por distritos, para os dados da época de incêndios de 2009.	200
7.14	Médias mensais, por distrito, dos índices FWI e DSR, calculados mediante previsões WRF a 24 e 48 horas, para o período de Maio a Setembro de 2009.201	
7.15	Coeficientes de Correlação de Pearson, usando as observações 2009:05 - 2009:09.	202
7.16	Ocorrências e Área Ardida, por distritos, no período de Maio a Setembro de 2010. Fonte dos dados: SIGIF/2013 por intermédio da GNR/SEPNA.	203
7.17	Resultados do teste de Shapiro-Wilk, por distritos, para os dados da época de incêndios de 2010.	204
7.18	Médias mensais, por distrito, dos índices FWI e DSR, calculados mediante previsões WRF a 24 e 48 horas, para o período de Maio a Setembro de 2010.205	
7.19	Coeficientes de Correlação de Pearson, usando as observações 2010:05 - 2010:09.	206

Lista de Acrónimos

ACARS Aircraft Communications Addressing and Reporting System

API Application Program Interface

AVHRR Advanced Very High Resolution Radiometer

BUFR Binary Universal Form for the Representation of Meteorological Data

CONDUIT Cooperative Opportunity for NCEP Data Using IDD Technology

DVB-S, DVB-S2 Digital Video Broadcasting by Satellite (First & Second Generations)

ECMWF European Center for Medium range Weather Forecasting

EUMETSAT European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites

FTP File Transfer Protocol

GB Gigabyte

GFS Global Forecast System

GIS Geographic Information System(s)

GOES Geostationary Operational Environmental Satellite

GPS Global Positioning System

GRIB2 Gridded Binary, Edition 2

GRIB Gridded Binary

GUI Graphical User Interface

HDF4 Hierarchical Data Format, version 4

HDF5 Hierarchical Data Format, version 5

- HTML** Hypertext mark-up language
- HTTP** Hypertext Transfer Protocol
- IDD** Internet Data Distribution System
- IPCC** Intergovernmental Panel on Climate Change
- KML** Keyhole Markup Language
- KMZ** Compressed KML
- LDM** Local Data Manager
- MATLAB** Matrix Laboratory
- METAR** Meteorological Aviation Reports
- MM5** Mesoscale Model, version 5
- MODIS** Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
- NASA** National Aeronautics and Space Administration
- NCAR** National Center for Atmospheric Research
- NCDC** National Climatic Data Center
- NCEP** National Centers for Environmental Prediction
- NCO** netCDF Operators
- netCDF** Network Common Data Form
- NOAA** National Oceanic and Atmospheric Administration
- UA** Universidade de Aveiro
- UCAR** University Corporation for Atmospheric Research
- USGS** United States Geological Survey
- WMO** World Meteorological Organization
- WRF** Weather Research and Forecasting Model

Capítulo 1

Introdução

O primeiro capítulo debruça-se sobre a apresentação do trabalho, ao longo de cinco secções principais. Na primeira, são tecidas algumas considerações generalistas sobre o tema. Na segunda secção, delineiam-se os objectivos gerais do trabalho. Na terceira secção disserta-se sobre a justificação do trabalho. De seguida, expõem-se as etapas inerentes ao trabalho de investigação desenvolvido. Por fim, na quinta secção, apresenta-se a estrutura em torno da qual a presente dissertação se encontra organizada.

1.1 Considerações Gerais sobre o Tema

O fogo constitui parte integrante e indelével do conto da Humanidade, muito embora preceda a existência do Homem e da vegetação na superfície terrestre (Pausas e Keeley, 2009). Numa breve incursão pela História, o reconhecimento da descoberta e domesticação do fogo como um marco significativo no processo de evolução civilizacional é por demais evidente. Um exemplo claro da marca sócio-cultural do fogo sobre o Homem está patente na mitologia e no folclore. De um modo geral, todas as mitologias dedicam particular atenção ao fogo, num misto de reverência, respeito e temor. Na grega, por exemplo, surge o mito de Prometeu, o titã que roubou o fogo sagrado de Zeus, oferecendo-o, num gesto de supremo altruísmo, à humanidade. Tamanha ousadia foi punida por Zeus, decretando que Prometeu fosse acorrentado num penhasco do Cáucaso, durante trinta mil anos, durante os quais uma águia lhe debicaria diariamente o fígado. Também o fogo se relaciona com uma das mais importantes divindades do hinduísmo, Shiva, onde numa das mais frequentes representações surgem simultânea, antagónica, mas ciclicamente, a destruição e a regeneração. No simbolismo hindu, o fogo que destrói também purifica, levando, no decurso do ciclo da vida, ao renascimento. Na mitologia germânica, destaca-se a existência dos gigantes do fogo, com a sua aparente bipolaridade: ora protegem os Homens do frio e das intempéries, permitem-lhes que cozinhem os seus alimentos e que se defendam, ora, irados,

destroem e reduzem a cinzas tudo em seu redor. A tradição católica é também repleta de alusões ao fogo, desde o marcante episódio da sarça ardente, onde um anjo aparece a Moisés numa chama de fogo, por entre a sarça que ardia no fogo sem ser devorada; no Novo Testamento, a parábola do trigo e do joio alude ao fogo como elemento que consome e destrói, imagem que é também vincada na representação católica de Inferno, onde a imagem do fogo como elemento purificador está bem patente.

Um exemplo claro da presença do fogo no folclore dos povos está evidente na lenda soviética do pássaro de fogo (retratada no bailado de Igor Stravinsky com o mesmo nome): a colossal ave cuja flamejante plumagem reluz em matizes vermelhos, amarelos e alaranjados; a captura desta ave mágica de uma terra distante traduz-se, simultaneamente, numa bênção e numa maldição para o herói que é incumbido de tão épica tarefa.

A amálgama de fascínio e temor do Homem pelo fogo é tema utilizado sobremaneira em diversas outras áreas da expressão artística, como a pintura, onde algumas obras de pintores como Hieronymus Bosch (séculos XV e XVI), Giuseppe Arcimboldo (século XVI), Francisco Goya (século XVII), John Everett Millais (século XIX), René Magritte, Salvador Dalí e Joan Miró (século XX), entre outros, constituem bons exemplos; no cinema, o filme de Jean-Jacques Annaud, de 1981, *La guerre du feu*, baseado na obra de J. H. Rosny, o filme de Alvin Rakoff, de 1979, *City on Fire* ou mesmo o clássico de animação da Disney *Bambi* (1947) têm o fogo como elemento central; na literatura, em *Fahrenheit 451*, Ray Bradbury apresenta uma sociedade do futuro onde as casas que contivessem livros eram queimadas. No clássico da literatura juvenil de Rudyard Kipling, *O Livro da Selva* (cuja adaptação ao cinema de animação foi levada a cabo pela Disney), Mogli é apresentado como o detentor do poder sobre o fogo, facto que lhe confere superioridade, relativamente aos animais da floresta.

O fogo, nome utilizado para representar um processo físico-químico de combustão gasosa a altas temperaturas, é parte integrante de inúmeros biomas, como os mediterrânicos, podendo ser visto como distúrbio ecológico, mas igualmente como processo regenerativo. Neste sentido, entende-se por incêndio florestal aquele que deflagra e se estende por espaços florestais (arborizados ou não arborizados) ou que, tendo início noutros terrenos, se propaga por espaços florestais (PNDFCI, 2005). Assim, os incêndios florestais, enquanto exemplos de fenómenos de combustão, têm na sua origem a conjugação de três factores: recursos combustíveis, condições ambientais favoráveis à combustão e fontes de ignição. Por outro lado, o comportamento do fogo, isto é, a forma como ocorrem a ignição do combustível, o desenvolvimento da chama e o alastramento do fogo, é dominado por interacções mais complexas e dependentes do tempo entre o combustível, as condições meteorológicas e a topografia.

Os regimes naturais do fogo têm vindo a ser sistematicamente alterados pelo homem,

a seu bel-prazer, na incessante busca pela melhoria das suas condições de vida, ao longo de séculos. Como consequência, em certas regiões do mundo, os fogos de origem antropogénica têm vindo a ser mais frequentes do que os resultantes de fontes de ignição naturais (Goldammer e Crutzen, 1993, citado por Moreira et al, in Moreira, 2012). Assim, deve ser tido em consideração que, muito embora os fogos florestais possam ocorrer como resultado de um evento natural (como, por exemplo, as trovoadas), os danos que daí resultam são claramente inferiores aos que advêm da actividade antropogénica, para os mais variados propósitos e com diversas motivações. No caso específico dos incêndios florestais ocorridos em Portugal, e também na bacia mediterrânica, estima-se que 98% têm origem em comportamentos e actividades humanas (Mitchell et al., 2009).

Por outro lado, apesar de o fogo poder ser visto como um elemento catalisador da regeneração de determinadas espécies vegetais, os seus prejuízos são claramente maiores, não só em termos materiais, mas também, e sobretudo, no que ao risco para a vida humana diz respeito.

Entre alguns exemplos, podem elencar-se como consequências nefastas dos incêndios florestais: o aumento da vulnerabilidade do solo à erosão, devido à maior exposição da sua superfície à precipitação, alterações da composição do solo, no que concerne à quantidade de nutrientes, redução da biodiversidade (Neary et al., 2005) e poluição à escala local, resultante das emissões de óxidos de carbono (CO e CO₂), óxidos de azoto (NO_x) e hidrocarbonetos (HC). No que diz respeito à saúde pública, os fogos florestais constituem também uma ameaça, levando em consideração a exposição humana aos gases resultantes da combustão (Stefanidou et al., 2008). Para além destas consequências, é também de salientar que os fogos florestais acarretam danos económicos significativos, devido, por um lado, à onerosidade dos recursos envolvidos nas operações de prevenção e supressão, e, por outro lado, aos prejuízos decorrentes da desvalorização comercial das matérias-primas extraídas da floresta, não esquecendo, obviamente, a perda de áreas recreativas e de lazer.

Inúmeros estudos têm vindo a reconhecer a relação dos incêndios florestais com as mudanças climáticas à escala regional (Bedia et al., 2014; Carvalho et al., 2011; Clarke et al., 2011; Karali et al., 2013; Pereira et al., 2013; Kilpeläinen et al., 2010; Littell et al., 2010; Podur e Wotton, 2010) e global (Krawchuk et al., 2009; Liu et al., 2010; Pechony e Shindell, 2010), tendo em conta que a combustão de biomassa liberta quantidades apreciáveis de gases com efeito de estufa para a atmosfera, contribuindo, desse modo, para o aquecimento global (Fearnside, 2002). Em contrapartida, o aumento da temperatura como resultado de mudanças climáticas pode exercer efeitos significativos no regime do fogo, levando ao aumento das áreas ardidas, do número de ignições e da própria época de incêndios (Flannigan et al., 2009).

Segundo estudos recentes, ocorrem a cada ano, cerca de 45000 fogos florestais na

Europa, que devastam uma área de cerca de meio milhão de hectares de floresta (San-Miguel e Camia, in Birot, 2009). Entre 1995 e 2004, a região mediterrânica viu consumida pelo fogo uma área superior a 4 milhões de hectares, o que, em termos comparativos, constitui uma área superior à da Holanda. Neste sentido, há que reconhecer que, muito embora a maioria das ocorrências de incêndio tenha na sua causa a acção humana, na forma negligente ou dolosa, as variáveis meteorológicas exercem um papel de extraordinária importância, pelo que a sua contribuição tem que ser levada em consideração no processo de estimativa de perigo de incêndio, um conceito lato que incorpora um grande conjunto de processos, físicos ou aleatórios, que podem afectar a possibilidade de ignição e propagação de um incêndio, bem como o sua eventual dificuldade de supressão.

Os índices de perigo ou risco de incêndio visam resumir, de forma expedita, um conjunto de interações e factores que influam sobre a probabilidade de ocorrência de incêndios, bem como do provável comportamento do fogo, incluindo a facilidade de ignição, taxa de alastramento, dificuldade de controlo e impacto (EUFOFINET, 2012). Neste sentido, a elaboração destes índices pressupõe a modelação da influência de factores constantes e variáveis que possam afectar a deflagração e propagação de incêndios florestais, mediante a sua identificação e a sua integração em modelos, no sentido da obtenção de um resultado único, que se revista de valor acrescido para inúmeros sectores.

A Detecção Remota, podendo ser entendida, em sentido lato, como a ciência que permite obter informação sobre um objecto, área ou fenómeno, através da análise de dados adquiridos por um dispositivo (sensor) que não está em contacto com o objecto, área ou fenómeno que se encontra sob investigação (Lillesand et al., 2008), tem-se revelado uma mais-valia inquestionável para esta linha de investigação. Assim, a detecção remota de fogos florestais por intermédio de sensores a bordo de satélites ambientais tem desempenhado um papel crucial no suporte às operações de planificação, gestão e combate aos incêndios, não só pela identificação de fogos activos mas também no processo de estimativa e avaliação de riscos, na medida em que pode prover uma forma relativamente acessível, do ponto de vista económico, e rápida para a detecção e monitorização de incêndios florestais numa escala alargada. Muito embora o primeiro algoritmo de detecção de incêndios florestais por intermédio de radiómetros em plataformas orbitais remonte aos anos oitenta do século XX (Dozier, 1981), a investigação nesta área tem sido prolífica, em resposta ao empenho humano no envio de novos satélites ambientais para o espaço, com instrumentos cada vez mais sofisticados a operarem num número crescente de bandas espectrais, com maior resolução temporal e espacial, com o propósito fundamental de cobrirem os três aspectos fundamentais relacionados com a gestão de desastres naturais: previsão, monitorização e avaliação de impactos/danos.

Obviamente, a detecção remota de incêndios florestais a partir de satélite apresenta

algumas limitações. Por um lado, há que considerar o compromisso entre resolução espacial e resolução temporal: o satélite Landsat possui o sensor Enhanced Thematic Mapper, que permite resoluções espaciais de 30 e 60 m (no infravermelho de curto comprimento de onda e no infravermelho térmico), contudo a sua resolução temporal é de aproximadamente 16 dias, com um campo de cobertura relativamente pequeno. Por outro lado, o radiómetro AVHRR, presente nos satélites meteorológicos operados pela NOAA e nos satélites de órbita polar da EUMETSAT, oferece a resolução espacial de aproximadamente 1,1 km no nadir, aliado a uma resolução temporal diária, para os canais a operarem na banda do visível, e bidária, para os canais na gama do infravermelho. Já os satélites geostacionários, apesar de oferecerem uma elevada resolução temporal (quinze minutos, no caso das imagens obtidas pelo radiómetro SEVIRI a bordo dos satélites MSG operados pela EUMETSAT), vêem a resolução espacial das imagens, de cobertura global, reduzida a 3 km.

Por outro lado, uma limitação evidente da utilização dos sensores a bordo de satélites meteorológicos (em particular, de órbita polar) para a detecção e/ou monitorização de incêndios florestais está relacionada com o facto de os dados coligidos representarem uma visão instantânea da passagem do satélite sobre um dado local, quando o sinal térmico decorrente dos incêndios florestais pode ser de muito curta duração e o seu desenvolvimento não coincidir com o instante de aquisição dos dados.

1.2 Objectivos Gerais do Trabalho

Numa abordagem generalista, podem considerar-se como principais objectivos deste trabalho:

1. Utilização de modelos de previsão numérica de tempo para a obtenção de índice(s) meteorológico(s) de perigo de incêndio, numa base rotineira, em regime operacional;
2. Implementação de sistemas, a operar em tempo quase-real¹, de detecção e alerta de ocorrência de fogos florestais baseados em sinal de satélite directa e/ou indirectamente adquirido.

Decorrentes destes objectivos generalistas, podem considerar-se como objectivos específicos do trabalho desenvolvido:

- A avaliação da mais-valia da utilização de previsões numéricas de tempo de elevada resolução espacial com o modelo WRF para a determinação das componentes do sistema FWI canadiano, comparativamente aos resultados disponibilizados em Portugal

¹Neste contexto e doravante, no decurso deste documento, deve entender-se **tempo quase-real** como **o menor intervalo de tempo possível decorrido entre a realização de observações e a sua disponibilização ao utilizador**.

Continental pelas entidades competentes, na expectativa de oferecer um sistema de alertas, em regime operacional, de maior detalhe espacial e temporal;

- A comparação entre produtos de detecção de incêndios já existentes e bem estabelecidos na comunidade científica, no sentido de avaliar a sua qualidade sobre Portugal Continental;
- A avaliação dos resultados da detecção de focos de incêndios activos por intermédio do sinal adquirido pela estação HRPT da Universidade de Aveiro, comparativamente a outros produtos de detecção existentes, sobre Portugal Continental, com vista à sua implementação em regime operacional.

1.3 Justificação do Trabalho

Nos últimos anos, a ocorrência de incêndios florestais nas regiões mediterrânicas em particular e no planeta em geral tem vindo a sofrer incrementos consideráveis, tornando este um assunto sobre o qual a atenção da comunidade científica se debruçou, nas mais diversas valências. Por outro lado, Portugal é o país da Europa mais afectado pela ocorrência de incêndios florestais (European Commission et al., 2011, 2010).

O factor inovador inerente a este trabalho prende-se com a elevada resolução espacial a que são obtidas as componentes do sistema canadiano de indexação do perigo de incêndio sobre o território de Portugal Continental, a par com a sua disponibilização como produto operacional, numa base rotineira, e num formato estandarizado de acordo com os requisitos da comunidade científica (netcdf). Acredita-se, assim, que os conjuntos de dados originados no decurso deste trabalho constituam uma mais-valia para estudos futuros. Paralelamente, efectua-se a avaliação da performance do produto FIR, da EUMETSAT, sobre Portugal Continental, o que, à data, é tarefa inédita, podendo constituir, para os órgãos de tomada de decisões no sector florestal uma medida abonatória da confiança no produto, com vista à sua plena integração nas fontes de informação existentes.

Concomitantemente, apresenta-se um modelo de detecção de incêndios baseado no sinal detectado pelos satélites de órbita polar operados pela NOAA, justificando assim o investimento por parte do governo português em instrumentação científica e, ao mesmo tempo, provendo a sociedade das mais-valias decorrentes do seu uso.

1.4 Etapas do trabalho de investigação

A consecução dos objectivos delineados para o trabalho envolveu várias necessidades, distribuídas por várias tarefas, que se distribuíram, ao longo do tempo, de forma não

sequencial, conforme se sistematiza na figura 1.1.

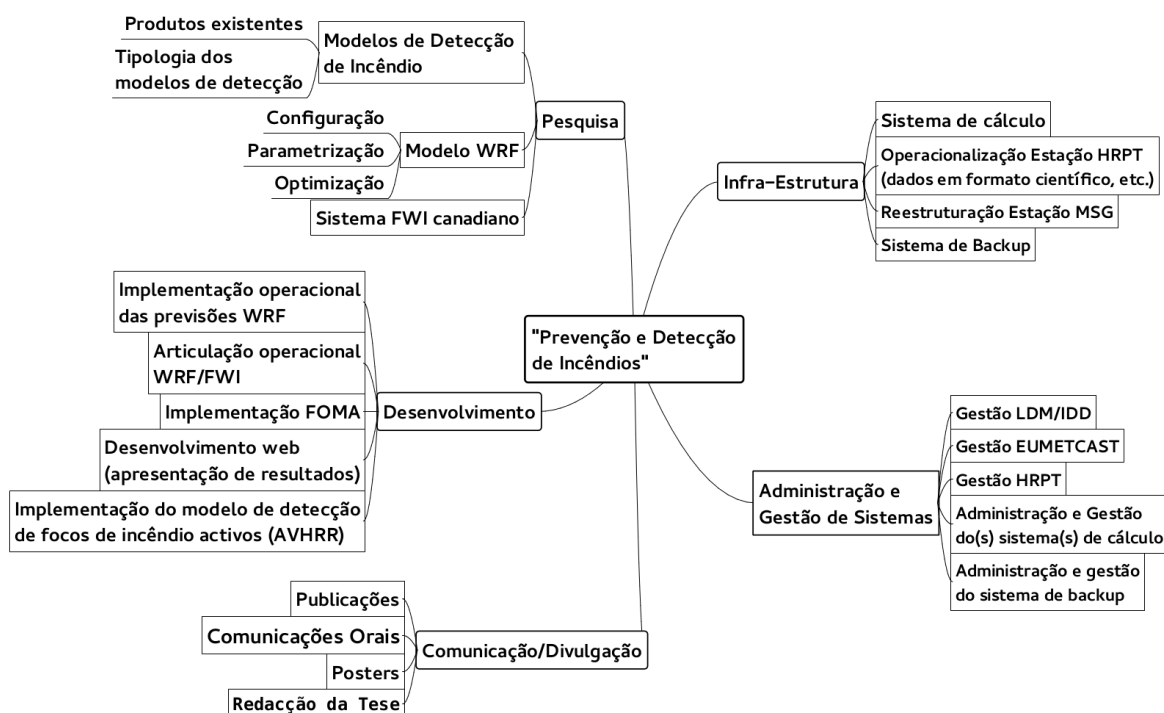


Figura 1.1: Esquematização das tarefas inerentes ao trabalho de investigação.

No que se refere a tarefas que se podem designar como decorrentes de questões de infra-estrutura, houve necessidade, numa primeira fase, de tornar completamente operacional a estação de recepção HRPT da Universidade de Aveiro, quer no que concerne à implementação de um sistema de processamento automático do sinal AVHRR coligido pela estação e segundo um formato adequado para uso científico, quer no que respeita ao estabelecimento e manutenção de um sistema de arquivo dos dados.

A estação EUMETCAST da Universidade de Aveiro foi igualmente sujeita a procedimentos similares. Se, por um lado, houve que acomodar as mudanças introduzidas pela alteração do HOTBIRD-6 para o EUROBIRD-9 como satélite de retransmissão dos dados, a par com a revisão técnica da estação, tornou-se imperativo, por outro lado, seleccionar, manter e gerir o vasto fluxo de informação disponível para recepção, na óptica da obtenção de produtos em regime operacional.

Dada a premência de implementar previsões de tempo em regime operacional, foi igualmente necessário implementar infra-estrutura de processamento do modelo WRF; assim, houve que reconfigurar o sistema de aquisição de dados de inicialização, baseado no IDD/LDM e projectar, de raíz, um sistema computacional capaz de permitir a obtenção, em tempo útil, das previsões de tempo de alta resolução sobre Portugal Continental com alcance de até cinco dias.

Paralelamente às actividades anteriormente referidas, a configuração, optimização e validação dos resultados obtidos pelo modelo de previsão WRF constituiu um conjunto de tarefas a que foi dada particular importância.

Por outro lado, a necessidade de tornar públicas as previsões de risco meteorológico de incêndio obtidas com recurso às previsões WRF em regime operacional, ditou a imperiosidade de desenvolvimento de um sistema de automatização e disponibilização pública da informação.

Implementou-se igualmente um modelo de detecção de focos de incêndio com base no sinal adquirido na estação HRPT da Universidade de Aveiro, a partir de algoritmos já existentes, com a devida adaptação às condições típicas de Portugal Continental. As necessidades intrínsecas do algoritmo desenvolvido conduziram ao desenvolvimento paralelo de produtos derivados dos dados AVHRR, como máscaras de nuvens, entre outros, não directamente relacionados com o trabalho a desenvolver, como temperatura da superfície do mar (Carvalho et al., 2008) e máscaras terra-água.

Desenvolveu-se um produto de visualização dos resultados do produto de detecção de incêndios FIR, da EUMETSAT, segundo o formato KML, e assente na API Google Maps, pelo que se tornou igualmente necessário reestruturar a página web da "Torre Meteorológica", por forma a reflectir os conteúdos decorrentes do presente trabalho de investigação, bem como a disponibilização da previsão de tempo, para Portugal Continental, num horizonte temporal de cinco dias.

1.5 Organização da Tese

O estudo detalhado, juntamente com a obtenção de conhecimento acerca da realidade complexa que subjaz aos incêndios florestais, sob o ponto de vista dos vários domínios da investigação no âmbito da Física em geral e das Ciências da Atmosfera e do Ambiente em particular, implicam a mobilização e gestão de um conjunto alargado de conceitos, métodos e técnicas investigativos que visam contribuir, por um lado, para a compreensão dos problemas em estudo e, por outro, para a promoção da rotura com o senso comum. Desta forma, o documento escrito que agora se apresenta não poderá nunca condensar todo o percurso construído ao longo desta investigação, centrando-se, pois, nos detalhes particulares mais prementes para o contributo que se pretende dar à compreensão de um problema com repercussões ambientais, sociais, económicas e humanas, na expectativa de que a sua eventual operacionalização possa contribuir positivamente para a sua minimização. Inelutavelmente, tem o autor perfeita consciência de que abordar a questão-problema dos incêndios florestais não implica uma resposta de exclusiva unicidade, isenta de potenciais lacunas, nem tão-pouco estática e perene. Outrossim, representa o presente trabalho uma abordagem

da investigação aplicada que possa eventualmente ser vista como um potencial contributo para a compreensão, ainda que parcial, de um problema que assola Portugal Continental, de um modo particularmente intenso, recorrentemente a cada Verão.

A presente dissertação encontra-se organizada em capítulos, dedicados à exploração das temáticas constituintes do assunto em investigação.

O primeiro capítulo contém algumas considerações sobre o tema em investigação, a par com a delineação dos objectivos do trabalho desenvolvido, primeiro sob um ponto de vista geral, e, posteriormente, particularizando em detalhe as linhas-mestras pelas quais o trabalho de investigação se procurou nortear.

O segundo capítulo dedica-se à exposição da problemática dos incêndios florestais, contemplando, em primeira análise, algumas considerações sobre alguns dos aspectos relacionados com as etapas inerentes aos fogos florestais: pré-ignição, ignição e combustão. Em seguida, após uma breve contextualização climática da região em estudo, é apresentada uma análise relativa aos incêndios florestais em Portugal Continental, apresentando-se igualmente alguns resultados relativos a estudos recentes sobre a origem e causas dos incêndios em Portugal, bem como uma breve resenha ao enquadramento legal mais relevante para este assunto. Relaciona-se igualmente a meteorologia com a expressividade dos incêndios florestais, salientando o efeito das variáveis meteorológicas (precipitação, humidade relativa, temperatura do ar e intensidade do vento) sobre o combustível florestal e o comportamento do fogo. Os índices de perigo de incêndio meteorológico e a sua utilidade são referenciados, incidindo-se com particular destaque no sistema canadiano de indexação do perigo de incêndio.

O terceiro capítulo versa sobre os modelos de previsão numérica de tempo. Numa primeira secção, efectua-se uma breve resenha histórica dos mais significativos marcos no processo de previsão numérica de tempo. Posteriormente, enquadra-se cientificamente o problema da previsão numérica de tempo, apresentando-se uma revisão geral da formulação física do problema. Por último, apresenta-se a descrição do modelo de previsão numérica de tempo WRF, utilizado neste trabalho, salientando a sua constituição e princípios básicos de funcionamento.

No quarto capítulo, aborda-se a Detecção Remota e seus contributos para a detecção de incêndios florestais. Assim, numa primeira secção, resumem-se os principais conceitos básicos comumente utilizados em Detecção Remota, bem como a base física da detecção de incêndios florestais por intermédio do sinal medido por satélite. Seguidamente, procede-se à descrição e distinção dos diferentes tipos de algoritmos de detecção de incêndio, bem como a uma contextualização da evolução do processo de detecção de focos de incêndio com recurso a satélites.

No quinto capítulo, apresenta-se uma ferramenta de visualização de focos de incêndio

activos com recurso a um produto operacional desenvolvido pela EUMETSAT, que foi alvo de publicação em Carvalho et al. (2010). Por outro lado, apresenta-se detalhadamente a estação de recepção EUMETCast da Universidade de Aveiro, bem como o radiómetro SEVIRI e o produto de detecção de incêndios FIR, da EUMETSAT. Segue-se a descrição da implementação da ferramenta de visualização desenvolvida, bem como a validação do produto FIR sobre Portugal Continental.

O sexto capítulo dedica-se à apresentação do sistema de detecção de incêndios sobre Portugal Continental por intermédio dos dados AVHRR coligidos pela estação de recepção HRPT da Universidade de Aveiro. Assim, nas primeiras secções, apresentam-se algumas considerações sobre os satélites de órbita polar operados pela NOAA, bem como sobre o radiómetro AVHRR, a bordo desses satélites. Apresenta-se em detalhe a estação de recepção HRPT da Universidade de Aveiro, quer em termos de hardware, quer no que às escolhas de software efectuadas para aquisição e processamento de sinal diz respeito. De seguida, apresentam-se os produtos desenvolvidos com vista à detecção de incêndios, nomeadamente a máscara de nuvens e o algoritmo de detecção de incêndios *per se*. O capítulo termina com a apresentação e discussão dos resultados obtidos, expondo igualmente os resultados de validação do produto desenvolvido.

No sétimo e penúltimo capítulo, aborda-se o acoplamento *ad hoc* do modelo canadiano de indexação do perigo de incêndio ao modelo de previsão numérica de tempo WRF. Assim, e sem deixar de ser referida a importância da participação da UA no projecto IDD/LDM e suas vantagens na aquisição de dados de inicialização do modelo, é descrita pormenorizadamente a configuração do WRF utilizada para esta investigação, quer no que diz respeito ao *design* dos domínios de simulação computacional, quer no que concerne à parametrização física utilizada. Adicionalmente, são tecidas considerações sobre a articulação do sistema de modelação computacional WRF com o sistema FWI canadiano. O capítulo prossegue com a apresentação dos resultados obtidos das componentes do sistema FWI canadiano para duas épocas de incêndios diferentes: 2009 e 2010. É apresentada a metodologia em que a validação dos resultados das previsões de tempo assentou, assim como os resultados dessa validação. Posteriormente, procede-se à análise das componentes do sistema canadiano de indexação do perigo de incêndio para os períodos supra-citados, no sentido de aferir a adequabilidade da utilização das previsões WRF de alta resolução para a disponibilização de alertas de perigo de incêndio.

No oitavo capítulo, reúnem-se as principais conclusões do trabalho efectuado, sendo igualmente efectuada uma reflexão sobre as limitações do estudo e a antevisão de possíveis caminhos de continuidade da investigação desenvolvida.

Capítulo 2

Da problemática dos Incêndios florestais

O segundo capítulo contém nove secções dedicadas à contextualização do problema dos incêndios florestais. Na secção 2.1, tecem-se algumas considerações relativas aos processos físicos e químicos associados à queima de combustível florestal. Seguidamente, procede-se a uma breve caracterização de Portugal Continental, salientando os aspectos mais relevantes do clima do país. Na terceira secção, é apresentada a floresta portuguesa, dando particular ênfase à sua constituição e distribuição geográfica das espécies; de igual modo, são apresentadas algumas reflexões relativas à evolução histórica da floresta em Portugal. A quarta secção dedica-se à análise dos incêndios florestais em Portugal, tendo como sequência algumas reflexões sobre a origem e causas dos incêndios florestais em Portugal, bem como uma resenha da legislação mais relevante para esta temática. Na secção 2.7, aborda-se a relação entre a meteorologia e os incêndios florestais, relevando particularmente o efeito da precipitação, da humidade relativa, da temperatura do ar e do vento. As duas últimas secções do capítulo exploram, respectivamente, os índices de risco e perigo de incêndio em geral e o sistema Fire Weather Index canadiano em particular.

2.1 Física e Química dos Incêndios Florestais

O termo fogo constitui uma designação genérica utilizada para a referência a processos de combustão gasosa a altas temperaturas. Em sentido lato, há que considerar que, para estarem satisfeitos os requisitos para a ocorrência de uma reacção de combustão, é necessário que exista um combustível, um meio comburente e energia de activação. A combustão é, pois, um processo exoenergético no qual estão contidas transformações químicas que envolvem o combustível e o oxigénio. No caso particular dos incêndios florestais, o combustível é constituído pelo material vegetal, vivo ou morto, materiais não voláteis que ardem

acima de 65 °C, mas também pelos compostos orgânicos voláteis (COV), resultantes da actividade fotossintética, que são libertados para a atmosfera e, por serem inflamáveis a temperaturas pouco superiores à temperatura ambiente, constituem um meio combustível que se estende em altitude (Drysdale, 1999; Jarosinski e Veyssiere, 2009; Liberman, 2008).

Na sua globalidade, no fenómeno constituído pelos incêndios florestais estão envolvidas, sob o ponto de vista químico, diferentes etapas. Numa primeira fase, a **pré-ignição**, verifica-se a ocorrência de várias reacções endoenergéticas; nelas, o combustível é aquecido, ocorrendo, pois, a desidratação e volatilização de compostos orgânicos. Alguns, como os terpenos (C₁₀H₁₆) e os isoprenos (C₅H₈), volatilizam a temperaturas mais baixas, ao passo que, a temperaturas mais elevadas, se dá início ao processo de pirólise dos combustíveis florestais, entendendo-se por pirólise a decomposição química de combustível sólido sob a influência do aquecimento e, usualmente, num ambiente pobre em oxigénio. Este processo dá origem a compostos gasosos (voláteis) de baixa massa molecular, alcatrão, *char*¹ e cinzas minerais (Liodakis et al., 2002).

Note-se que, ao contrário dos polímeros sintéticos, a madeira é um material heterogéneo e anisotrópico, isto é, muitas das suas propriedades variam com a direcção em que uma medição é efectuada. A madeira é, pois, uma mistura complexa de polímeros naturais de elevada massa molecular, destacando-se, como mais importantes, a celulose (que contribui com 41 a 53% para a massa total das espécies), a hemicelulose (que contribui com cerca de 25% para a massa das espécies) e a lenhina (que contribui com cerca de 25% para a massa total das espécies). Adicionalmente, a água está também contida em quantidades variáveis, que dependem da humidade relativa e das condições de exposição. A celulose, principal constituinte de todas as plantas ditas superiores, é um polímero de condensação da hexose, que possui uma estrutura linear, conforme ilustrado na figura 2.1. Esta configuração permite que as moléculas se alinhem em microfibrilas, o que lhes confere a sua resistência estrutural e a rigidez da parede celular (Drysdale, 1999).

A celulose degrada-se termicamente a temperaturas contidas entre 280 a 400 °C, seguindo dois mecanismos intercompetitivos: por um lado, a desidratação, que dá origem a *char* e gases (CO₂ e H₂O no estado gasoso), e, por outro, a despolimerização, que origina alcatrão e compostos voláteis, por via da formação de levoglucosano, um combustível volátil que sustém uma chama em fase gasosa (Liodakis et al., 2002).

Altas temperaturas e elevadas taxas de aquecimento favorecem a evolução da volatilização, que alimenta a combustão, ao passo que baixas temperaturas e taxas de aquecimento mais lentas promovem a produção de alcatrão e *char*. A hemicelulose constitui 15 a 25% da massa das espécies florestais e possui uma estrutura química similar à celulose, baseada

¹ Produtos da combustão incompleta dos combustíveis vegetais, conhecidos por pirolisados ou carbonizados, e referidos frequentemente na literatura como *char*, carbono pirogénico, carvão vegetal, ou ainda material vegetal carbonizado.

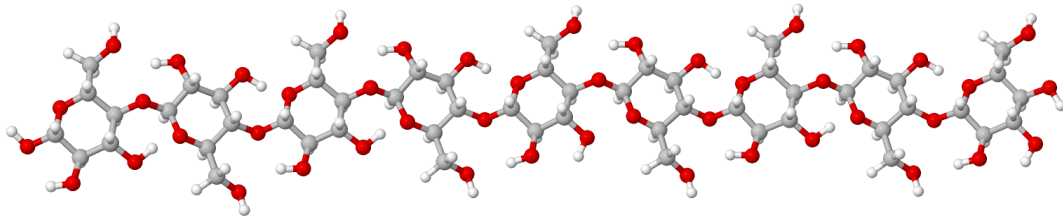


Figura 2.1: Representação parcial da estrutura da celulose. Crédito do modelo Jmol: <http://www.lsbu.ac.uk/water/hycel.html> .

na pentose e hexose, pelo que possui um comportamento face à degradação térmica muito similar. Já a lenhina, que contribui com cerca de 16 a 33% para a massa das espécies, é um composto mais complexo sob o ponto de vista químico e mais estável termicamente. A pirólise desta macromolécula ocorre a temperaturas entre os 280 e os 500 °C, sendo maior o seu contributo para a formação de *char*.

A segunda fase dos processos relacionados com a queima de combustível florestal é exoenergética e designada por **combustão**, que pode ocorrer com ou sem chama. A combustão flamejante² ocorre quando a temperatura dos compostos voláteis emergentes da superfície dos combustíveis florestais alcança valores compreendidos entre 450 a 500 °C. Já a combustão de um sólido sem chamas se designa convencionalmente por combustão lenta ou incandescente³. Este tipo de combustão é de particular importância no contexto dos fogos florestais na medida em que se relaciona com fogos à superfície dos horizontes do solo orgânicos, que podem perdurar por bastante tempo. Note-se que este tipo de combustão ocorre geralmente com combustíveis mais compactados do que aqueles em que ocorre combustão com chama.

A **ignição** é a fase que permeia a transição entre as fases de **pré-ignição** e **combustão**, definindo-se como a temperatura crítica que a fase condensada necessita de atingir para que a combustão se inicie, podendo considerar-se a existência de dois tipos de ignição: espontânea e auto-pilotada. Na primeira, está subentendida a combustão espontânea, numa atmosfera normal e sem o recurso a uma fonte de ignição externa. Na ignição auto-pilotada é requerida uma chama piloto para activar a combustão através da inflamação dos gases voláteis. Após ignição, a energia decorrente da própria combustão leva à ignição outros combustíveis, promovendo, por consequência, o alastramento do fogo (Liodakis et al., 2002).

²Na língua inglesa, *flaming combustion*.

³*Smoldering*, na literatura em inglês.

2.2 Breve caracterização do clima em Portugal

Situado no extremo sudoeste do continente europeu, e ocupando cerca de um quinto da Península Ibérica, Portugal Continental situa-se entre os paralelos 36° 57' 42" e 42° 09' 15", de latitude Norte, e entre os meridianos 6° 11' 20" e 9° 31' 01" a oeste do meridiano de Greenwich. Portugal Continental confronta-se a norte e a este com Espanha e a sul e oeste com o Oceano Atlântico, conforme ilustrado na figura 2.2. O território continental de Portugal ocupa uma área aproximada de 89000 km², sendo o perímetro do país de aproximadamente 2600 km, 1300 dos quais correspondentes à linha costeira com o Oceano Atlântico (Instituto Nacional de Estatística IP., 2010).

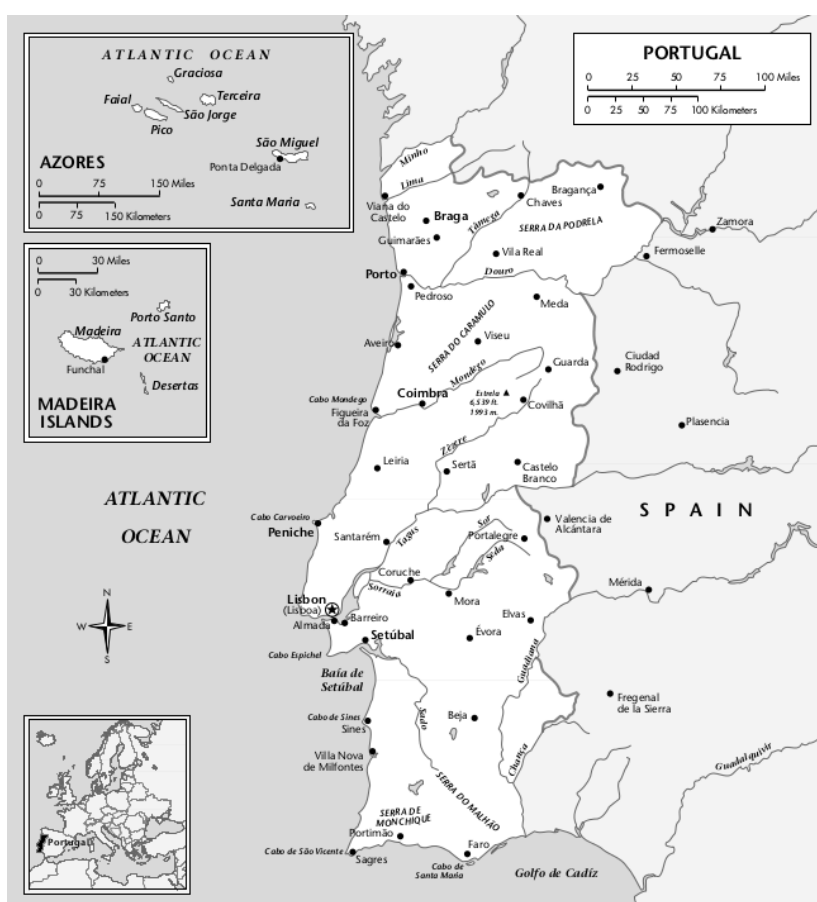


Figura 2.2: Mapa de Portugal. Créditos da imagem: Pendergast e Pendergast (2002).

O rio Tejo marca a dicotomia entre dois tipos principais de relevo que se observam, à primeira vista, em Portugal Continental: a prevalência de montanhas e planaltos a norte do Tejo, e a predominância de terras aplanadas a Sul (figura 2.3).

A necessidade de estimar e modelar o clima tem vindo a constituir uma preocupação generalizada nos últimos anos, tendo em conta o impacto sócio-económico que exercem as grandes flutuações do clima. O clima associado a uma dada região sofre variações de

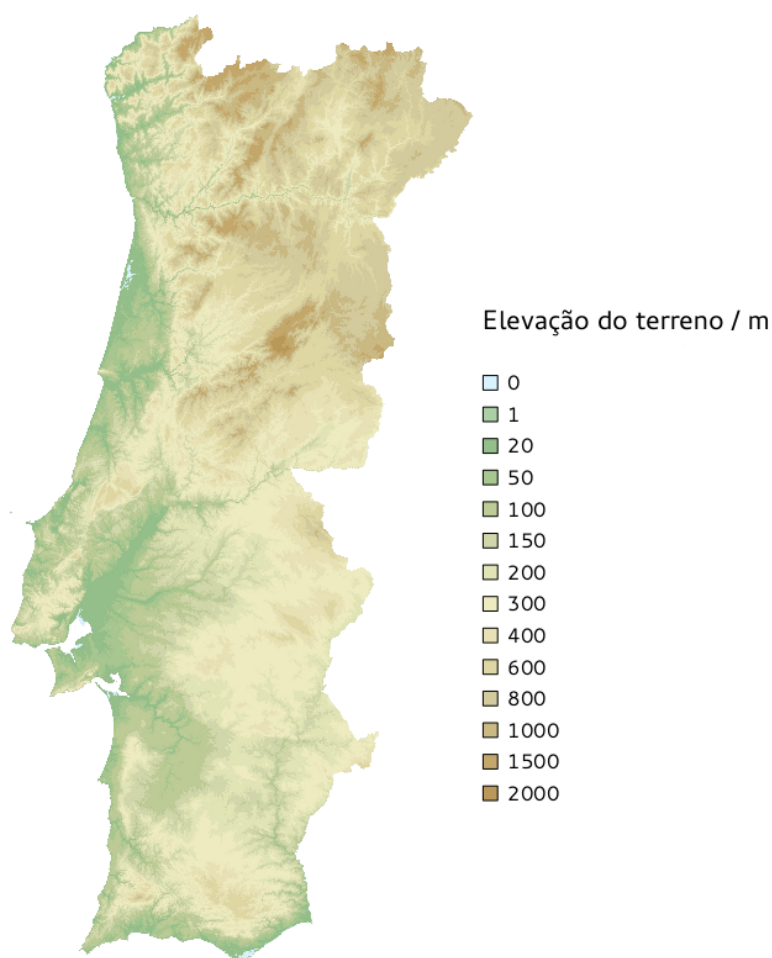


Figura 2.3: Mapa de elevação do terreno em Portugal Continental, obtido através de um modelo digital de terreno à resolução de 30 m. Fonte dos dados: ASTER GDEM.

forma natural ao longo do tempo. Não obstante, tem-se vindo a observar que, nas últimas décadas, estas mudanças ocorrem a uma maior celeridade que no passado (Alvarez et al., 2012). Os estudos mais recentes têm vindo a reconhecer, de forma unânime, que estas mudanças se devem a factores antropogénicos, nomeadamente pelo aumento do efeito de estufa (IPCC, 2007). Torna-se, assim, premente a definição de uma nova época geológica, reconhecendo a importância do Homem, como Antropocénico.

Dada a sua localização geográfica nas latitudes médias do Hemisfério Norte, Portugal encontra-se sujeito à circulação atmosférica predominante de oeste. A sua climatologia está dominada, em primeira análise, pela referida circulação, que vinca a influência marítima. No Inverno, Portugal é afectado pela movimentação dos centros de acção para sul, pelo que a passagem de superfícies frontais associadas aos centros de baixas pressões atlânticas se faz acompanhar de precipitação e ventos dominantes do Sudoeste. No Verão, com o

constrangimento do ar frio nas latitudes polares em virtude do aumento da radiação, o anticiclone semipermanente dos Açores ascende, tomando o território português sobre o seu raio de acção e estabilizando a atmosfera, caracterizando-se o estado do tempo como predominantemente seco, com ventos típicos de Noroeste (NW).

Um estudo levado a cabo com dados observacionais provenientes da rede de observação nacional (Santos et al., 2002), permitiu uma análise integrada da evolução climática em Portugal, durante o século XX, no período de 1961 a 1990. Desse estudo, é possível tecer algumas considerações no que respeita aos elementos do clima em Portugal, com particular ênfase sobre a temperatura e a precipitação. Assim, no período a que o estudo se refere, a temperatura média do ar à superfície apresenta variações espaciais entre um mínimo de 7 °C nas regiões mais altas da Serra da Estrela e um máximo de 18 °C na região em torno da costa algarvia. A temperatura mínima do período de Inverno é inferior a 0 °C nos pontos mais altos da Serra da Estrela, destacando-se igualmente a existência de valores de temperatura mínima inferiores em certas zonas do interior norte e centro. Já no que à temperatura máxima do ar para os meses de Inverno diz respeito, os seus valores máximos verificam-se na costa sul e na península de Setúbal, com cerca de 10 °C. Nos meses de Verão, a média da temperatura máxima atinge valores superiores a 32 °C no interior centro (Castelo Branco) e no interior sul (Mourão - Amareleja), encontrando-se igualmente valores de temperatura superiores a 30 °C no interior norte (Trás-os-Montes) e entre 16 a 18 °C na Serra da Estrela.

No intuito de providenciar dados mais actualizados que os referidos em Santos et al. (2002), nomeadamente no que diz respeito ao período compreendido entre 2000 e 2010, procedeu-se a uma análise dos dados registados pelas Estações Meteorológicas da Rede de Observação do IPMA nesse período. Assim, foram seleccionadas 24 estações meteorológicas, representadas na figura 2.4, utilizando-se os dados observados segundo periodicidade diária e horária. De antemão se deve salientar, por análise da figura, que a densidade de estações de observação é maior no norte que no sul, tendo-se procurado obter uma igual densidade de dados observacionais no litoral e no interior do País. Note-se, igualmente, que, conforme convencionado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), o clima é caracterizado pelos valores médios dos vários elementos climáticos num período de 30 anos, pelo que nesta análise se procura comparar, de alguma maneira, a variabilidade espaço-temporal das principais variáveis climáticas (precipitação, temperatura e intensidade do vento) com as normas existentes em bibliografia anterior, como Peixoto (1972, 1978), Font (2000) e Santos et al. (2002). Assim, nas figuras 2.5a a 2.5c é ilustrada a distribuição espacial das médias anuais de temperatura, bem como da média das temperaturas mínimas de Inverno e máximas de Verão.

De acordo com a análise efectuada, pode verificar-se, a partir das isotérmicas do mapa

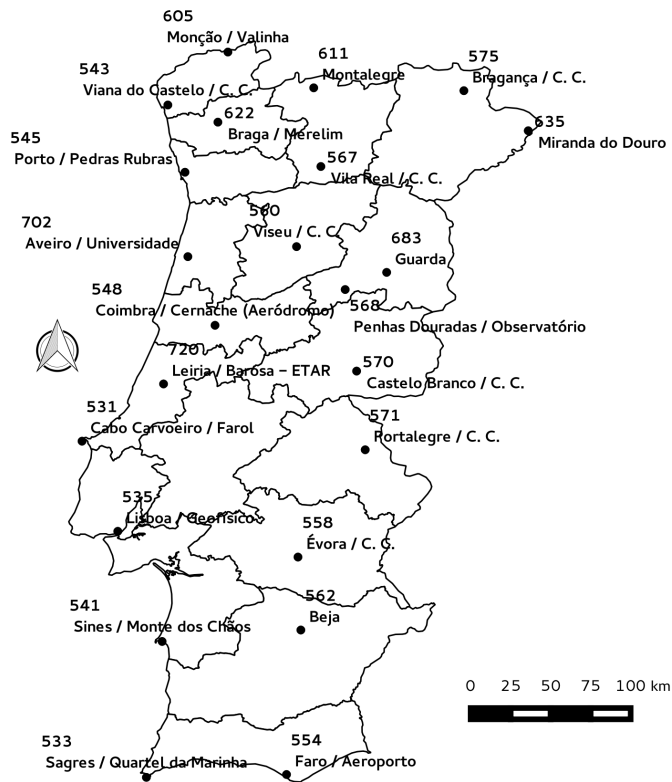


Figura 2.4: Distribuição espacial das Estações Meteorológicas do IPMA cujos dados, no período de 2000 a 2010, foram utilizados para a caracterização do clima em Portugal Continental.

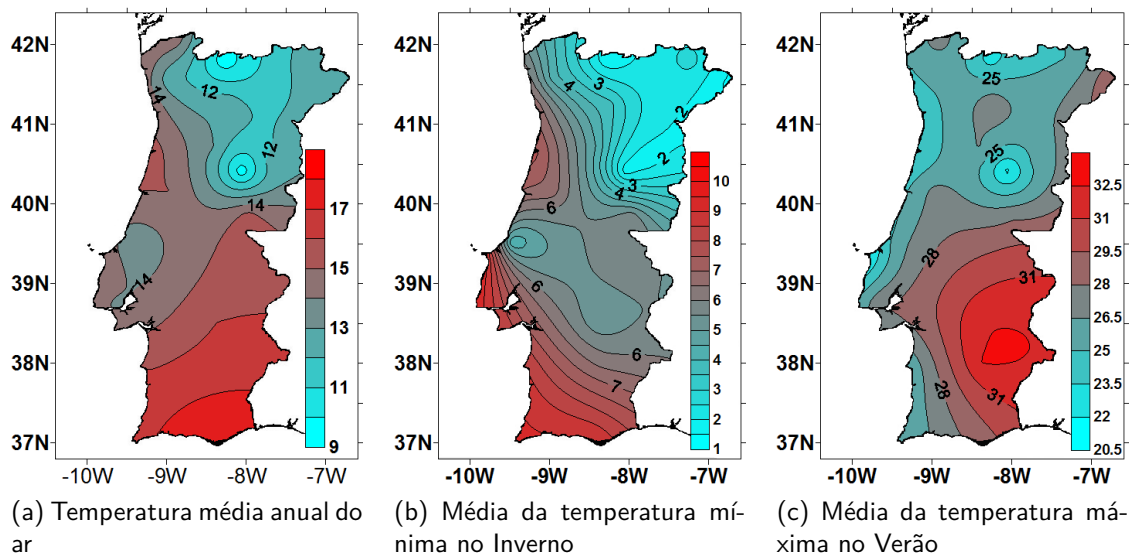


Figura 2.5: Média das temperaturas do ar ($^{\circ}\text{C}$): média anual, mínima no Inverno e máxima no Verão. Dados de observações no período 2000-2010.

da figura 2.5, a grande variabilidade da temperatura média anual em Portugal, o que se justifica pela orografia complexa do território. Para o período em análise, a temperatura média oscila entre um mínimo de 9,3 °C, nas regiões mais altas da Serra da Estrela, e um máximo de 18 °C, na região em torno da costa algarvia. A variação latitudinal é responsável pelas diferenças entre a temperatura média anual no norte e no sul do País. Por outro lado, o efeito regulador do oceano é bastante visível, ao observar-se que a região costeira é mais quente que as regiões do interior, em virtude do efeito do ar mais quente que provém do oceano. Igual constatação pode ser efectuada ao ter em conta a forte penetração do ar mais quente nas bacias dos rios Tejo e Guadiana. A temperatura média anual observada no continente no período em estudo é de 14,1 °C, ligeiramente superior à encontrada por Manso e Esteves (2002), no período de 1949-1997, mantendo-se, porém, o mesmo padrão de variabilidade, sendo imediatamente reconhecíveis duas áreas divididas pela isotérmica de 14 °C.

Na análise das temperaturas máximas de Verão tornou-se evidente uma característica típica das costas portuguesas: a de as temperaturas do mês de Julho serem, com frequência, mais baixas que as de Agosto. Esta é uma anomalia única na Europa (Font, 2000), e deve-se ao facto de, em Julho, Portugal ser invadido pelas massas de ar relativamente frias de origem atlântica, enquanto que em Agosto persistem as massas de ar quentes típicas da Península Ibérica, que procedem de África. Esta característica traduz-se num aumento da orla costeira, a temperaturas mais baixas que o interior. Nos meses de Verão, a média da temperatura máxima atinge valores máximos no interior centro e sul, encontrando-se igualmente valores de temperatura elevados no interior norte (Trás-os-Montes) e mais baixos na Serra da Estrela, em conformidade com o estudo de Santos et al. (2002), para o período de 1961 a 1990.

A temperatura média das mínimas do período de Inverno é bastante mais variável (sendo o coeficiente de variação, CV, igual a 41%). Esta variabilidade pode ser justificada pelo efeito moderador dos ventos dominantes do Atlântico, que leva a que, descartando o efeito de altitude, a parte oriental seja mais fria que a ocidental. Por outro lado, há que considerar a diminuição longitudinal da costa para o interior, sobretudo na região norte. Deve salientar-se a temperatura média das mínimas de 1,9 °C nos pontos mais altos da Serra da Estrela, destacando-se igualmente a existência de valores de temperatura mínima inferiores em certas zonas do interior norte e centro.

No estudo de Santos et al. (2002), referente à análise do período de 1961 a 1990, verificou-se, na análise ao número médio de dias por ano caracterizados por temperatura máxima do ar superior a 35 °C, um máximo absoluto, de valor superior a 30 dias no interior sul (Mourão - Amareleja), seguido de máximos relativos no interior norte e no interior centro, em consonância com a distribuição espacial dos máximos da temperatura máxima do ar

nos meses de Verão. A análise dos dados da rede de estações meteorológicas automáticas para o período de 2000 a 2010 evidencia (figura 2.6) uma distribuição de número de dias muito quentes muito similar aos dados de Santos et al. (2002), identificando-se, de forma análoga, um máximo absoluto na região interior sul, bem como os máximos relativos nas regiões do interior norte e centro.

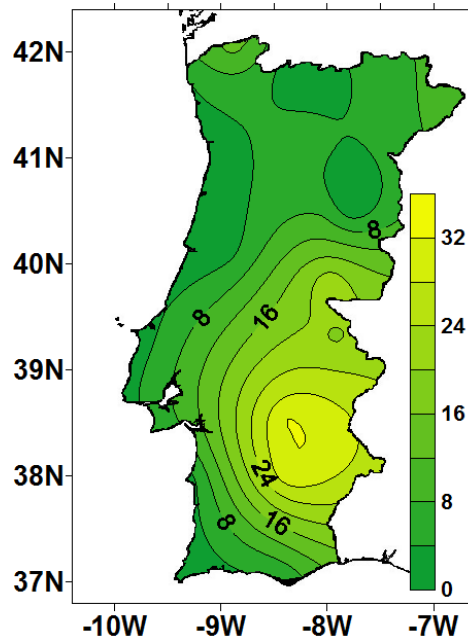


Figura 2.6: Número médio de dias com temperatura máxima superior a 35 °C. Dados de observações no período 2000-2010.

No que à precipitação diz respeito, deve, em primeiro lugar, referir-se que Portugal é uma região fortemente dependente do ciclo de precipitação anual. A quantidade de precipitação não se distribui uniformemente no tempo, nem no espaço. Há regiões onde a precipitação é 10 vezes a que se verifica noutras. Por exemplo, a região noroeste do país é uma das zonas da Europa que regista valores mais elevados de precipitação, com a média da precipitação anual acumulada a exceder 3000 mm nalguns locais dessa região. No extremo oposto, em várias zonas do interior do Alentejo, a precipitação anual média é inferior a 600 mm, apresentando variações interanuais muito acentuadas, o que torna a região susceptível a fenómenos de cheias ou seca, em concordância com Peixoto (1972, 1978), segundo o qual a região ao norte do Tejo recebe mais de 65% da quantidade total da precipitação registada em Portugal. As condições gerais da circulação atmosférica provocam uma sensível diminuição da precipitação anual de norte para sul do Continente, reforçada pela assimetria orográfica; a barreira de relevos no Norte e o afastamento do litoral provocam menor queda de chuva no interior.

Os resultados de Santos et al. (2002), mostram que os valores mais baixos de precipi-

tação anual se verificam a sul do Douro, numa região restrita da Beira Interior, com uma precipitação média anual inferior a 600 mm. De igual modo, o estudo citado refere, para o período de 1961 a 1990, que 42% da precipitação anual ocorre no Inverno, ao passo que o Verão é a estação do ano menos chuvosa, na qual ocorrem 6% da precipitação anual, sendo a Primavera e o Verão as estações do ano responsáveis pelos restantes 52% da precipitação anual acumulada. No que concerne ao estudo levado a cabo com os dados do período de 2000 a 2010, a figura 2.7 mostra a distribuição da precipitação média acumulada anualmente, tornando facilmente perceptíveis os contrastes entre os valores mínimos e os valores máximos acumulados. Para além das variações geográficas, a distribuição da precipitação apresenta variações muito marcadas no decurso do ano, conforme ilustra a figura 2.8. As variações sazonais são evidentes, conforme ilustram as figuras 2.8a a 2.8d, sendo igualmente de considerar as flutuações do clima. A distribuição anual no período de estudo exhibe um padrão semelhante ao descrito por Peixoto (1972, 1978), Font (2000) e Santos et al. (2002), sendo, porém, de magnitude inferior.

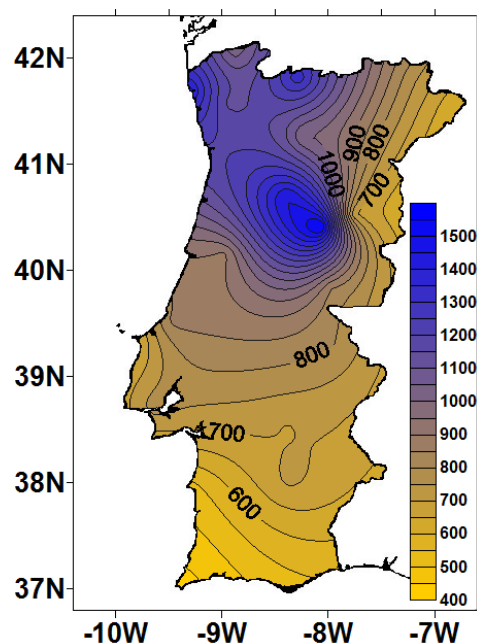


Figura 2.7: Média da precipitação anual acumulada (mm). Dados de observações no período 2000-2010.

O regime de ventos à superfície de Portugal Continental é determinado pela conjugação de dois factores: por um lado, à escala sinóptica, o campo da pressão atmosférica e, por outro, os efeitos locais inerentes à orografia e ao uso do solo.

Assim, tanto a intensidade como a direcção do vento à superfície de Portugal Continental é muito afectada pelas condições locais, observando-se, ainda, uma clara variação diurna, com uma tendência de a velocidade do vento ser mais fraca durante a noites que durante

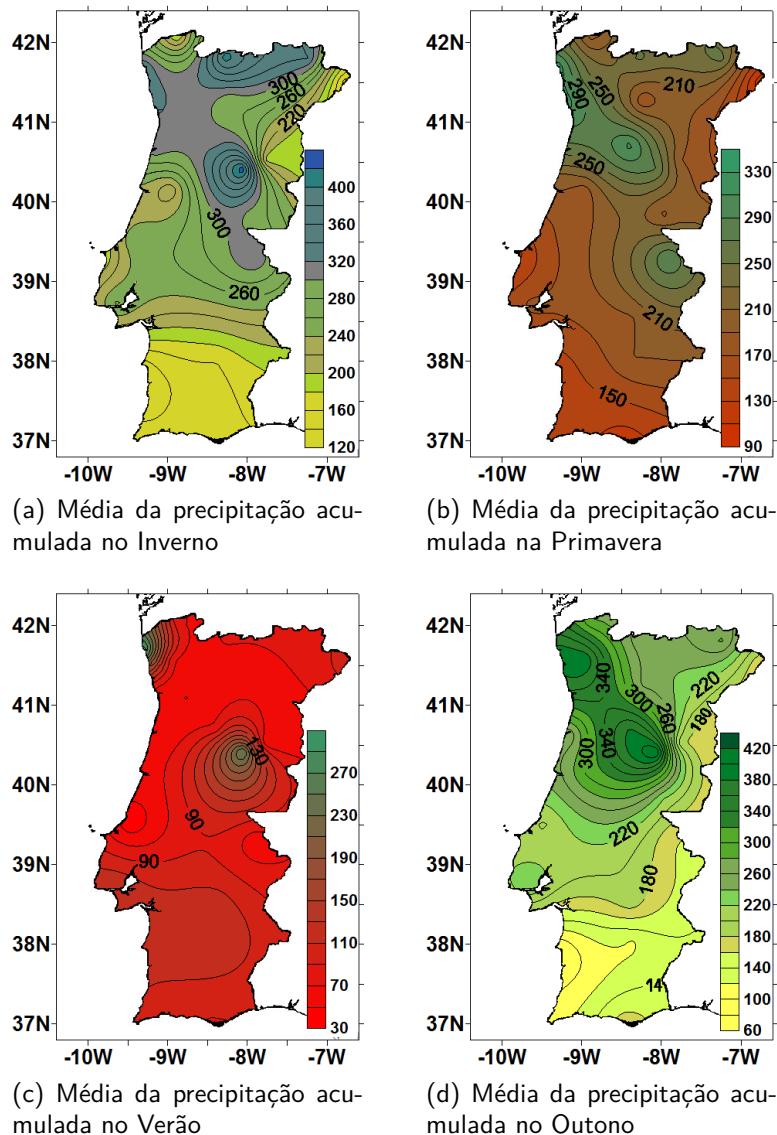


Figura 2.8: Média da precipitação sazonal acumulada (mm): média de Inverno, média da Primavera, média de Verão e média de Outono. Dados de observações no período 2000-2010.

o dia, sendo frequentes as noites calmas. De um modo geral, o vento intensifica-se pouco depois da alvorada, alcançando o máximo da sua intensidade após o meio-dia solar, decrescendo até ao final da tarde, registando-se, com frequência, flutuações de intensidade no final da tarde com o pôr-do-sol. Na figura 2.9 ilustram-se, respectivamente, as isotacas correspondentes aos valores da intensidade média e máxima do vento sazonal de Verão no período de 2000-2010 em m/s, sendo possível discernir que os valores médios oscilam entre 1,6 a 5,6 m/s e os máximos entre 6 e 12 m/s, com grandes flutuações, com máximos consideráveis nas regiões costeiras abaixo dos 39º de latitude.

No que concerne ao rumo do vento, pode referir-se, segundo Prior (2006), ao citar o

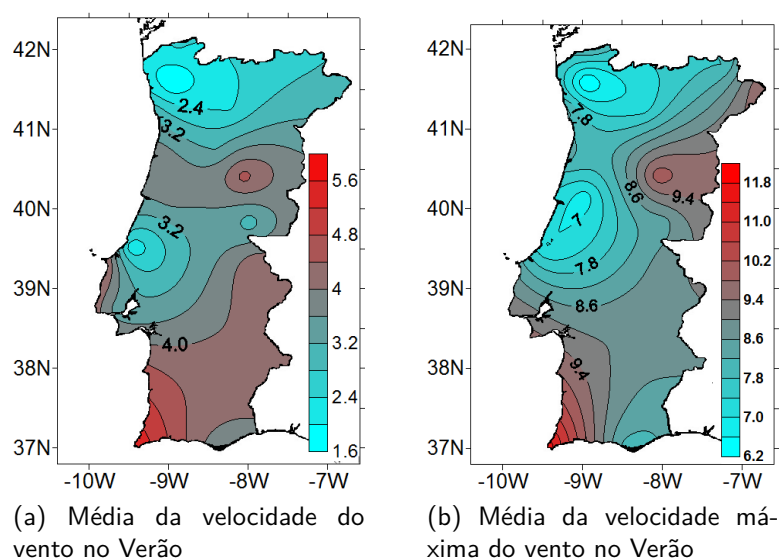


Figura 2.9: Intensidade média e máxima do vento (m/s), no Verão. Dados de observações no período 2000-2010.

Atlas Climatológico de Portugal Continental, que em Portugal predominam os ventos do quadrante Norte, abarcando as direcções Noroeste (NW) e Nordeste (NE), sobretudo na região costeira ocidental. Já no interior, tanto a Norte, pelas influências da orografia, como a Sul, verifica-se a ocorrência de ventos predominantemente de Oeste, desde Sudoeste (SW) a Sudeste (SE), muito embora seja possível considerar a ocorrência de ventos de Nordeste em determinadas zonas, sobretudo ao longo de vales de rios orientados nessa direcção. Já na região a Sul, junto à costa algarvia, o vento é oriundo predominantemente de Sudoeste.

2.3 A Floresta em Portugal

A actual expressividade da floresta em Portugal é resultado de uma intensa e continuada intervenção humana (vincada pelos fogos, pelo pastoreio e pelo corte), tendo como coadjuvante as condições do clima (de influência mediterrânica) e dos solos que ocupa.

A floresta portuguesa ocupa uma fracção muito significativa do território nacional, estendendo-se por cerca de 3,4 milhões de hectares (AFN, 2010), o que corresponde a, aproximadamente, 38% da área de Portugal Continental, sendo este espaço, na sua maioria, pertencente a privados. A figura 2.10 representa a distribuição das classes de cobertura de solo em Portugal Continental, segundo os dados Corine Land Cover, na edição de 2006.

O sector florestal português desempenha um papel importante no contexto da economia nacional, quer através da produção lenhosa (pinheiro-bravo, eucalipto, etc.), não lenhosa (resina, cortiça, papel) e de produtos derivados da floresta (mel, frutos silvestres, castanha, pinhão, etc.), quer pela empregabilidade que a floresta e as actividades correlacionadas

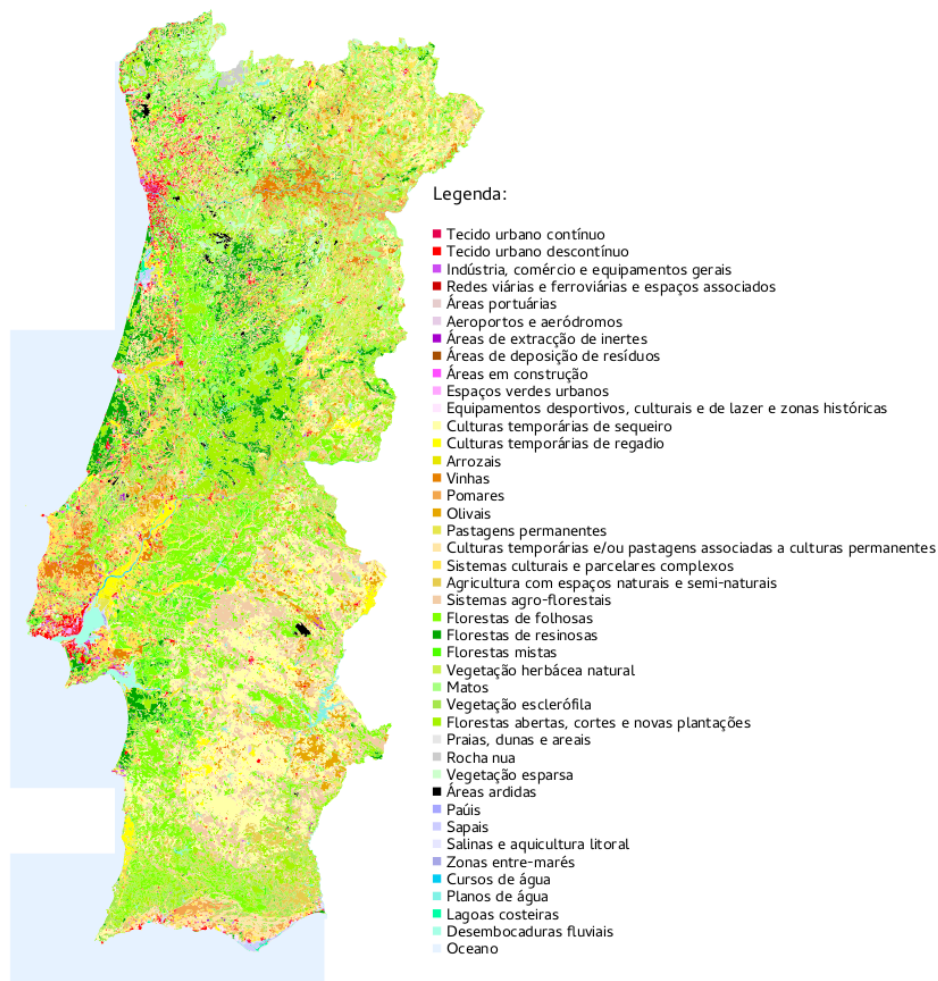


Figura 2.10: Mapa de caracterização do uso e ocupação do solo em 2006 para Portugal Continental, segundo o projecto Corine Land Cover. Fonte dos dados: Instituto Geográfico Português.

geram.

Em Portugal Continental, é considerada (Correia et al., 2009) a existência de três espécies que ocupam a maior parte da área florestal:

- pinheiro bravo (*Pinus pinaster*), distribuído ao longo da faixa litoral que abarca desde as bacias do Tejo e Sado até ao rio Minho, estendendo-se para o interior nas regiões norte e centro do país. Apesar de, num passado não muito distante, o pinheiro bravo ter sido a espécie mais representativa no território português, a área que ocupa tem vindo, desde a década de oitenta do século XX, a diminuir, como resultado da ocorrência de fogos florestais. O inventário florestal nacional, na edição de 2010 (AFN, 2010), estima que no período compreendido entre 1995 e 2005, a área ocupada

por pinheiro bravo foi reduzida em cerca de 9%, tendência decrescente confirmada pelos resultados preliminares do 6º inventário florestal nacional, que apontam para uma forte redução, de cerca de 13%, da área ocupada por pinheiro bravo, no período 1995-2010.

- eucalipto (*Eucalyptus globulus*), uma espécie não autóctone⁴ introduzida em Portugal no século XIX, e que, apesar dos impactos ambientais que traz para o território nacional, é explorada avidamente pela indústria papeleira. O eucalipto distribui-se geograficamente ao longo de quase todo o território português, com particular destaque na faixa litoral ocidental e predominância na região centro. Os resultados preliminares da 6ª edição do inventário florestal nacional revelam um crescimento, para o período de 1995-2010, da área de eucalipto em cerca de 16%, tornando-se, assim, a espécie que maior área da floresta portuguesa ocupa, em detrimento do pinheiro bravo.
- sobreiro (*Quercus suber*), uma das espécies primitivas da floresta portuguesa, mais característico da paisagem a sul do rio Tejo, que pode encontrar-se integrando dois tipos de sistemas florestais: o sobreiral e o montado. O primeiro é caracterizado pela existência de um elevado número de sobreiros, com a presença de um estrato arbustivo muito desenvolvido, ao passo que o segundo constitui um sistema cultural mantido pela acção do homem através de pastoreio ou controlo da vegetação espontânea, composto sobretudo por comunidades vegetais de herbáceas em associação com azinheiras, dispersas.

Muito embora as três espécies enunciadas sejam as mais representativas em termos de área de ocupação, a diversidade de espécies é grande, podendo ainda encontrar-se pinheiro manso (*Pinus pinea*), Azinheira (*Quercus ilex*) e Castanheiro (*Castanea sativa*), entre outras. O Inventário Florestal Nacional, na sua quarta edição, providenciou dados que permitem apreciar, de forma expedita, a distribuição geográfica das espécies que povoam a área florestal portuguesa, à data do estudo, conforme ilustrado na figura 2.11.

A floresta portuguesa assim constituída, que muito se distancia da *laurisilva* existente antes da última glaciação e da *fagosilva*, que, naturalmente lhe sucedeu, tem uma história relativamente recente (Correia et al., 2009). Não obstante, o estudo da distribuição espacial da floresta em Portugal, bem como a sua caracterização, assumem, ao longo dos tempos, uma dimensão de problemáticas diversas. No Portugal oitocentista, o território constituía, de um modo geral, um problema envolto em incertezas de várias índoles, facto

⁴Em Portugal, a extensão de eucalipto que se observa é resultado de acção antrópica e não de dispersão natural. Discute-se actualmente que a espécie, em Portugal, possa ser considerada como invasora, tal como acontece, por exemplo, em Espanha e noutras regiões de clima Mediterrânico (Gassó et al., 2010).

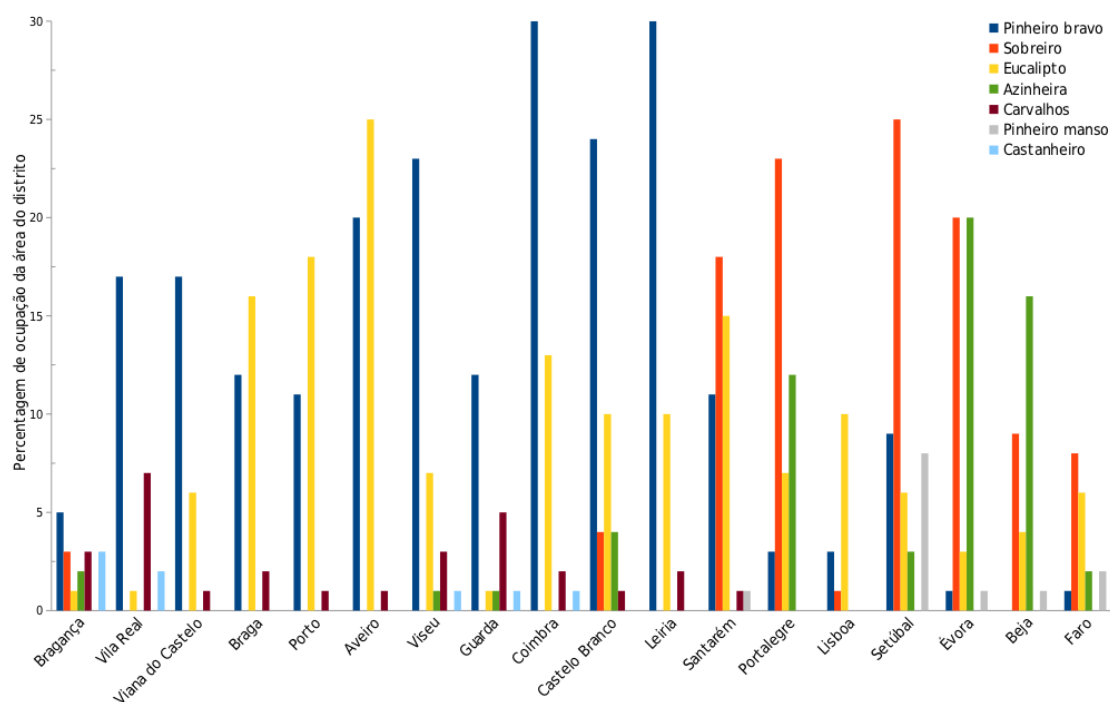


Figura 2.11: Distribuição distrital das espécies de árvores existentes nas florestas portuguesas. Fonte dos dados: *software* Areastat, do ICNF.

extensível à floresta, quer no que respeita à quantificação da área florestal nacional, quer no que concerne à sua distribuição espacial. O reconhecimento das limitações inerentes à cartografia do território permitiu que fossem encetadas algumas iniciativas com vista à aquisição de conhecimento sobre a área e a localização de espaços florestais. Surge assim, em 1868, a primeira estimativa de 100000 hectares para a superfície florestal (Radich e Alves, 2000). A transição de um Portugal praticamente desarborizado, em finais do século XIX, em virtude dos imperativos relacionados com a expansão marítima, até ao século XVII, a construção da ferrovia, em meados do século XIX, entre outras razões, para uma mancha florestal ocupando cerca de um terço do país, demorou cerca de um século (Pereira et al., 2009), impulsionada pelo reconhecimento das potencialidades de expansão da área florestal na Carta Agrícola e Florestal, que constitui a primeira fonte, de uma precisão notável para a época, de dados sobre áreas agrícolas, florestais e incultas do território nacional (Radich e Alves, 2000). Algumas das medidas encetadas no decurso dos séculos XIX e XX, com particular destaque para o Plano de Povoamento Florestal, a Lei n.º 2069, de 1954, o Fundo de Fomento Florestal de 1963, o Projecto Florestal Português, o Programa de Desenvolvimento Florestal, entre outros, marcam a intervenção do Estado Português sobre a floresta portuguesa, até à integração do país na União Europeia, transferindo-se,

progressivamente, para a gestão privada, que detém mais de 90% da propriedade da floresta portuguesa, as responsabilidades decorrentes da elaboração, apresentação e execução dos projectos de arborização (Radich e Baptista, 2005).

2.4 Incêndios florestais em Portugal

As características climáticas do nosso país tornam-no extremamente susceptível à ocorrência de fogos florestais, sendo Portugal um país do sul da Europa mais afectado pela ocorrência de incêndios. Os dados oficiais do Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas ⁵ permitem uma apreciação da variação temporal do número de incêndios e da área ardida, desde 1980, conforme se ilustra na figura 2.12.

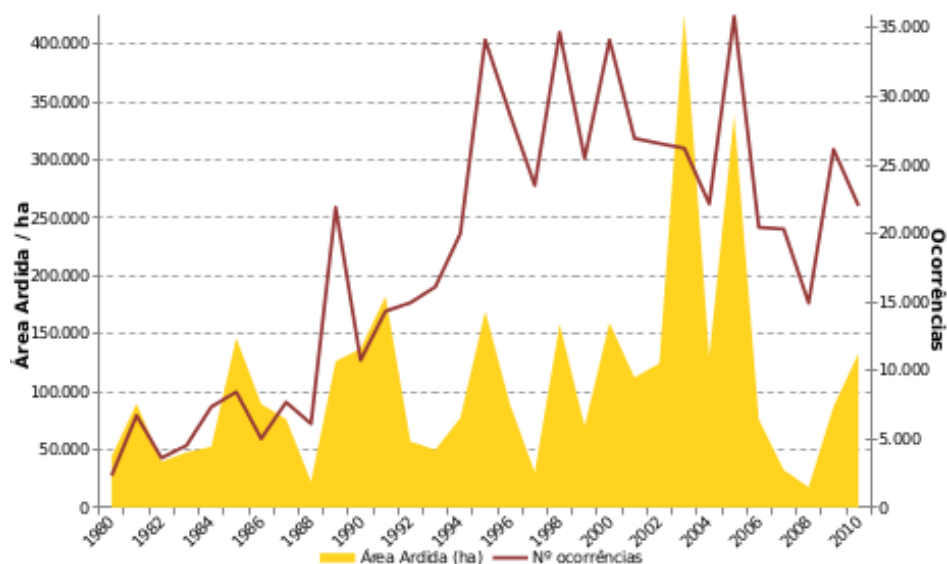


Figura 2.12: Evolução temporal do número de ocorrências de fogos florestais e da respectiva área ardida em Portugal, entre 1980 e 2010. Fonte dos dados: AFN2011/SGIF.

Uma análise cuidada às representações gráficas da figura 2.12 permite observar, em primeiro lugar, uma tendência crescente no que concerne ao número de ocorrências de incêndios até 2006; por outro lado, em 2003, a área ardida sofreu um aumento substancial, decrescendo progressivamente a partir de 2005, até 2008, ano em que se verifica nova inflexão, para uma tendência de aumento da área ardida. Não obstante, deve notar-se, em consonância com Pereira et al. (2011), que o conjunto de dados oficiais do ICNF padece de algumas inconsistências, relativas, em primeiro lugar, à variação do valor mensurável mínimo de área ardida ao longo de diferentes épocas, isto é, de 1980 a 1990 a área ardida mínima mensurável era de 0,1 ha, de 1991 a 1992, 0,01 ha e de 1992 a 2005 a área ardida

⁵Disponíveis online em <http://www.icnf.pt/portal/florestas/dfci/inc/estatisticas>.

mínima mensurável era de 0,001 ha. Deste modo, a tendência crescente no número de fogos no gráfico 2.12 constitui uma consequência do diferente sistema/processo de recolha de dados ao longo do período de cobertura da base de dados. Por outro lado, e ainda que os anos com maiores áreas ardidas sejam também, geralmente, anos com elevado número de ocorrências, não é possível estabelecer uma relação directa entre o número de incêndios e respectiva área ardida.

No que toca aos extremos, há que salientar os dois anos mais severos, quer em termos de número de incêndios, quer no que respeita à área ardida. Assim, em 2003, os valores de ocorrências e área ardida foram, respectivamente, de 26195 e 425000 ha. Este ano foi caracterizado pela influência de uma onda de calor⁶ excepcional (Trigo et al., 2006), tanto em termos de intensidade como de duração, factor que se crê ser preponderante para os registos mencionados. Já no ano de 2005 foram registados valores anormalmente baixos de precipitação, tendo sido declarado o estado de seca extrema. Também por essa razão, foram registadas 35212 ocorrências de incêndio, perfazendo um total de 325000 ha de área ardida.

Analisando a base de dados de ocorrências e áreas ardidas do ICNF, as zonas do país onde se verificam maiores incidências de incêndio e as maiores áreas ardidas, as figuras 2.13 e 2.14 pretendem exibir a variabilidade espaço-temporal da área ardida distrital, comparativamente com a área de cada distrito e do número de ocorrências por distrito. Pode imediatamente constatar-se que o Tejo marca uma dicotomia importante no que diz respeito aos distritos de incidência de fogos florestais: verifica-se uma maior quantidade de ocorrências e maior quantidade de área ardida acima da linha delimitada pelo curso do rio, a par com alguma expressividade na região do Algarve, mais especificamente nos anos de 2006, 2007 e 2009, com o registo de 726, 621 e 601 ocorrências, respectivamente.

Assim, no que ao número de ocorrências diz respeito, para o período compreendido entre 2001 e 2010, pode verificar-se na figura 2.13 que a maior ocorrência de fogos florestais ocorreu, no período em análise, nalguns distritos do litoral do país, em particular Braga, Porto, Aveiro e Lisboa, e também do interior norte, nomeadamente Vila Real, Viseu e Guarda. O permanentemente elevado número de ocorrências nestes distritos pode dever-se à maior densidade populacional e, também, tendo em conta a expansão do edificado sobre a floresta, de extensas zonas de interface urbano-florestal.

Em termos de área ardida, pode inferir-se que, de um modo geral, só nos distritos de Setúbal, Évora e Beja não se verificam grandes percentagens de área ardida. Assim, os

⁶De acordo com Organização Meteorológica Mundial (OMM) ocorre uma onda de calor quando, numa sequência de, pelo menos, seis dias consecutivos, a temperatura máxima diária é superior em 5°C ao valor médio diário das temperaturas máximas do período de referência, constituído pela normal climatológica. Por outro lado, constitui a normal climatológica, o apuramento estatístico valores médios dos vários elementos climáticos, em períodos de 30 anos que começam no primeiro ano de cada década, constituindo, nomeadamente as normais de 1931-1960 e 1961-1990 as normais de referência.

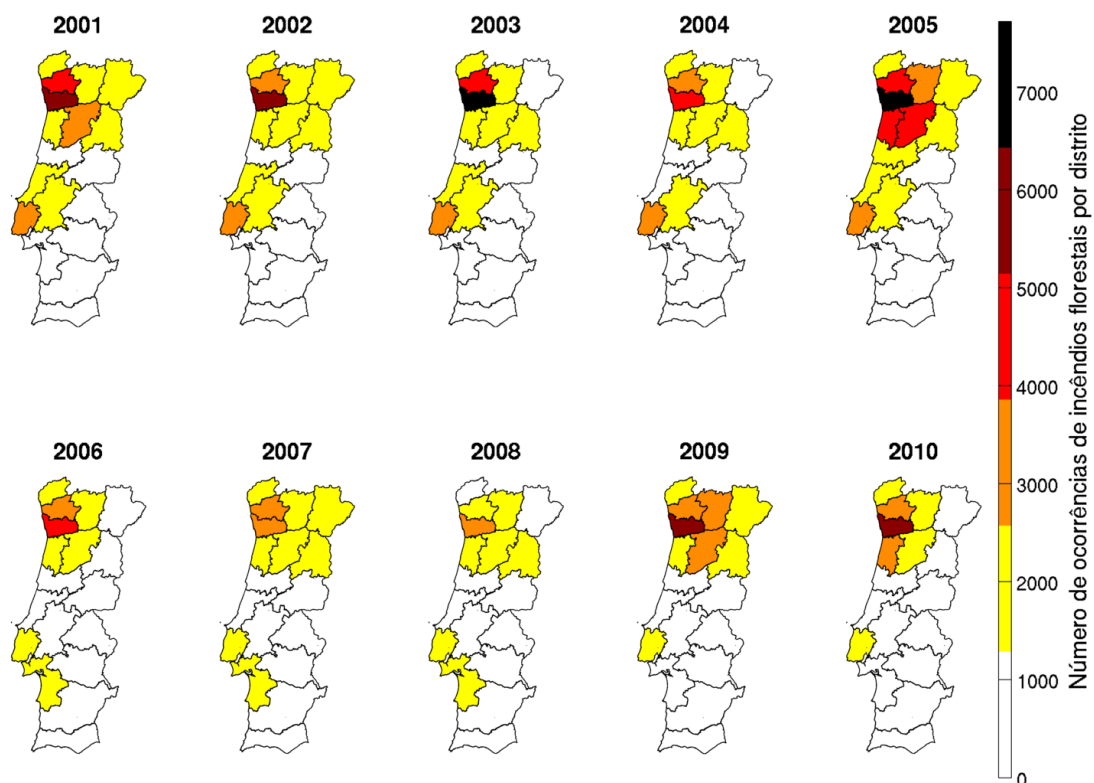


Figura 2.13: Evolução temporal do número de ocorrências de incêndios em Portugal, entre 2001 e 2010. Fonte dos dados: AFN2011/SGIF.

distritos de Viseu, Guarda, Vila Real e Castelo Branco, mas também Leiria, Coimbra e Santarém, a par com Braga e Porto, viram grandes áreas lavradas pelo fogo. Uma das razões apresentadas para a grande área consumida pelos incêndios prende-se com a existência de maiores áreas florestais em certos distritos (caso do distritos de Viseu, Guarda, Leiria, Coimbra, Castelo Branco e Santarém), não descurando, também, as características intrínsecas do terreno, de relevo mais acentuado, bem como o absentismo rural e consequente despovoamento.

No que diz respeito à expressividade da época de incêndios para os anos de 2009 e 2010, que assumem particular importância neste estudo, pode referir-se que o ano de 2009 se destacou pela inversão da tendência decrescente no número de ocorrências e áreas ardidas que se vinha registando desde 2006, conforme se pode apreciar na figura 2.12.

Sob o ponto de vista meteorológico, o ano de 2009 destacou-se por ter sido considerado o ano com a Primavera mais seca desde 1931 (Março a Maio). Deste facto resultou uma assinalável concentração de área ardida no mês de Março. Nesse ano, foi reportada a ocorrência de quatro ondas de calor (27 Maio a 3 Junho, 10 a 22 de Junho, 11 a 19 e 29 a 31 de Agosto). As temperaturas de Agosto apresentaram anomalias positivas de 0,3 ºC de

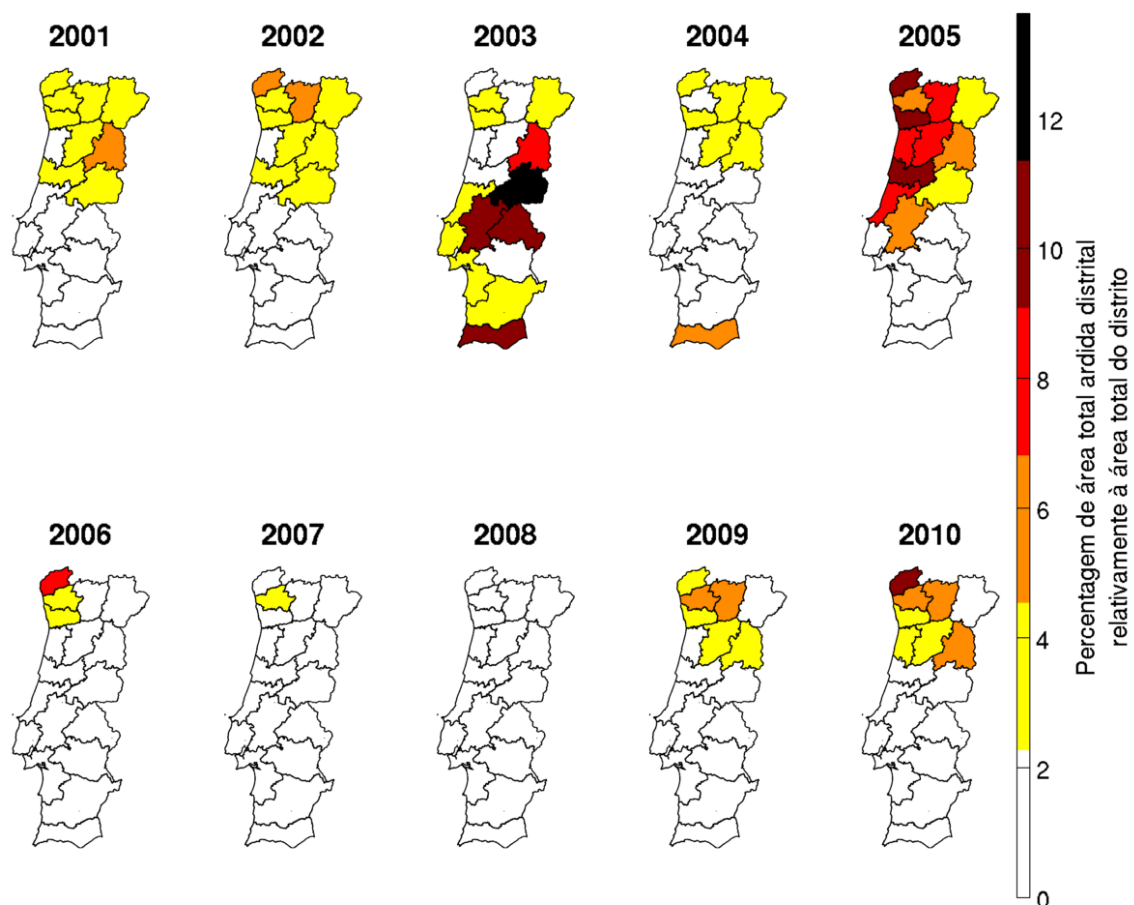


Figura 2.14: Percentagem de área total ardida por distrito, comparativamente com a área total de cada distrito, entre 2001 e 2010. Fontes de dados: AFN2011/SGIF e IGEO.

temperatura média, o que, juntamente com a anomalia da precipitação verificada, resultou numa situação de seca: o Continente tinha 96% do seu território em seca no final do mês de Agosto (Instituto de Meteorologia, 2009).

Conforme os dados que se podem analisar na tabela 2.1, a área ardida subiu para mais de 87416 ha, um valor cinco vezes superior ao do ano anterior (European Commission et al., 2010). O número de ocorrências de incêndio registado em 2009 foi de 26119, 78% dos quais de pequena dimensão (área ardida inferior a 1 ha).

A maioria das ocorrências de incêndio distribuíram-se temporalmente no período compreendido entre Julho e Setembro (58%), contabilizando cerca de 72% da área ardida total, ao passo que entre Janeiro e Junho se registaram 34% das ocorrências, que contribuíram em 23% para a área total ardida.

As zonas norte e centro do país foram as mais afectadas pela ocorrência de fogos florestais, tendo estes incidido sobretudo nos distritos do Porto, Braga, Bragança, Viana do Castelo, Viseu, Aveiro e Guarda, cuja contribuição para o total nacional de área ardida

Mês	Número de Ocorrências	Área ardida total (ha)
Janeiro	31	34
Fevereiro	1169	2175
Março	3758	13648
Abril	1199	1546
Maiο	1413	1717
Junho	1282	635
Julho	2152	3811
Agosto	5135	33173
Setembro	7774	25989
Outubro	2070	4574
Novembro	89	92
Dezembro	47	22
Total	26119	87416

Tabela 2.1: Distribuição mensal das ocorrências de incêndio e área total ardida, no ano de 2009. Fonte dos dados: European Commission et al. (2010).

foi de 95%. Em 2009, foram registados 134 grandes incêndios (área ardida superior a 100 ha), dos quais resultou 63% da área ardida total. Registaram-se ainda 25 ocorrências de incêndio com área ardida superior a 500 ha, que consumiram uma área de 31859 ha. A maior ocorrência da época de incêndios de 2009 registou-se no distrito da Guarda, a 30 de Agosto, tendo originado, ao longo dos três dias de duração, uma área ardida de 7080 ha (Direcção de Unidade de Defesa da Floresta, 2009).

No ano de 2010 foi registada uma diminuição do número de ocorrências de incêndio face a 2009. Todavia, a área ardida sofreu um aumento, face aos valores de 2009 (European Commission et al., 2011), sendo de destacar a primeira metade do mês de Agosto, que foi particularmente intensa, em termos de ocorrências de incêndios. Sob o ponto de vista das condições meteorológicas do ano de 2010, há que referir que, nos meses de Julho e Agosto, a temperatura máxima do ar atingiu valores muito superiores ao valor normal 1971-2000, o que contribuiu para um Verão muito quente, sendo mesmo o segundo Verão com a temperatura máxima (30 °C) e média do ar (23 °C) mais elevadas desde 1931 (Instituto de Meteorologia, 2010b). Por outro lado, a quantidade de precipitação ocorrida nos meses de Junho a Agosto foi inferior ao valor normal (1971-2000), com uma anomalia de cerca de -25 mm, tendo o IPMA classificado o Verão como normal a seco em quase todo o território.

Em 2010, foi registada a ocorrência de 22026 incêndios, responsáveis por um total de 133090 ha de área ardida, sendo de lamentar a morte de quatro bombeiros e o ferimento de vários outros durante as operações de combate às chamas, nomeadamente nos meses

de Julho e Agosto.

Mês	Número de Ocorrências	Área ardida total (ha)
Janeiro	38	13
Fevereiro	83	91
Março	401	636
Abril	608	924
Maió	799	1092
Junho	1428	747
Julho	5107	22143
Agosto	8949	99580
Setembro	2992	4136
Outubro	1459	3625
Novembro	91	37
Dezembro	71	66
Total	22026	133090

Tabela 2.2: Distribuição mensal das ocorrências de incêndio e área total ardida, no ano de 2010. Fonte dos dados: European Commission et al. (2011).

Da análise dos dados apresentados na tabela 2.2, verifica-se que a grande maioria dos incêndios ocorreu no período compreendido entre Julho e Setembro, totalizando 77% das ocorrências, tendo sido igualmente neste período que se registou a maior parte da área ardida (95%) (European Commission et al., 2011).

A ocorrência de incêndios predominou nos distritos do Porto, Braga, Viana do Castelo, Viseu (sobretudo na região norte do distrito) e Aveiro, tornando as regiões norte e centro do país as mais atingidas pelo fogo.

No que toca à distribuição das ocorrências por dimensão dos incêndios, foram registados 186 grandes incêndios (área ardida ≥ 100 ha), correspondentes a 76% da área total ardida. Registaram-se ainda 26 incêndios de área ardida superior a 500 ha, que contribuíram em 55% para a área total ardida. O maior dos incêndios da época de 2010 ocorreu no distrito de Viseu, a 6 de Agosto, tendo consumido, ao longo dos três dias de duração, uma área de 5066 ha (Direcção de Unidade de Defesa da Floresta, 2010).

2.5 Origem e causas dos incêndios em Portugal

Em Portugal, e em consonância com o que ocorre nos demais países da bacia mediterrânica, onde se estima que mais de 90% das ocorrências se deve à intervenção do Homem

(Leone et al., 2003), também a grande maioria da ocorrência de incêndios está associada à acção humana, na forma dolosa ou negligente. O estudo de Coutinho (2009) aponta para uma divisão das causas dos incêndios em espectro nacional e de carácter regional. Como causas nacionais, são referidas as que se encontram associadas às actividades agrícola e cinegética, bem como ao pastoreio. Recorde-se, a este propósito, que têm ainda grande expressividade em Portugal as práticas tradicionalmente mediterrânicas associadas à utilização do fogo para a renovação de pastagens, para a limpeza de terrenos agrícolas, para a queima de sobrantes e para a fertilização do solo agrícola, preparando-o para novos ciclos de cultivo. Na mesma categoria, são incluídas as perturbações psicológicas, os conflitos entre vizinhos e outras querelas. Como perturbações psicológicas aponta-se a piromania, aliada, de forma directa ou indirecta, à demência; a provocação dos meios de combate, resultado do fascínio pelo fogo e pelo aparato associado ao seu combate, indicia, de certa forma, perturbações de índole psicológica, assim como, embora numa escala mais alargada, o vandalismo se associa a distúrbios emocionais/psicológicos, a par com a dependência de álcool e drogas.

Num estudo que abarca uma extensão temporal apreciável, Lourenço et al. (2012) efectuaram uma análise exaustiva, à escala nacional, das causas associadas aos incêndios florestais, no período compreendido entre 1996 e 2010, a partir da base de dados da extinta Autoridade Florestal Nacional. Da análise efectuada, foi possível aos autores concluir que, em Portugal, as fontes de ignição associadas aos incêndios florestais são quase exclusivamente de origem humana, quer seja de forma consciente e deliberada, quer por negligência.

2.6 Enquadramento legal

Em Portugal, o Decreto-Lei n.º 124/2006, de 28 de Junho, com as alterações introduzidas pelo Decreto-Lei n.º 15/2009, de 14 de Janeiro, pelo Decreto-Lei n.º 17/2009, de 14 de Janeiro, e pelo Decreto-Lei n.º 114/2011, de 30 de Novembro, criou o Sistema de Defesa da Floresta contra Incêndios, que prevê o conjunto de medidas e acções de articulação institucional, de planeamento e de intervenção relativas à prevenção e protecção das florestas contra incêndios, nas vertentes da compatibilização de instrumentos de ordenamento, de sensibilização, planeamento, conservação e ordenamento do território florestal, silvicultura, infra-estruturação, vigilância, detecção, combate, rescaldo, vigilância pós-incêndio e fiscalização, a levar a cabo pelas entidades públicas com competências na defesa da floresta contra incêndios e entidades privadas com intervenção no sector florestal. São, assim, identificados três eixos centrais de acção, bem como os agentes a cargo de tais medidas. Desta forma, no eixo de prevenção estrutural, da competência da então Autoridade Florestal Nacional (AFN), actualmente Instituto de Conservação da Natureza e das

Florestas (ICNF), são incluídas todas as medidas preventivas que possam contribuir para a potencial diminuição da probabilidade de ocorrência de incêndios, como, por exemplo, acções de silvicultura preventiva, constituição de faixas de gestão de combustível, acções de sensibilização e formação, entre outras.

O ICNF é, segundo o Decreto-Lei n.º 135/2012, de 29 de Junho, resultado da fusão da Autoridade Florestal Nacional com o Instituto da Conservação da Natureza e da Biodiversidade, e da integração do Fundo Florestal Permanente, anteriormente adstrito ao Instituto de Financiamento da Agricultura e Pescas.

No segundo eixo, de vigilância, detecção e fiscalização, estão incluídos o conjunto de infraestruturas e acções que tenham como objectivo evitar a ocorrência de incêndios ou detectar a sua presença (prevenção operacional), levadas a cabo pela Guarda Nacional Republicana (GNR). O Decreto-Lei n.º 22/2006, de 2 de Fevereiro, consagra, no âmbito da GNR, o Serviço de Protecção da Natureza e do Ambiente (SEPNA) e, adicionalmente, cria o Grupo de Intervenção de Protecção e Socorro (GIPS). Já a Portaria n.º 798/2006, de 11 de Agosto, que regulamenta aquele diploma legal, dá competências à GNR, através do SEPNA, para garantir o policiamento e a fiscalização do cumprimento da legislação florestal, e coordenar e executar acções de vigilância (móvel e fixa) e detecção de incêndios florestais. Compete igualmente à GNR/SEPNA garantir a investigação das causas dos incêndios florestais, bem como apoiar o Sistema de Gestão de Informação de Incêndios Florestais (SGIF), colaborando para a actualização permanente dos dados.

À Autoridade Nacional de Protecção Civil (ANPC) cabe a responsabilidade pelo terceiro eixo, de combate, rescaldo e vigilância pós-incêndio, onde se incluem todas as infraestruturas de apoio (rede viária, corporações de bombeiros, meios aéreos e terrestres de combate a incêndios, etc.) e todas as acções que tenham como objectivo eliminar focos de incêndio. Note-se que a ANPC está incumbida, segundo o Decreto-Lei n.º 73/2013, de 31 de Maio, das actividades de planeamento, coordenação e execução da política de protecção civil, designadamente na prevenção e reacção a acidentes graves e catástrofes, de protecção e socorro de populações e de superintendência da actividade dos bombeiros, bem como de assegurar o planeamento e coordenação das necessidades nacionais na área do planeamento civil de emergência com vista a fazer face a situações de crise ou de guerra.

No que diz respeito ao uso do fogo para realização de fogueiras e queimadas, o Decreto-Lei n.º 310/2002, de 18 de Dezembro, alterado pelo Decreto-Lei n.º 204/2012, de 29 de Agosto, veio atribuir às Câmaras Municipais competência em matéria de licenciamento de actividades diversas anteriormente cometidas aos Governos Cívicos, nomeadamente a actividade de fogueiras e queimadas, estabelecendo, no seu capítulo IX, o regime jurídico do licenciamento do exercício dessa actividade. O Decreto-Lei n.º 124/2006, de 28 de Junho, por seu lado, no seu artigo 27.º, regulamenta a prática de queimadas, impondo também

a obrigatoriedade de licenciamento para a sua realização pela Câmara Municipal, ou, por delegação de competências, pela Junta de Freguesia. A Lei n.º 20/2009, de 12 de Maio, por sua vez, estabelece a transferência de atribuições para os Municípios do Continente em matéria de constituição e funcionamento dos gabinetes técnicos florestais, bem como outras no domínio da prevenção e da defesa da floresta, nomeadamente no que concerne à preparação e elaboração do quadro regulamentar respeitante ao licenciamento de queimadas e à autorização da utilização de fogo de artifício ou outros artefactos pirotécnicos. Desta forma, as actividades de uso do fogo anteriormente enunciadas, que não sejam devidamente licenciadas ou autorizadas, constituem contra-ordenação, sendo puníveis com coima, nos termos do Sistema Nacional de Defesa da Floresta contra Incêndios (artigo 38º do referido Decreto-Lei n.º 124/2006, de 28 de Junho, na sua versão mais recente) de 140 a 5000€, no caso de pessoa singular, e de 800 a 60000€, no caso de pessoas colectivas.

Já o crime de incêndio florestal está previsto no artigo 274º do Código Penal, onde se pode ler que:

1. *Quem provocar incêndio em terreno ocupado com floresta, incluindo matas, ou pastagem, mato, formações vegetais espontâneas ou em terreno agrícola, próprios ou alheios, é punido com pena de prisão de 1 a 8 anos.*
2. *Se, através da conduta referida no número anterior, o agente:*
 - a) *Criar perigo para a vida ou para a integridade física de outrem, ou para bens patrimoniais alheios de valor elevado;*
 - b) *Deixar a vítima em situação económica difícil; ou*
 - c) *Actuar com intenção de obter benefício económico;**é punido com pena de prisão de três a doze anos.*
3. *Se o perigo previsto na alínea a) do n.º 2 for criado por negligência, o agente é punido com pena de prisão de dois a dez anos.*
4. *Se a conduta prevista no n.º 1 for praticada por negligência, o agente é punido com pena de prisão até três anos ou com pena de multa.*
5. *Se a conduta prevista no número anterior for praticada por negligência grosseira ou criar perigo para a vida ou para a integridade física de outrem, ou para bens patrimoniais alheios de valor elevado, o agente é punido com pena de prisão até cinco anos.*
6. *Quem impedir o combate aos incêndios referidos nos números anteriores é punido com pena de prisão de um a oito anos.*

7. *Quem dificultar a extinção dos incêndios referidos nos números anteriores, designadamente destruindo ou tornando inutilizável o material destinado a combatê-los, é punido com pena de prisão de um a cinco anos.*
8. *Não é abrangida pelo disposto nos n.ºs 1 a 5 a realização de trabalhos e outras operações que, segundo os conhecimentos e a experiência da técnica florestal, se mostrarem indicados e forem levados a cabo, de acordo com as regras aplicáveis, por pessoa qualificada ou devidamente autorizada, para combater incêndios, prevenir, debelar ou minorar a deterioração do património florestal ou garantir a sua defesa ou conservação.*
9. *Quando qualquer dos crimes previstos nos números anteriores for cometido por inimputável, é aplicável a medida de segurança prevista no artigo 91.º, sob a forma de internamento intermitente e coincidente com os meses de maior risco de ocorrência de fogos.*

Como se constata, a moldura penal varia consoante se trate de comportamento doloso ou negligente, e, dentro deste, consoante se trate de negligência simples ou de negligência grosseira.

2.7 Meteorologia e Incêndios Florestais

Em sentido lato, pode afirmar-se que as condições meteorológicas participam em todas as fases do ciclo de vida do fenómeno que os incêndios florestais constituem (Johnson e Miyonishi, 2001; Pereira et al., 2013). A meteorologia influi, pois, no teor em humidade do combustível, na medida em que a combustibilidade e inflamabilidade do combustível fino perante uma fonte de ignição está relacionada com o seu teor de humidade. De igual modo, a **precipitação**, a **humidade relativa** e a **temperatura do ar** são variáveis que influem directamente sobre a quantidade de água presente no combustível vegetal, vivo e morto (Nolasco, 2003), paralelamente com a **intensidade do vento**, que, de forma directa influi sobre a propagação e/ou crescimento de um eventual fogo florestal, estando também relacionada com o teor de humidade dos combustíveis.

Deste modo, exploram-se, de seguida, os efeitos destas variáveis meteorológicas de forma detalhada, enfatizando os resultados sobre alguns dos principais estudos levados a cabo por diferentes equipas de investigação.

Adicionalmente, torna-se premente referir o efeito dos padrões de circulação atmosférica sobre a ocorrência de incêndios florestais, que, embora não sejam abordados na secção seguinte, foram alvo de variados estudos (Pereira et al., 2005; Trigo et al., 2006; Hoinka et al., 2009; Huang et al., 2009; Kassomenos, 2010; Rasilla et al., 2010).

2.7.1 O efeito da precipitação

Não descurando a sua elevada variabilidade temporal e espacial, a precipitação, sob a forma de chuva, é uma das variáveis, a par com a temperatura do ar, que condiciona o desenvolvimento da vegetação e, por conseguinte, a quantidade de (material) combustível. Se, por um lado, a precipitação influi imediatamente sobre o teor em água do combustível morto, pode também, por outro lado, em parceria com a humidade relativa, ser responsável *a posteriori* pelo teor em água do combustível vivo.

Vários estudos se têm vindo a debruçar sobre o efeito da precipitação. Assim, e de um modo geral, é aceite que a ocorrência de precipitação actua sobre a probabilidade de ignição e/ou a combustibilidade da vegetação.

A área total ardida em Portugal, no período de 1975 a 1992, foi relacionada com a quantidade de precipitação para períodos específicos do ano por Viegas e Viegas (1994). Os resultados do estudo demonstraram uma relação exponencial ($r^2 = 0,503$) entre a área ardida anual em Portugal e a quantidade total de precipitação registada na estação meteorológica de Coimbra, entre Maio e Setembro. Simultaneamente, os autores mostraram que a área ardida se correlaciona negativamente com a quantidade de precipitação nos finais da Primavera e início do Verão, bem como que a quantidade de precipitação no início da época de incêndios, e nomeadamente em Junho, é particularmente importante no que diz respeito à redução da área ardida.

2.7.2 O efeito da humidade relativa

Entendendo a humidade relativa como uma quantificação expedita da concentração de vapor de água numa parcela de ar, a uma dada temperatura e pressão, é importante, desde logo, reconhecer a sua influência sobre a ocorrência de incêndios florestais, não só pelo efeito desta grandeza sobre a inflamabilidade dos combustíveis vegetais vivos ou mortos, uma vez que, quanto menor for o conteúdo em água destes tecidos (higroscópicos) menor será a quantidade de energia requerida para os inflamar (Pyne, 1996), mas também pelo facto de o próprio processo de ignição ser favorecido pela maior proporção de oxigénio contida no ar de mais baixa humidade relativa.

A investigação sobre as relações entre humidade do ar e/ou dos combustíveis vegetais e os incêndios florestais é de crucial importância. Por exemplo, Benson et al. (2008) referem que as características dos combustíveis, nomeadamente o seu teor de humidade, determinam o comportamento do fogo, bem como o seu impacto na paisagem envolvente.

Viegas et al. (1992), ao utilizarem dados estatísticos de ocorrência de incêndios em zonas próximas da Lousã e medições directas do teor de humidade de dez combustíveis florestais diferentes, nessa localização, encontraram uma clara dependência entre o teor de humidade

dos combustíveis e as ocorrências de incêndios. Dimitrakopoulos e Papaioannou (2001) mediram, em condições laboratoriais, o tempo de ignição de vários combustíveis florestais tipicamente mediterrânicos com diferentes teores de humidade, desenvolvendo, assim, uma classificação dos combustíveis florestais mediterrânicos com base na sua inflamabilidade. Chuvieco et al. (2009) evidenciaram relações quantitativas entre tendências sazonais do teor em humidade dos combustíveis vivos e a ocorrência de incêndios para uma região no centro de Espanha, representativa das condições mediterrânicas.

Carvalho et al. (2008), na pesquisa de relações entre as condições meteorológicas, os componentes do sistema canadiano de perigo de incêndio e a respectiva área ardida e número de ocorrências, de 1980 a 2004, em 11 distritos de Portugal Continental, concluem, com base nos dados analisados, que, para as condições meteorológicas típicas de Portugal Continental, os melhores predictores do logaritmo da área ardida incluem a humidade relativa.

2.7.3 O efeito da temperatura do ar

A temperatura do ar é consequência da transferência da energia sob a forma de radiação do Sol para as camadas da atmosfera mais próximas da superfície terrestre, exibindo uma grande variabilidade no espaço e no tempo. Nos diferentes factores que determinam a temperatura do ar podem incluir-se factores relacionados com a latitude, altitude, correntes oceânicas, continentalidade/oceanidade, massas de ar e frentes, a par com outros, mais directamente relacionados com o relevo, como sejam a configuração e exposição do terreno, e ainda factores mais directamente relacionados com a cobertura do terreno.

A temperatura do ar, e as suas variações no espaço e no tempo, estabelecem intrincadas relações com as demais variáveis meteorológicas, bem como o desenvolvimento do combustível vegetal. Ainda que, de um modo geral, se possa afirmar que o ciclo de desenvolvimento da vegetação é conduzido maioritariamente pela temperatura (relacionada, naturalmente, com a duração da insolação), não descartando a disponibilidade de água, há que reconhecer que, por exemplo, o gradiente térmico vertical na troposfera de, em média, 6 °C/km, apesar de favorecer o aumento da humidade relativa, pode afectar positiva ou negativamente o desenvolvimento do coberto vegetal. Por outro lado, as variações diurnas da temperatura do ar podem aumentar ou diminuir o hiato energético relacionado com a energia de activação inerente ao processo de inflamabilidade do combustível vegetal. A vegetação é, outrossim, uma componente de regulação da temperatura, dado o seu comportamento face à absorção da radiação solar para os fluxos energéticos envolvidos nos processos biológicos de fotossíntese e evapotranspiração.

2.7.4 O efeito do vento

O vento, enquanto variável meteorológica, apresenta peculiaridades que o distinguem das demais variáveis analisadas. Por um lado, dada a sua natureza vectorial, só fica completamente caracterizado pela especificação da sua intensidade (intensidade do vector velocidade do vento), para além da sua direcção e o nível (ou altitude) a que uma dada medição se refere, já que, de forma geral, a intensidade do vento tende a aumentar com a altura em relação à superfície terrestre, na camada limite planetária. Por outro lado, também a rugosidade do terreno, ao oferecer maior atrito ao escoamento atmosférico, deve ser tida em consideração, como variável que influencia a intensidade do vento.

No que respeita ao efeito do vento sobre o comportamento de incêndios florestais, há que reconhecer, de imediato, que o vento desempenha um papel importante na celeridade de progressão do fogo. Neste sentido, Viegas (1997) deixou claro que o vento, a par com a topografia, constitui um factor de extrema importância na propagação de incêndios superficiais, bem como na transição destes para incêndios de copa. O vento potencia o incremento da intensidade da reacção de combustão, na medida em que provê maiores quantidades de oxigénio. De igual forma, o vento pode contribuir para o aumento do alcance do material incandescente que ascende pelo vértice da coluna de convexão, podendo estar na origem de focos secundários de incêndio.

Por último, há que considerar que, para além da evidência que coloca o vento e a topografia do terreno como responsáveis directos pelo comportamento do fogo, também outros efeitos do vento sobre o combustível vegetal devem ser relevados. Assim, deve identificar-se o efeito do vento na seca dos combustíveis vegetais, tendo em conta a sua contribuição para o aumento da transpiração das plantas, por decréscimo da humidade relativa do ar.

2.8 Índices de Risco e Perigo de Incêndio

Os sistemas de indexação do perigo de incêndio têm sido historicamente utilizados como uma importante ferramenta endereçada a uma vasta gama de problemas relacionados com a potencial ocorrência de incêndios florestais, sua propagação e dificuldade de supressão. Não obstante, os conceitos de risco e perigo de incêndio, longe de serem equivalentes, abundam na literatura, devendo, por isso, ser clarificados no contexto desta secção.

O *European Glossary for wildfires and forest fires* (EUFOFINET, 2012), um dos resultados do projecto *INTERREG IVC European Forest Fire Networks Project (EUFOFINET)*, define **risco de incêndio**, *fire risk*, como a probabilidade de ocorrência de um incêndio e o seu potencial impacto numa localização e instante particulares, sendo calculado a partir do produto entre a probabilidade de ocorrência e o potencial impacto. Já o **perigo de incên-**

dio, *fire danger*, é definido como um termo genérico utilizado para exprimir a avaliação dos factores fixos e variáveis do ambiente do fogo, que determinam a facilidade de ignição, taxa de alastramento, dificuldade de controlo e impacto do fogo, sendo expresso comumente por intermédio de um índice. No contexto da definição anteriormente enunciada, o **ambiente do fogo**, *fire environment*, é definido como as condições envolventes, influências e forças modificadoras de topografia, combustível e tempo meteorológico que determinam o comportamento do fogo, seus efeitos e impacto.

Outro termo encontrado amiúde na literatura é o de **vulnerabilidade ou susceptibilidade aos incêndios**, *fire hazard*. Entende-se por susceptibilidade (ou vulnerabilidade) aos incêndios quaisquer situações, processos materiais ou condições que possam causar um incêndio florestal ou que possam prover uma fonte de combustível imediata para aumentar a propagação ou intensidade de um incêndio florestal, constituindo, assim, uma ameaça à vida, propriedade ou ambiente.

Deste modo, os termos **risco de incêndio** e **perigo de incêndio** são utilizados, neste estudo, com os significados anteriormente expostos. Assim, os sistemas de indexação do perigo de incêndio, ao incidirem sobre factores quantificáveis que contribuem para o perigo de incêndio, nomeadamente as condições meteorológicas, teor de humidade dos combustíveis e efeitos de seca, têm vindo a constituir uma ferramenta de inquestionável valor para as operações de prevenção e combate aos fogos florestais.

2.9 O sistema *Fire Weather Index* (FWI) Canadiano

O sistema *Fire Weather Index* (FWI) canadiano (van Wagner, 1987) faz parte integrante de um conjunto de sistemas que, na sua globalidade, constituem o *Canadian Forest Fire Danger Rating System* (CFFDRS), desenvolvido para uso operacional no Canadá na década de sessenta do século XX (Amiro et al., 2004; Lawson et al., 2008; Wotton, 2008). O CFFDRS congrega em si o resultado de intensa investigação na área, cujas origens remontam ao início do século XX, e constitui actualmente um suporte para a tomada de decisões e mobilização de recursos na prevenção e combate aos incêndios florestais no Canadá, tendo sido utilizado em inúmeros países (Mölders, 2008; Cane et al., 2008; Dowdy et al., 2010; Tian et al., 2011; Mestre e Manta, 2014), entre os quais Portugal (Viegas et al., 1999, 2004).

A Comissão Europeia recomendou, em 1995, que os países comunitários adoptassem o Sistema FWI canadiano para a previsão do perigo de incêndio, sob a justificação de uniformização de procedimentos, com vista a possibilitar o reconhecimento e interpretação dos índices obtidos por um sistema de indexação do perigo de incêndio comum no espaço comunitário. A mesma decisão foi tomada pela rede European Forest Fire Information

System (EFFIS) que, a partir de 2007, adoptou o sistema FWI canadano para exprimir o perigo de incêndio sobre a Europa.

Em Portugal, a disponibilização do mapeamento do risco de incêndio, baseado na implementação do sistema FWI canadano, por parte do ex-Instituto de Meteorologia (IM), actual Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), passou por diferentes etapas (Instituto de Meteorologia, 2010a).

A partir de 1998, o FWI passou a ser disponibilizado de acordo com uma escala de risco de incêndios ao nível Distrital, dividida em cinco classes de risco (Baixo, Moderado, Alto, Muito Alto e Extremo), baseadas no histórico distrital de incêndios florestais. A mesma metodologia foi aplicada, a partir de 2005, numa escala ao nível dos concelhos, expandindo, igualmente, a rede de estações meteorológicas com a qual se procedia ao cálculo do FWI. A partir de 2006, o FWI passou a ser combinado com a carta de risco conjuntural, de cinco níveis, desenvolvida pelo ISA (Instituto Superior de Agronomia) e fornecida anualmente pela AFN (Autoridade Florestal Nacional), passando o resultado a designar-se por Risco Conjuntural e Meteorológico (RCM). Embora o método tenha sido reestruturado, o número de classes de risco de incêndio manteve-se em cinco, porém, com diferente designação: Reduzido, Moderado, Elevado, Muito Elevado e Máximo. As classes de risco de incêndio observado e previsto, por concelho, são divulgadas diariamente ao público no sítio da internet do IPMA e directamente para a ex-Autoridade Florestal Nacional (AFN), actual Instituto de Conservação da Natureza e Florestas, e para a Autoridade Nacional de Protecção Civil (ANPC), sendo disponibilizados mapas e valores de FWI e de RCM, obtidos numa grelha de 1 km x 1 km.

A partir de 2004, foi desenvolvido o Índice Combinado de Risco de Incêndio (ICRIF), que passou a ser divulgado desde então. A formulação deste índice resulta na combinação do FWI com alguns parâmetros relativos ao tipo e condições do coberto vegetal, tendo em conta:

- O índice RCM derivado do sistema FWI canadano, na mesma projecção das imagens NOAA em uso no IPMA;
- Um índice estrutural, calculado pela associação de um risco ao tipo de coberto vegetal, obtido a partir da base de dados CORINE, actualizada anualmente;
- Um índice que representa um factor de agravamento do risco, relacionado com o valor do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), calculado a partir de imagens NOAA-AVHRR.

O ICRIF, assim desenvolvido, procura contabilizar num único índice, o estado de tempo bem como o tipo e estado do combustível, segundo três classes de risco: elevado (ICRIF >

25), muito elevado (ICRIF > 35) e extremo (ICRIF > 45). O mapa do ICRIF é distribuído diariamente, juntamente com informação relativa ao valor máximo deste índice em cada distrito e concelho, e a distribuição percentual de valores que excedem, em cada distrito, os patamares seleccionados, apresentando assim uma visão da área de risco global em cada distrito. Adicionalmente, é mantido o cálculo e disponibilização pelo IPMA, dos prognósticos do FWI e do RCM para 24 e 48 horas. Os produtos do índice previsto são concebidos de forma similar aos observados, sendo, porém, baseados nos parâmetros meteorológicos previstos pelo modelo numérico de previsão de área limitada ALADIN, com período de integração até às 72 horas, numa área geográfica delimitada pelos paralelos 47º N e 28º N e pelos meridianos 37º W e 0º W, com 46 níveis verticais e resolução horizontal de 9 km.

O sistema FWI (van Wagner, 1987; van Wagner e Pickett, 1987) foi desenvolvido conjugando estruturas teóricas apoiadas pela observação empírica de um grande número de incêndios de teste, de forma a constituir um meio de avaliação objectiva da susceptibilidade das florestas canadianas ao fogo, levando em consideração as condições meteorológicas, num modelo de floresta standardizado. Assim, tal como representado na figura 2.15, o sistema FWI é constituído por diversos componentes, que providenciam informações, traduzidas em índices numéricos, do teor de humidade do combustível e do comportamento do fogo.

Deste modo, o sistema FWI assenta em medições diárias (usualmente obtidas às 12 UTC) da temperatura do ar e da humidade relativa à superfície (segundo as normas da OMM, aos 2 m de altura), intensidade do vento aos 10 m de altura e precipitação acumulada em 24 horas. Na sua globalidade, o sistema FWI é do tipo cumulativo, isto é, os vários sub-índices reflectem não só as condições observadas num único dia, como também a sua evolução temporal ao longo do período de cálculo. Conforme se pode observar na figura 2.15, o sistema FWI é constituído por seis componentes. Os três primeiros referem-se ao teor de humidade dos combustíveis finos mortos, dos combustíveis que constituem a camada orgânica existente no solo e do próprio solo. Por sua vez, os demais sub-índices referem-se ao comportamento do fogo, nomeadamente no que diz respeito à taxa de alastramento, combustível consumido e intensidade do fogo. O código utilizado para o cálculo dos diferentes componentes do sistema FWI é representado, para observações pontuais, no anexo A.

O índice *Fine Fuel Moisture Code* (FFMC) pretende traduzir o teor de humidade dos combustíveis mortos e da folhada, representando, pois, a inflamabilidade desses combustíveis. Por outro lado, o *Duff Moisture Code* (DMC), ou índice de humidade da camada orgânica da manta morta reflecte o teor de humidade do húmus e materiais lenhosos. O índice de seca, *Drought Code* (DC) representa o teor de humidade de combustíveis pre-

2.9 O sistema Fire Weather Index (FWI) Canadiano

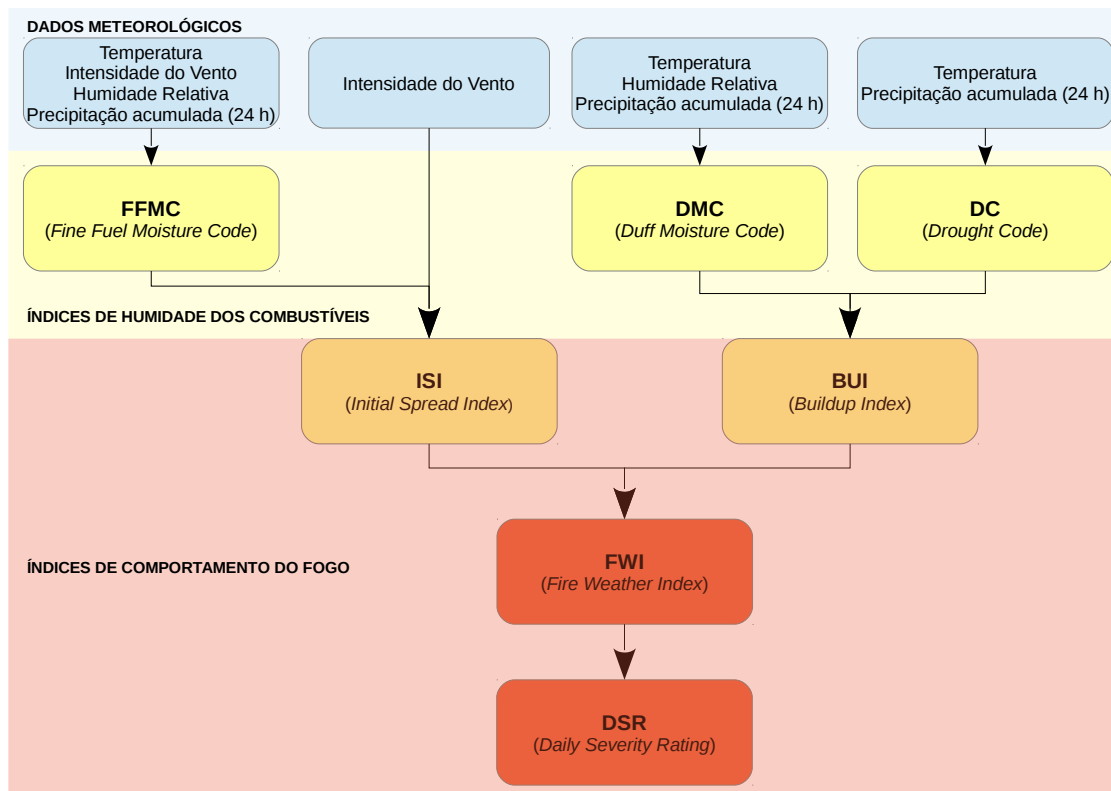


Figura 2.15: Diagrama esquemático dos diversos componentes do sistema FWI. Adaptado de van Wagner (1987).

sentas em camadas mais profundas do solo. Estas camadas não interagem directamente com a atmosfera, mas simplesmente absorvem humidade através da precipitação. Por esse motivo, considera-se que este índice, tal como outros similares (como o índice de Palmer ou o índice de seca de Keetch-Byram), representa o stress hídrico do solo.

O índice FFMC é calculado assumindo que o índice FFMC dos dias anteriores, F_0 , é levado em consideração para o cálculo do índice para o dia corrente, F . Assim, o teor de humidade do combustível fino dos dias anteriores, m_0 , é calculado a partir de:

$$m_0 = 147,2 \frac{(101 - F_0)}{(59,5 + F_0)} \quad (2.1)$$

O teor de humidade do combustível fino após precipitação, m_r , é calculado tendo em conta a quantidade de precipitação. Assim, a precipitação efectiva, r_f , é determinada primeiramente, subtraindo 0,5 à precipitação acumulada em 24 horas, no caso de esta ser superior a 0,5 mm. Caso contrário, é utilizado o valor (inferior a 0,5 mm) de precipitação acumulada em 24 horas. Posteriormente, m_r é calculado de acordo com as seguintes

condições:

$$\begin{cases} \text{Se } m_0 \leq 150, m_r = m_0 + 42,5r_f \left(e^{-100(251-m_0)} \right) \left(1 - e^{-6,93/r_f} \right) \\ \text{Se } m_0 > 150, m_r = m_0 + 42,5r_f \left(e^{-100(251-m_0)} \right) \left(1 - e^{-6,93/r_f} \right) \\ \quad + 0,0015(m_0 - 150)^2 \sqrt{r_f} \\ \text{Se } m_0 > 250, m_r = 250 \end{cases} \quad (2.2)$$

Seguidamente, o valor de m_r toma o valor de m_0 , tal que $m_r = m_0$. O teor de humidade dos combustíveis finos após drenagem, E_d , é calculado a partir da humidade relativa, H , e da temperatura, T , tendo em conta a expressão:

$$E_d = 0,942H^{0,679} + 11e^{(H-100)/10} + 0,18(21,1 - T) \left(1 - e^{-0,115H} \right) \quad (2.3)$$

Na eventualidade de o teor de humidade do combustível fino dos dias anteriores, m_0 , ser superior ao teor de humidade dos combustíveis finos após drenagem, E_d , determina-se a taxa logarítmica de seca, K_d , a partir da temperatura, T , da intensidade do vento, W , e da humidade relativa, H , como sendo:

$$\begin{aligned} K_d &= K_0 \times 0,581e^{0,0365T}, \text{ com} \\ K_0 &= 0,424[1 - (H/100)^{1,7}] + 0,0694\sqrt{W}[1 - (H/100)^8] \end{aligned} \quad (2.4)$$

O teor de humidade dos combustíveis finos após secagem, m , é, pois, calculado como:

$$m = E_d + (m_0 - E_d) \times 10^{-K_d} \quad (2.5)$$

Se eventualmente $m_0 < E_d$, o teor de humidade dos combustíveis finos após humedecimento, E_w , é calculado a partir da humidade relativa, H , e da temperatura, T , como:

$$E_w = 0,681H^{0,753} + 10e^{(H-100)/10} + 0,18(21,1 - T) \left(1 - e^{-0,115H} \right) \quad (2.6)$$

Por outro lado, se $m_0 < E_w$, a taxa logarítmica de humedecimento, K_w , é calculado a partir de:

$$\begin{aligned} K_w &= K_1 \times 0,581e^{0,0365T}, \text{ com} \\ K_1 &= 0,424[1 - \left(\frac{100-H}{100} \right)^{1,7}] + 0,0694\sqrt{W}[1 - \left(\frac{100-H}{100} \right)^8] \end{aligned} \quad (2.7)$$

Nas condições enunciadas anteriormente, m é dado por:

$$m = E_w - (E_w - m_0) \times 10^{-K_w} \quad (2.8)$$

Por outro lado, se $E_d \geq m_0 \geq E_w$, o teor de humidade dos combustíveis finos após secagem, m , assume o valor do teor de humidade dos combustíveis finos do dia anterior. Por último, o sub-índice FFMC, F , é calculado através de:

$$F = 59,5 \frac{(250 - m)}{(147,2 + m)} \quad (2.9)$$

O índice de humidade de combustíveis grosseiros, DMC, é calculado, na formulação inicial das equações do sistema FWI canadiao, inicializando-se o DMC com o valor de DMC do dia anterior, P_0 . Posteriormente, se a precipitação acumulada em 24 horas, r_0 , for superior a 1,5 mm, é determinada a precipitação efectiva, r_e , como:

$$r_e = 0,92r_0 + 1,27 \quad (2.10)$$

O teor de humidade dos combustíveis, para os dias anteriores, M_0 , é calculado em função do índice DMC dos dias anteriores, P_0 , através da relação:

$$M_0 = 20 + e^{5,6348 - P_0/43,43} \quad (2.11)$$

Uma variável auxiliar, a utilizar para relacionar o efeito da precipitação no DMC, b , é determinada tendo por base o valor do índice DMC dos dias anteriores, P_0 :

$$\begin{cases} \text{Se } P_0 \leq 33, b = \frac{100}{(0,5+0,3P_0)} \\ \text{Se } 33 < P_0 \leq 65, b = 14 - 1,3 \ln P_0 \\ \text{Se } P_0 > 65, b = 6,2 \ln P_0 - 17,2 \end{cases} \quad (2.12)$$

Ulteriormente, o teor de humidade dos combustíveis após precipitação, M_r , é determinado a partir da precipitação efectiva, r_e , do teor de humidade do combustível dos dias anteriores, M_0 , e da variável auxiliar b , calculada anteriormente, por via da expressão:

$$M_r = M_0 + \frac{1000r_e}{(48,77 - br_e)} \quad (2.13)$$

O valor de DMC após precipitação, P_r , é obtido, em função de M_r , através de:

$$P_r = 244,72 - 43 - 43 \ln (M_r - 20) \quad (2.14)$$

Na equação anterior, impõe-se que, se $P_r < 0 \Rightarrow P_r = 0$. De seguida, actualiza-se o valor de DMC dos dias anteriores (P_0) para o valor de P_r determinado pela equação 2.14.

A taxa de seca logarítmica, K , é obtida a partir da humidade relativa, H , da temperatura, T , e da duração efectiva do dia, L_e , obtido a partir dos valores da tabela 2.3, através de:

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
L_f	6,5	7,5	9,0	12,8	13,9	13,9	12,4	10,9	9,4	8,0	7,0	6,0

Tabela 2.3: Duração efectiva do dia, para o cálculo de DMC.

$$K = 1,894(T + 1,1)(100 - H)L_e \times 10^{-6} \quad (2.15)$$

Note-se que na equação 2.15, se $T < -1,1 \Rightarrow T = -1,1$. Por último, o índice DMC para o presente dia, P , é calculado como sendo:

$$P = P_0 + 100K \quad (2.16)$$

O índice de seca, DC, segue um procedimento de cálculo relativamente similar ao dos índices anteriores. Assim, o ciclo de processamento inicia-se igualando o índice de seca do dia anterior, D , ao índice de seca do corrente dia, D_0 . Posteriormente, se a quantidade de precipitação acumulada em 24 horas, r_0 , for superior a 2,8 mm, é calculada a precipitação efectiva, r_d , como:

$$r_d = 0,83r_0 - 1,27 \quad (2.17)$$

Nestas circunstâncias, e notando que tal cálculo só é levado a cabo para valores de precipitação superiores a 2,8 mm, o equivalente em humidade para o DC, para o dia anterior, Q_0 , é calculado tendo por base o valor do índice de seca do dia anterior, D_0 , através de:

$$Q_0 = 800e^{-D_0/400} \quad (2.18)$$

Seguidamente, a humidade equivalente após precipitação, Q_r , é determinada a partir da precipitação efectiva, r_d , e da humidade equivalente dos dias anteriores, Q_0 , através de:

$$Q_r = Q_0 + 3,937r_d \quad (2.19)$$

Numa etapa seguinte, o índice de seca após precipitação, D_r , é calculado em função da humidade equivalente após precipitação, Q_r :

$$D_r = 400 \ln(800/Q_r) \quad (2.20)$$

Note-se, porém, que, na eventualidade de $D_r < 0$, D_r assume o valor nulo. Posteriormente, D_0 assume o valor de D_r .

A evapotranspiração potencial, V , é calculada tendo por base um ajuste ao DC devido à duração do dia, L_f , para cada mês, e a temperatura, T . Assim, na posse do valor de L_f ,

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
L_f	-1,6	-1,6	-1,6	0,9	3,8	5,8	6,4	5,0	2,4	0,4	-1,6	-1,6

Tabela 2.4: Factores de ajuste da duração do dia, para o cálculo de DC.

conforme a tabela 2.4, V é determinada por:

$$V = 0,36(T + 2,8) + L_f \quad (2.21)$$

Impõem-se, todavia, alguns constrangimentos, na equação 2.21: em primeiro lugar, assume-se que o mínimo absoluto de T é de $-2,8$ °C (isto é, se $T < -2,8 \Rightarrow T = -2,8$); por outro lado, se $V < 0$ é feito $V = 0$.

O índice de seca (DC) do presente dia, D é calculado em função de D_0 ou, alternativamente, de D_r , a partir de:

$$D = D_0 + 0,5V \quad \vee \quad D = D_r + 0,5V \quad (2.22)$$

No que aos índices referentes ao comportamento do fogo diz respeito, o *Build-up Index* (BUI) ou índice de combustível disponível, fornece, através de algo similar a uma média ponderada entre os índices DMC e DC, um indicador da quantidade de material potencialmente combustível sendo, por outro lado, um indicador da dificuldade de extinção de um incêndio em fase de *smouldering*, a terceira fase do desenvolvimento de um incêndio florestal (Statheropoulos e Karma, 2007), caracterizada pela combustão incompleta com pequenas chamas, ou mesmo sem chamas.

O índice de combustível disponível (BUI), U , é, pois, calculado a partir dos índices DMC, P e DC, D , como:

$$\begin{cases} U = \frac{0,8PD}{P+0,4D} & , P \leq 0,4D \\ U = P - \left[1 - \frac{0,8D}{(P+0,4D)}\right] \left[0,92 + (0,0114P)^{1,7}\right] & , P > 0,4D \end{cases} \quad (2.23)$$

O índice de propagação inicial, *Initial Spread Index* (ISI), congrega o teor em humidade dos combustíveis da superfície (através do FFMC) com a velocidade do vento para fornecer um indicador da potencial taxa de propagação do fogo.

Para a determinação deste índice, é, em primeiro lugar, calculada uma função do vento, $f(W)$, definida como:

$$f(W) = e^{0,05039W} \quad (2.24)$$

Posteriormente, é calculada uma função dependente da humidade dos combustíveis finos, $f(F)$, que depende do teor de humidade dos combustíveis finos após drenagem, m , calculado pela equação 2.5, para a determinação do índice FFMC:

$$f(F) = 91,9e^{-0,1386m} \left[1 + \frac{m^{5,31}}{4,93 \times 10^7} \right] \quad (2.25)$$

Por último, o índice de propagação inicial (ISI), R , é dado por:

$$R = 0,208f(W)f(F) \quad (2.26)$$

O índice FWI (*Fire Weather Index*), por sua vez, foi desenvolvido para exprimir a intensidade do fogo expectável, resultante do combustível disponível (indicado pelo BUI) e da taxa de propagação (estimada pelo ISI). De um modo geral, o FWI é utilizado sobretudo para quantificar, num único índice, o efeito combinado das condições meteorológicas e do teor de humidade dos combustíveis, no que ao potencial perigo de incêndio diz respeito.

Para a determinação do índice FWI é considerada, inicialmente, uma função do teor de humidade dos combustíveis, $f(D)$, dependente do índice de combustível disponível (BUI), U , determinado pela equação 2.23:

$$\begin{cases} f(D) = 0,626U^{0,809} + 2 & , \text{ se } U \leq 80 \\ f(D) = \frac{1000}{(25+108,64e^{-0,023U})} & , \text{ se } U > 80 \end{cases} \quad (2.27)$$

A forma intermédia do índice FWI, B , dependente de $f(D)$ e do índice de propagação inicial, R , calculado na equação 2.26, é posteriormente calculada como:

$$B = 0,1Rf(D) \quad (2.28)$$

A forma final do índice FWI, S , é dada por:

$$\begin{cases} S = B & , \text{ se } B \leq 1 \\ \ln S = 2,72(0,434 \ln B)^{0,647} & , \text{ se } B > 1 \end{cases} \quad (2.29)$$

Um último índice, o DSR (*Daily Severity Ratio*), consiste numa função exponencial do FWI, isto é:

$$DSR = 0,0272 \times FWI^{1,77} \quad (2.30)$$

O índice DSR foi inicialmente concebido para explicar o aumento exponencial da área ardida com o tamanho do incêndio, bem como os esforços inerentes ao controlo do fogo no seu estágio inicial de desenvolvimento. Assim, o DSR providencia uma medida integrada

do perigo de incêndio ao longo de um intervalo de tempo, como um mês, ou uma estação sazonal, sendo, por isso, empregue comumente para a obtenção de médias mensais ou sazonais do perigo de incêndio.

O DSR pode ser apresentado sob a forma cumulativa, ao longo do tempo, constituindo o índice de severidade diária cumulativo. A média dos valores individuais do DSR_i , ao longo de um conjunto de dias, n , pode ser calculada, constituindo, assim, uma medida de indexação da severidade da época de incêndios (SSR), isto é:

$$SSR = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} DSR_i \quad (2.31)$$

No âmbito da investigação sobre a adequabilidade da aplicação do sistema FWI canadano em Portugal, Viegas et al. (2004) procederam à calibração das classes de perigo de incêndio, em cada um dos dezoito distritos de Portugal Continental, com base nos valores estatísticos do índice FWI e do número de ocorrências e área ardida diariamente por distrito, conforme se resume na tabela 2.5.

Distrito	Classe de perigo				
	Baixo	Moderado	Alto	Muito Alto	Extremo
Viana do Castelo	< 10	15	30	45	> 45
Braga	< 10	15	30	45	> 45
Porto	< 8	15	25	40	> 40
Vila Real	< 13	20	30	50	> 50
Bragança	< 23	30	45	55	> 55
Aveiro	< 10	17	23	40	> 40
Viseu	< 15	25	45	70	> 70
Guarda	< 8	15	25	50	> 50
Coimbra	< 15	22	30	45	> 45
Leiria	< 15	25	30	50	> 50
C. Branco	< 20	35	45	60	> 60
Lisboa	< 25	35	50	70	> 70
Santarém	< 25	33	50	60	> 60
Setúbal	< 30	40	55	70	> 70
Portalegre	< 35	50	65	75	> 75
Évora	< 40	50	65	75	> 75
Beja	< 40	50	65	75	> 75
Faro	< 30	40	60	75	> 75

Tabela 2.5: Valores limite do índice FWI para as classes de risco em cada distrito, conforme descrito em Viegas et al. (2004).

Capítulo 3

Modelos de Previsão Numérica de Tempo

O terceiro capítulo dedica-se à exploração geral dos modelos de previsão numérica de tempo, ao longo de quatro secções principais. Após uma breve introdução e uma contextualização histórica sobre o tema, é apresentada a formulação geral do problema da previsão numérica do tempo, assente no estabelecimento das equações primitivas. Por último, detalha-se sobre o modelo de previsão numérica de tempo Weather Research and Forecast, quer no que concerne ao sistema de pré-processamento, quer no que ao núcleo dinâmico ARW diz respeito.

3.1 Introdução

De um modo geral, pode definir-se modelo de previsão numérica de tempo como uma ferramenta desenvolvida para a simulação ou previsão do comportamento de um sistema hidrodinâmico, como a atmosfera. Neste sentido, os modelos de previsão almejam a determinar o estado futuro da atmosfera, partindo de um conjunto de informações, que se pretende o mais detalhado possível, sobre um estado presente da atmosfera. Actualmente, o conhecimento do estado do tempo, presente e futuro, reveste-se de um valor inquestionável e, nalguns casos, incalculável, já que, na verdade, todas as actividades humanas são afectadas, em maior ou menor extensão, pelo estado do tempo. O actual processo de previsão do tempo, com recurso a modelos numéricos cada vez mais elaborados, e que são, hoje em dia, processados em plataformas computacionais que abarcam desde computadores pessoais domésticos a supercomputadores, são de uma mais-valia inegável na sociedade contemporânea, na medida em que possibilitam a obtenção de informação meteorológica de pertinente relevância para inúmeras actividades e empreendimentos, nos mais diversos sectores económicos e sociais. A história deste conjunto de ferramentas vê-se, de certa ma-

neira, sobreposta com a aceleração expressiva do desenvolvimento tecnológico que marcou o início dos tempos modernos, nomeadamente com o advento dos computadores. Na secção seguinte faz-se, pois, uma breve resenha histórica dos avanços científicos e tecnológicos mais significativos no processo de previsão numérica do tempo.

3.2 Um breve apontamento histórico

Foi, provavelmente, o norueguês Vilhelm Bjerknes (1862 - 1951) quem pioneiramente concebeu a ideia de utilizar as equações hidrodinâmicas do movimento, dependentes do tempo (cronológico) e, a partir do conhecimento das condições iniciais do estado da atmosfera, determinar um estado futuro. Em 1904, numa publicação numa revista alemã da área (Bjerknes, 1904, citado em Saha, 2008), Bjerknes escrevia:

Se é de facto verdade, como qualquer cientista acredita, que estados atmosféricos subsequentes se desenvolvem a partir dos precedentes de acordo com leis físicas, então é aparente que as condições necessárias e suficientes para a solução racional dos problemas de previsão de tempo são as seguintes:

- 1. Um conhecimento suficientemente exacto do estado da atmosfera num instante inicial e*
- 2. um conhecimento suficientemente exacto das leis segundo as quais um estado da atmosfera se desenvolve a partir de outro.*

Desta forma, Bjerknes desenvolve um modelo teórico para o processo de previsão numérica de tempo, assente em duas etapas: uma primeira fase, designada por Bjerknes de diagnóstico, visava uma análise quantitativa do estado da atmosfera por intermédio de um conjunto de mapas sinópticos, válidos para um instante inicial e uma segunda fase, de prognóstico, caracterizada pela determinação da evolução temporal do estado inicial.

O desiderato de Bjerknes só viria a transpor a fronteira entre a formulação teórica e a sua aplicabilidade alguns anos mais tarde, já no decurso da Primeira Guerra Mundial, quando o britânico Lewis Fry Richardson (1881 - 1953) demonstrou, através de uma formulação prática, a sua exequibilidade. Richardson, munido-se de dados iniciais derivados de mapas sinópticos similares aos propostos por Bjerknes, desenvolveu um árduo e elaborado conjunto de cálculos manuais, envolvendo métodos de diferenças finitas, para a previsão da variação temporal da pressão atmosférica de uma coluna de ar sobre uma zona na Europa, que levou a Richardson seis semanas a completar. Todavia, por um conjunto de razões, os resultados da experiência de Richardson foram irrealistas e desencorajadores, constituindo, pois, um fracasso. Como exemplo, o valor previsto para a variação de pressão à superfície

num intervalo de tempo de seis horas foi de 145 hPa, ao passo que o valor observado foi de 0,2 hPa, sublinhando, assim, a rotunda frustração dos resultados da experiência de Richardson.

Não houve desenvolvimento subsequente nos trabalhos de Richardson até perto de 1950, altura em que o assunto foi reavivado por dois avanços significativos na meteorologia, assumindo, novamente, um lugar de destaque. O primeiro foi uma análise crítica exaustiva das razões que levaram ao fracasso da experiência de Richardson. O próprio, numa primeira análise ao insucesso da sua experiência, não conseguiu identificar uma razão particular, para além da desadequação dos dados iniciais, em particular de altitude, sobre a grelha de cálculo (Lynch, 2006). Claramente, Richardson descurara o que actualmente se concebe por critério de Courant-Friedrichs-Levy (CFL), que deve ser obedecido em prol da estabilidade computacional de qualquer modelo numérico que utilize técnicas de diferenças finitas¹. Foi o americano Jules Charney (1917 - 1981), do Massachusetts Institute of Technology (MIT), quem, ao debruçar-se sobre a análise de escala das equações primitivas, afirmou que a falta de dados adequados foi parcialmente responsável pelo falhanço de Richardson. O “culpado” fora, pois, descoberto: a presença de ondas acústicas e gravíticas nos dados de Richardson contaminara o resultado, conduzindo à instabilidade. Charney enfatizou a importância da necessidade de filtrar estas ondas das equações primitivas, simplificando-as, tendo por base a análise de escala. Por outro lado, o advento do computador, com o Electronic Numerical Integrator And Calculator (ENIAC), tornou possível a obtenção, com sucesso, da primeira previsão numérica de tempo, em 1950. Este marco, histórico para a meteorologia moderna, que transforma o processo de previsão de tempo num problema do domínio da Física Aplicada, teve como mentores não só Charney, mas também o húngaro-americano John von Neumann (1903 - 1957), Fjortoft e Norman Phillips que, ao empregarem um modelo barotrópico similar ao inicialmente desenvolvido por Carl-Gustaf Rossby (1898 - 1957) conseguiram a previsão, num horizonte de 24 horas, do campo de altura do geopotencial aos 500 hPa, num esforço de trinta e três dias para programação e cálculos.

É importante salientar a simbiose entre o desenvolvimento do ENIAC e a obtenção da primeira previsão numérica de tempo, com recurso ao computador. Recorde-se, pois, que um dos objectivos de von Neumann para ilustrar a mais-valia do ENIAC seria justamente um problema científico de interesse.

As primeiras previsões de tempo em regime operacional foram levadas a cabo pelo serviço meteorológico sueco, em 1954, no primeiro computador electrónico sueco, o BESK (Kalnay, 2003). No Reino Unido, as operações rotineiras de previsão numérica de tempo

¹Um esquema de integração numérica por diferenças finitas perde a estabilidade quando a velocidade da grelha de cálculo não é capaz de transmitir a informação física do problema. Assim, o critério CFL surge como critério de estabilidade em função da velocidade de propagação da informação física do problema e da velocidade de propagação numérica, ou, mais simplesmente, $N_c = c \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1$.

começaram mais tarde, dado que só no Verão de 1958 o computador METEOR chegou ao Met Office, sendo substituído pelo computador COMET sete anos depois (Persson, 2005b). Só em 1965 o Met Office começou a disponibilizar previsões de tempo em regime operacional. Embora tenha iniciado tardiamente as actividades de previsão numérica de tempo em regime operacional, o Met Office distinguiu-se, todavia, pelo facto de em 1967 ter disponibilizado publicamente a primeira previsão de precipitação, quando, até à data, as previsões numéricas de tempo apenas contemplavam a evolução temporal da pressão, da altura do geopotencial e dos padrões de vorticidade, sendo necessária a exploração, por parte de meteorologistas experientes, do seu significado em termos das condições meteorológicas que se faziam sentir (Inness, 2013).

Nos Estados Unidos da América, a *Joint Numerical Weather Prediction Unit* (JNWPU), resultante da cooperação entre o *Weather Bureau*, a Marinha e a Força Aérea americanas, dirigida por George Cressman, torna pública a sua primeira previsão de tempo em Maio de 1955 (Harper, 2008), utilizando um computador IBM 701. A dada altura, em resultado de divergências relacionadas com os requisitos dos clientes, a JNWPU cindiu-se na *Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center* (FNMOC), a *Air Force Weather Agency* (AFWA) e o *National Meteorology Center*, que, mais tarde, em meados dos anos noventa do século XX, se viria a designar *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP).

Ao longo da segunda metade do século XX, a maior parte dos países envida esforços significativos para a operacionalização da previsão numérica de tempo, tarefa que se relaciona inteiramente com a posse de infra-estrutura de cálculo, nomeadamente de arsenal computacional. No Japão, por exemplo, a Agência Meteorológica Japonesa inicia as operações de previsão numérica de tempo em 1959, com a aquisição de um computador IBM 704. Na Alemanha Ocidental, só com a chegada do computador CDC 34000, em 1965, foi possível ao *Deutscher Wetterdienst* (DWD) o arranque das operações de previsão numérica de tempo, em Outubro de 1966. Na Alemanha de Leste, a previsão numérica de tempo iniciou-se no mesmo ano, com a chegada do computador BESM-6, de construção soviética. Em França, foi em finais de 1960 que, com o recurso ao computador K901, a previsão numérica de tempo se operacionalizou. Na então União Soviética, onde a escola de Bergen encontrou um promotor entusiasta, a primeira previsão numérica de tempo em regime operacional tinha sido lançada em 1959 (Persson, 2005a).

Pelo que foi escrito nos parágrafos anteriores, facilmente se pode concluir que, até aos anos setenta do século XX, as principais agências meteorológicas mundiais haviam dado início à previsão numérica de tempo numa base operacional. O estabelecimento do *European Center for Medium-range Weather Forecasts* (ECMWF), em Reading, no Reino Unido, em 1975, constitui igualmente um marco histórico. O objectivo do centro europeu consistia no desenvolvimento da previsão numérica de tempo a médio prazo (até cerca de

15 dias), utilizando financiamento de todos os principais serviços meteorológicos europeus de forma cooperativa. Deste modo, ficaria garantido que mesmo os serviços meteorológicos que não dispusessem de recursos para o desenvolvimento da operacionalização da previsão numérica de tempo, nomeadamente no que ao arsenal computacional diz respeito, tivessem acesso às previsões do Centro Europeu.

O ECMWF destaca-se igualmente nesta resenha histórica por ter sido um dos pioneiros, a par com o NCEP, na operacionalização da previsão numérica de tempo por *ensembles*, a partir dos anos noventa do século XX, destacando-se igualmente pelo desenvolvimento de técnicas e modelos para a previsão de tempo à escala mensal e sazonal (Inness, 2013).

O progressivo aumento da performance da previsão numérica de tempo no decurso dos últimos anos é fruto de vários factores, entre os quais se salientam como principais:

- O desenvolvimento dos computadores e do seu poder de cálculo, que permite uma muito maior resolução espacial nas grelhas dos modelos de previsão e simultaneamente com cada vez menos necessidade de aproximações;
- o desenvolvimento da compreensão física dos processos de sub-grelha, possibilitando uma melhor representação da precipitação, transferências turbulentas, entre outras;
- o uso de métodos cada vez mais precisos de assimilação de dados, beneficiando largamente as condições iniciais utilizadas pelos modelos;
- o aumento da quantidade de dados observacionais, mais particularmente com a frutuosa contribuição da detecção remota para a cobertura de oceanos e regiões do hemisfério Sul.

Não obstante, alguns desafios permanecem em curso. Entre outros, pode referir-se a importância do acoplamento pleno da química da atmosfera e dos processos biológicos e geológicos nos modelos de previsão. Adicionalmente, a demanda social sobre a previsão de tempo, reconhecendo a sua mais-valia em inúmeros sectores, pressiona o desenvolvimento dos modelos de previsão, não só no que diz respeito aos horizontes temporais de previsão, mas também no que concerne à resolução espacial das previsões, bem como aos produtos derivados das previsões de tempo.

3.3 Formulação geral do problema de previsão numérica do tempo: as equações primitivas

No seu âmago, os modelos de previsão numérica de tempo são baseados nos princípios de conservação da Física. Assim, as equações primitivas, cuja integração permite a descrição

3.3 Formulação geral do problema de previsão numérica do tempo: as equações primitivas

de estados futuros da atmosfera e que são discretizadas e simplificadas nos modelos de previsão por forma a poderem ser resolvidas por métodos numéricos, assentam nos seguintes princípios de conservação:

- a conservação da massa;
- a conservação da energia;
- a conservação da quantidade de movimento;
- a conservação da massa de água;
- a conservação de outros constituintes atmosféricos (gases, aerossóis, etc.)

Adicionalmente, a equação de estado é requerida, por forma a obter-se uma relação entre a temperatura, a pressão e a densidade.

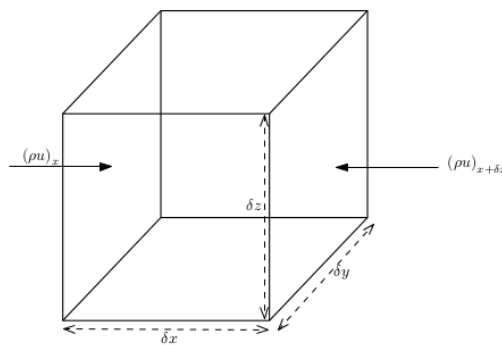


Figura 3.1: Fluxo de massa ao longo direção x , numa unidade infinitesimal de volume.

A conservação da massa decorre, por princípio, do facto de na atmosfera não existirem fontes ou sorvedouros de massa. Assim, o balanço dos fluxos de massa na direcção x das paredes de um elemento infinitesimal de volume δV , representado na figura 3.1 será, pois,

$$\frac{\partial m}{\partial t} = (\rho u)_x \delta y \delta z - (\rho u)_{x+\delta x} \delta y \delta z \quad (3.1)$$

Ora, como a massa do cubo é, por definição, $m = \rho \delta x \delta y \delta z$, tem-se

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta x \delta y \delta z \quad (3.2)$$

Igualando as equações 3.1 e 3.2, obtém-se, pois,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left[\frac{(\rho u)_{x+\delta x} - (\rho u)_x}{\delta x} \right] \quad (3.3)$$

Fazendo o $\lim_{\delta x \rightarrow 0}$, obtém-se, portanto:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \quad (3.4)$$

Empregando um raciocínio similar ao anterior, obtemos, para as direcções y e z ,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \quad \text{e} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \quad (3.5)$$

A **equação da continuidade** pode, pois, ser escrita sob a forma vectorial como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \vec{v}) \quad (3.6)$$

A equação 3.6 pode ainda ser apresentada sob outra forma, desenvolvendo o produto:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} &= -\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = -\vec{v} \cdot \vec{\nabla} \rho - \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{v} \\ &\Leftrightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \rho + \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \\ &\Leftrightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

O que resulta em:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{v} \quad (3.8)$$

Por outro lado, as equações primitivas para a conservação da quantidade de movimento podem ser obtidas mediante a aplicação da 2ª Lei de Newton a uma parcela de ar. Assim, num referencial inercial, a aceleração a que está sujeita a dita parcela é dada por:

$$\frac{d_a \vec{v}_a}{dt} = \frac{\sum \vec{F}}{m}, \quad \text{com} \quad \vec{v} = (u, v, w) \quad (3.9)$$

Ora, a relação entre a velocidade medida num referencial inercial, \vec{v}_a , e a velocidade num referencial em rotação, \vec{v} , é estabelecida como:

$$\vec{v}_a = \vec{v} + \vec{\Omega} \times \vec{r} \quad (3.10)$$

O resultado anterior é obtido tendo em conta que a relação entre a derivada temporal do vector velocidade no referencial inercial, fixo, $\frac{d_a \vec{v}_a}{dt}$, e a derivada temporal da velocidade no referencial em rotação, $\frac{d\vec{v}}{dt}$, é:

$$\frac{d_a \vec{v}_a}{dt} = \frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{\Omega} \times \vec{v}_a \quad (3.11)$$

3.3 Formulação geral do problema de previsão numérica do tempo: as equações primitivas

Levando este facto em consideração, a aceleração, resultado da derivação temporal da equação 3.10, pode escrever-se como:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\vec{v}_a}{dt} &= \frac{d}{dt} (\vec{v} + \vec{\Omega} \times \vec{r}) + \vec{\Omega} \times (\vec{v} + \vec{\Omega} \times \vec{r}) \\
 &= \frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{d}{dt} (\vec{\Omega} \times \vec{r}) + \vec{\Omega} \times \vec{v} + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}) \\
 &= \frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \times \vec{r} + \vec{\Omega} \times \frac{d\vec{r}}{dt} + \vec{\Omega} \times \vec{v} + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}) \\
 &= \frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{\Omega} \times \frac{d\vec{r}}{dt} + \vec{\Omega} \times \vec{v} + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}) \\
 &= \frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{\Omega} \times \vec{v} + \vec{\Omega} \times \vec{v} + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}) \\
 &= \frac{d\vec{v}}{dt} + 2\vec{\Omega} \times \vec{v} + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r})
 \end{aligned}$$

Obtém-se, pois, para a Segunda Lei de Newton, que, em virtude da rotação do planeta, duas forças aparentes (ou de inércia) por unidade de massa devem ser consideradas, para além das restantes: a força de Coriolis (segundo termo do lado direito da equação 3.12) e a força centrífuga (terceiro termo da referida equação 3.12):

$$\frac{\sum \vec{F}}{m} = \frac{d\vec{v}}{dt} + 2\vec{\Omega} \times \vec{v} + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}) \quad (3.12)$$

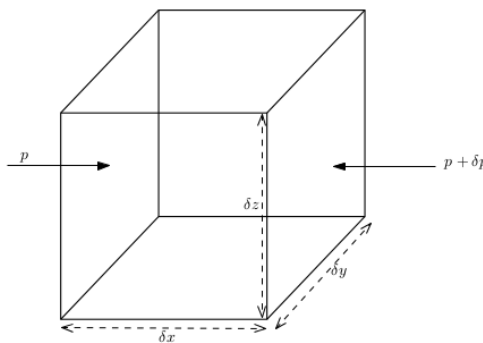


Figura 3.2: Parcela de ar sujeita a um gradiente de pressão na direcção x.

Uma das forças que se deve contabilizar na equação 3.12 é a força do gradiente de pressão, que resulta do balanço entre as diferenças de pressão numa parcela de ar. Na parcela de fluido contido na caixa da figura 3.2, sujeito a um gradiente de pressão na

direcção x , tem-se que a força resultante, por unidade de massa, $m = \rho \delta x \delta y \delta z$, que actua na caixa, é:

$$\frac{\rho \delta y \delta z - (p + \delta p) \delta y \delta z}{\rho \delta x \delta y \delta z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta x} \quad (3.13)$$

No $\lim_{\delta x \rightarrow 0}$, tem-se, pois, que a força do gradiente de pressão é $-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$, ou, já que o mesmo raciocínio empregue na equação 3.13 é generalizável para as restantes direcções, y e z ,

$$\vec{F}_{\nabla p} = -\frac{1}{\rho} \nabla p \quad (3.14)$$

A força resultante da interacção gravitacional deve igualmente ser considerada como uma das forças externas que actua sobre uma parcela de ar. Desta forma, é usual considerar uma aceleração gravítica modificada, de forma a incluir o resultado da atracção gravitacional terrestre e da aceleração centrífuga, ou seja,

$$\vec{g} = \vec{g}^* + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}) \quad \text{com} \quad \vec{g}^* \approx -\frac{GM_T}{r^2} \hat{r} \quad (3.15)$$

Note-se que, na equação 3.15, as variações de \vec{g}^* com a altura ou com a localização na superfície terrestre são ignoradas. Adicionalmente, se se designar por $\vec{F} = F_u \hat{i} + F_v \hat{j} + F_w \hat{k}$ as forças de atrito (devidas à viscosidade ou à turbulência) que actuam na parcela de ar, por unidade de massa, tem-se, para a equação que traduz a conservação da quantidade de movimento, em forma vectorial,

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -2\vec{\Omega} \times \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{g} + \vec{F} \quad (3.16)$$

Tendo em conta a conveniência de analisar a equação 3.16 utilizando coordenadas esféricas e decompondo-a nas suas componentes, tem-se, para a representação das componentes de \vec{v} em coordenadas esféricas,

$$\begin{cases} u \equiv \frac{dx}{dt} = r \cos \phi \frac{d\lambda}{dt} \\ v \equiv \frac{dy}{dt} = r \frac{d\phi}{dt} \\ w \equiv \frac{dz}{dt} \end{cases} \quad (3.17)$$

Na equação 3.17 escrita anteriormente, λ representa a longitude, ϕ a latitude, z a altitude e r a distância ao centro da Terra ($r = a + z \approx a$, sendo a o raio da Terra, em primeira aproximação a uma atmosfera pouco profunda). Notando que o sistema de eixos definido pelas relações anteriores não é cartesiano, já que os versores \hat{i} , \hat{j} e \hat{k} não são

3.3 Formulação geral do problema de previsão numérica do tempo: as equações primitivas

constantes, tem-se que a sua taxa de variação temporal é dada por:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}}{dt} = \frac{u}{a \cos \phi} (\hat{j} \sin \phi - \hat{k} \cos \phi) \\ \frac{d\hat{j}}{dt} = \frac{u \tan \phi}{a} \hat{i} - \frac{v}{a} \hat{k} \\ \frac{d\hat{k}}{dt} = \frac{u}{a} \hat{i} - \frac{v}{a} \hat{j} \end{cases} \quad (3.18)$$

Atendendo a este resultado, obtém-se,

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \left(\frac{du}{dt} - \frac{uv \tan \phi}{a} + \frac{uw}{a} \right) \hat{i} + \left(\frac{dv}{dt} + \frac{u^2 \tan \phi}{a} + \frac{vw}{a} \right) \hat{j} + \left(\frac{dw}{dt} - \frac{u^2 + v^2}{a} \right) \hat{k} \quad (3.19)$$

Para a determinação das componentes da aceleração de Coriolis, tome-se em atenção a figura 3.3, que representa um sistema de eixos sobre a superfície da Terra em rotação, num ponto de latitude e longitude dados.

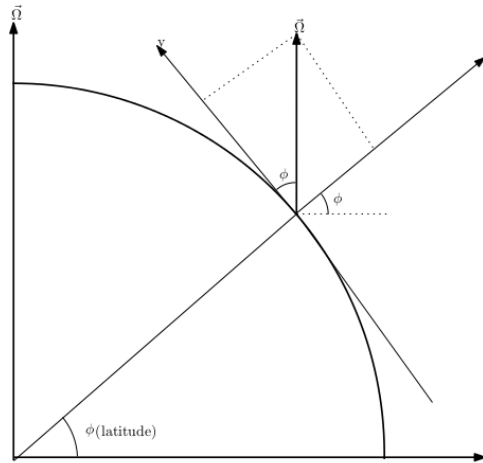


Figura 3.3: Componentes da aceleração de Coriolis.

Nas condições da figura, o vector velocidade angular de rotação da terra, $\vec{\Omega}$ pode escrever-se, no sistema de eixos definido como: $\vec{\Omega} = \Omega \cos \phi \hat{j} + \Omega \sin \phi \hat{k}$, pelo que o resultado $2\vec{\Omega} \times \vec{v}$ da equação 3.12 se pode obter como sendo:

$$\begin{aligned} 2\vec{\Omega} \times \vec{v} &= 2 \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & \Omega \cos \phi & \Omega \sin \phi \\ u & v & w \end{vmatrix} \\ &= (2\Omega v \sin \phi - 2\Omega w \cos \phi) \hat{i} - 2\Omega u \sin \phi \hat{j} + 2\Omega u \cos \phi \hat{k} \end{aligned} \quad (3.20)$$

As equações que traduzem a conservação do momento podem, pois, ser expressas como:

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} - \frac{uv \tan \phi}{a} + \frac{uw}{a} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2\Omega v \sin \phi - 2\Omega w \cos \phi + F_u \\ \frac{dv}{dt} + \frac{u^2 \tan \phi}{a} + \frac{vw}{a} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - 2\Omega u \sin \phi + F_v \\ \frac{dw}{dt} - \frac{u^2+v^2}{a} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + 2\Omega u \cos \phi - g + F_w \end{cases} \quad (3.21)$$

Ou, utilizando somente coordenadas esféricas:

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} - \frac{uv \tan \phi}{a} + \frac{uw}{a} = -\frac{1}{\rho a \cos \phi} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + 2\Omega v \sin \phi - 2\Omega w \cos \phi + F_{r_\lambda} \\ \frac{dv}{dt} + \frac{u^2 \tan \phi}{a} + \frac{vw}{a} = -\frac{1}{\rho a} \frac{\partial p}{\partial \phi} - 2\Omega u \sin \phi + F_{r_\phi} \\ \frac{dw}{dt} - \frac{u^2+v^2}{a} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + 2\Omega u \cos \phi - g + F_{r_z} \end{cases} \quad (3.22)$$

A primeira lei da Termodinâmica, $dU = dq - dw$, aplicada a uma parcela de ar, permite verificar que, se se designar por $J = \frac{dq}{dt}$ a taxa temporal a que uma partícula de ar efectua trocas de energia sob a forma de calor por unidade massa, onde estão incluídas as trocas devidas à radiação, à condução e às mudanças de fase, a energia interna da partícula por unidade de massa terá que variar, nesse intervalo de tempo, na quantidade $\frac{dU}{dt} = c_p \frac{dT}{dt}$ e a quantidade de energia transferida sob a forma de trabalho, por unidade de massa, poderá exprimir-se como $dw = p \frac{d\alpha}{dt}$, pelo que se pode escrever a 1ª Lei da Termodinâmica como:

$$c_v \frac{dT}{dt} + p \frac{d\alpha}{dt} = J \quad (3.23)$$

Na equação 3.23 apresentada, c_v representa a capacidade térmica mássica a volume constante, α representa o volume específico ($\alpha = \frac{1}{\rho}$), $\frac{d}{dt}$ representa a derivada total (Holton, 2004),

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \quad (3.24)$$

Ora, pela equação de estado, $p = \rho RT$, tem-se que $\frac{1}{\rho} = \frac{RT}{p}$, pelo que, em 3.23, fica:

$$\begin{aligned} c_v \frac{dT}{dt} + pR \frac{d}{dt} \left(\frac{T}{p} \right) &= \\ &= (c_v + R) \frac{dT}{dt} - \frac{RT}{p} \frac{dp}{dt} = J \end{aligned} \quad (3.25)$$

Como pela equação de estado $\frac{RT}{p} = \frac{1}{\rho}$, a equação anterior pode ser simplificada para:

$$(c_v + R) \frac{dT}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} = J \quad (3.26)$$

3.3 Formulação geral do problema de previsão numérica do tempo: as equações primitivas

Como $c_p = c_v + R$,

$$J = c_p \frac{dT}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} \quad (3.27)$$

Dividindo a equação 3.27 por T ,

$$\frac{J}{T} = \frac{c_p}{T} - \frac{1}{\rho T} \frac{dp}{dt} \quad (3.28)$$

Recordando novamente a equação de estado, $p = \rho RT$, temos $\frac{1}{\rho T} = \frac{R}{p}$, logo,

$$\frac{J}{T} = \frac{c_p}{T} - \frac{R}{p} \frac{dp}{dt} \quad (3.29)$$

Atendendo às regras de derivação,

$$\frac{d \ln (f(x))}{dx} = \frac{1}{f(x)} \frac{df(x)}{dx} \quad (3.30)$$

Tem-se que,

$$\frac{1}{T} \frac{dT}{dt} = \frac{d \ln T}{dt} \quad \text{e, analogamente,} \quad \frac{1}{p} \frac{dp}{dt} = \frac{d \ln p}{dt} \quad (3.31)$$

Deste modo, pode reescrever-se a equação 3.29 como:

$$\frac{J}{T} = c_p \frac{d \ln T}{dt} - R \frac{d \ln p}{dt} \quad (3.32)$$

Por outro lado, revise-se o conceito de temperatura potencial, θ , como sendo, por definição, a temperatura que uma parcela de ar possa adquirir se for sujeita a compressão ou expansão adiabática do seu estado real de pressão, p , e temperatura até p_0 . A sua importância, neste contexto, resulta do facto de θ ser uma quantidade que se conserva em deslocamentos adiabáticos de ar não saturado. De acordo com a equação de Poisson,

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad (3.33)$$

Logaritmizando ambos os membros da equação 3.33, obtém-se,

$$\ln \theta = \ln T + \frac{R}{c_p} \ln p_0 - \frac{R}{c_p} \ln p \quad (3.34)$$

Derivando a equação 3.34 em ordem ao tempo,

$$\frac{d \ln \theta}{dt} = \frac{d \ln T}{dt} - \frac{R}{c_p} \frac{d \ln p}{dt} \quad (3.35)$$

Comparando as equações 3.35 e 3.32 e dividindo 3.32 por c_p , reconhece-se imediatamente que:

$$\frac{d \ln \theta}{dt} = \frac{J}{c_p T} \quad (3.36)$$

Fazendo uso da identidade patente na equação 3.30, tem-se, pois,

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{J\theta}{c_p T} \quad (3.37)$$

Recordando o conceito de derivada total (equação 3.24), obtém-se, pois, que as variações locais da temperatura potencial serão dadas por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -u \frac{\partial \theta}{\partial x} - v \frac{\partial \theta}{\partial y} - w \frac{\partial \theta}{\partial z} + \frac{J\theta}{c_p T} \quad (3.38)$$

ou, equivalentemente,

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{v} = \frac{J\theta}{c_p T} \quad (3.39)$$

Para a escrita de uma equação que traduza a conservação da massa de água, há que ter em conta que, em virtude da sua ocorrência na natureza nos três estados físicos, devem ser tidos em consideração os processos de mudança de fase, ao longo do movimento da água na atmosfera. Assim, e de forma genérica, tem-se, para traduzir a conservação da água,

$$\frac{dq_n}{dt} = S_{q_n} \quad , \text{ com } n = 1, 2, 3 \quad (3.40)$$

Na equação 3.40, q_1 , q_2 e q_3 são definidos como a fracção da massa de água no estado sólido, líquido e gasoso, respectivamente, relativamente à massa de ar no mesmo volume. Os termos S_{q_1} , S_{q_2} e S_{q_3} representam todas as fontes e sumidouros, referindo-se aos processos de mudança de fase da água bem como ao eventual consumo ou criação de água em reacções químicas. A variação local pode ser expressa, atendendo à equação 3.24, como:

$$\frac{\partial q_n}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \vec{\nabla} q_n + S_{q_n} \quad (3.41)$$

De forma análoga às equações 3.40 e 3.41, as relações que traduzem a conservação de outros materiais na atmosfera (gases, aerossóis, etc.) podem ser escritas como:

$$\frac{d\chi_m}{dt} = S_{\chi_m} \quad , \text{ com } m = 1, 2, \dots, M \quad (3.42)$$

3.3 Formulação geral do problema de previsão numérica do tempo: as equações primitivas

Na equação 3.42, χ_m refere-se a qualquer espécie química com a exceção da água (que é tratada segundo o formalismo que culmina na equação 3.41) e é definido pela razão entre a massa da substância e a massa de ar que ocupa o mesmo volume. Equivalentemente ao que se fez com a conservação de água, a variação local de outras substâncias químicas presentes na atmosfera pode, fazendo uso do conceito de derivada total, ser traduzida como:

$$\frac{\partial q_n}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \vec{\nabla} q_n + S_{q_n} \quad (3.43)$$

As equações que traduzem a conservação da massa, 3.6, da quantidade de movimento, 3.21, e da energia, 3.39, juntamente com a equação de estado, $p = \rho RT$, e as equações que traduzem a conservação da água, 3.41, e outras substâncias, 3.43, foram, pois, apresentadas na sua versão mais simplista. Este conjunto de equações são, à partida, suficientes para permitir a obtenção de soluções para as variáveis dependentes (u, v, w, p, ρ, T), constituindo, ainda que numa formulação alternativa, as pedras basilares para os modelos de previsão numérica de tempo. Regra geral, as equações podem ser simplificadas, mediante o uso de determinadas aproximações físicas e/ou matemáticas. Assim, algumas aproximações usuais são, por exemplo:

- a aproximação hidrostática, onde se consideram que, para os fenómenos de mesoscala, os termos com maior ordem de grandeza na expressão que traduz o movimento vertical na atmosfera, na equação 3.21, são o terceiro e quarto, pelo que é comum escrever-se $\frac{\partial p}{\partial z} = \rho g$;
- a aproximação geostrófica, tipicamente válida em altitudes superiores à da camada limite, onde a turbulência perde expressividade, consiste em considerar que a força do gradiente de pressão é equilibrada pela força de Coriolis. Deste modo, as componentes horizontais da velocidade do vento são determinadas simplesmente por $u_g = \frac{1}{\Omega \sin \phi} \frac{\partial p}{\partial y}$ e $v_g = -\frac{1}{\Omega \sin \phi} \frac{\partial p}{\partial x}$;
- a aproximação anelástica aplica-se à equação da continuidade. A interpretação da equação 3.6 é a de que a variação fraccional da densidade da parcela de fluido, ao longo do fluxo, iguala, em sentido oposto, a divergência da velocidade. Nesta aproximação assume-se que a densidade varia de forma suficientemente lenta, permitindo, assim, que o efeito da sua variação possa ser desprezado. Isto significa que na expansão da equação 3.6, ao longo da equação 3.7, a variação local da densidade, $\frac{\partial \rho}{\partial t}$, pode ser anulada, escrevendo-se, pois, a equação da continuidade como $\vec{\nabla} \cdot \rho \vec{v} = 0$. Ao utilizar esta aproximação, as ondas acústicas são removidas, permitindo passos temporais mais alargados nos modelos de previsão numérica;

- a aproximação de Boussinesq pressupõe que se a densidade está sujeita a variações muito pequenas, de forma a que possa ser considerada constante, o seu valor pode ser substituído por um valor de referência. Assim, partindo da equação da continuidade obtida por intermédio da equação 3.8, torna-se possível excluir ρ do operador gradiente, obtendo-se uma nova e assaz simples formulação para a equação da continuidade: $\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0$. Por outro lado, nas equações do movimento segundo a horizontal e a vertical, na equação 3.21, a densidade é substituída por uma densidade de referência, ρ_0 .

3.4 O modelo *Weather Research and Forecast* (WRF)

O modelo numérico WRF é um modelo de previsão numérica de tempo e simulação atmosférica de mesoescala que representa, actualmente, o estado da arte no que respeita a modelos de previsão numérica de tempo. Actualmente, o WRF é utilizado para os mais diversos fins, entre os quais se destacam:

- Investigação em Física da Atmosfera, de um modo geral, e em desenvolvimento de parametrizações, em particular;
- Investigação aplicada a estudos de casos particulares de ocorrência de eventos meteorológicos;
- Previsão numérica de tempo em regime operacional;
- Investigação em assimilação de dados;
- Ensino de dinâmica da atmosfera e previsão numérica de tempo;
- Investigação em climatologia regional e à escala de tempo sazonal;
- Aplicações de acoplamento com modelos químicos;
- Simulações idealizadas a diversos níveis (convecção, ondas baroclínicas, simulações de grandes vórtices);
- Acoplamento com modelos de propagação de fogo (WRF-FIRE);
- Acoplamento com modelos oceânicos e de ondas.

O desenvolvimento do WRF tem vindo a ser possível graças à colaboração frutífera entre centros de investigação e agências governamentais dos Estados Unidos da América, entre os quais a Mesoscale and Microscale Meteorology (MMM) Division do National Center for

3.4 O modelo Weather Research and Forecast (WRF)

Atmospheric Research (NCAR), os National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e o Forecast System Laboratory (FSL), pertencentes à National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), a Air Force Weather Agency (AFWA) e o Naval Research Laboratory (NRL), sob tutela do departamento de defesa dos EUA, o Center of Analysis and Prediction of Storms (CAPS), na Universidade de Oklahoma, e a Federal Aviation Administration (FAA). Para além das entidades referidas anteriormente, colaboram no desenvolvimento do WRF uma miríade de instituições de ensino e investigação americanas e internacionais, com o objetivo de tornar do domínio público, gratuito, e com suporte científico e técnico, um sistema de modelação atmosférica flexível, portátil e eficiente do ponto de vista computacional, disponibilizando os mais recentes avanços físicos, numéricos e de assimilação de dados. O ritmo de desenvolvimento do WRF, esquematizado sob a forma de friso cronológico das diferentes versões oficiais na figura 3.4, é suficiente para ilustrar o empenho das várias instituições envolvidas (e da comunidade científica) para um constante desenvolvimento do modelo, quer seja sob a forma de novos esquemas de parametrização, quer pela inclusão de novas funcionalidades e/ou fontes de dados, num esforço contínuo e dinâmico que visa pautar pelo lançamento de uma nova versão do modelo a cada ano².

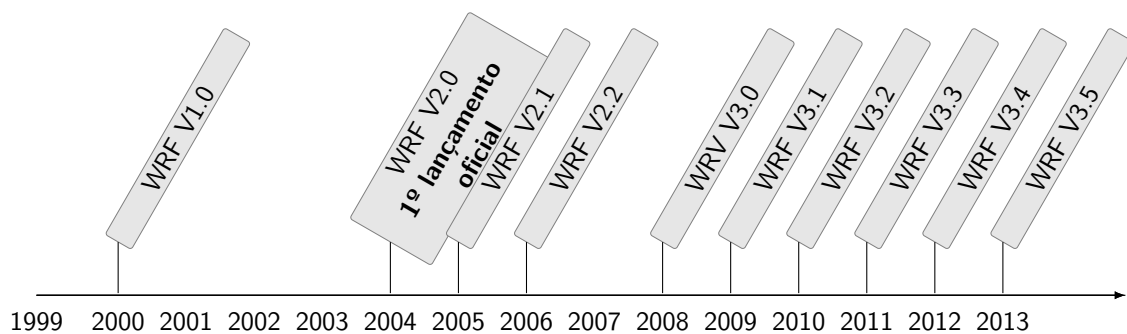


Figura 3.4: Friso cronológico do desenvolvimento do modelo WRF.

Os principais componentes do sistema de modelação WRF são ilustrados na figura 3.5. O *framework* do software WRF constitui toda a infraestrutura que contém os núcleos dinâmicos, pacotes de física que interagem com os núcleos, programas de inicialização, programas de análise variacional e o núcleo WRF-Chem. Através da análise da figura, pode verificar-se a existência de dois núcleos dinâmicos: o *Advanced Research WRF* (ARW), desenvolvido principalmente pelo NCAR e o *Nonhydrostatic Mesoscale Model* (NMM), desenvolvido pelo NCEP. Deve salientar-se que para as tarefas inerentes ao presente estudo desenvolvido, o núcleo dinâmico utilizado para a resolução das equações governantes da dinâmica atmosférica foi o ARW, na versão 3.1. As diferenças entre ambos os núcleos dinâmicos residem, sobretudo, na formulação das equações governantes, das variáveis prog-

²Muito embora não tenham sido assinaladas na figura 3.4, devem, também, contabilizar-se os *minor updates* que, para cada versão, surgem também com periodicidade anual.

nósticas, do tipo de grelhas horizontal e vertical, da formulação do terreno, dos métodos de integração temporal e da discretização espacial.

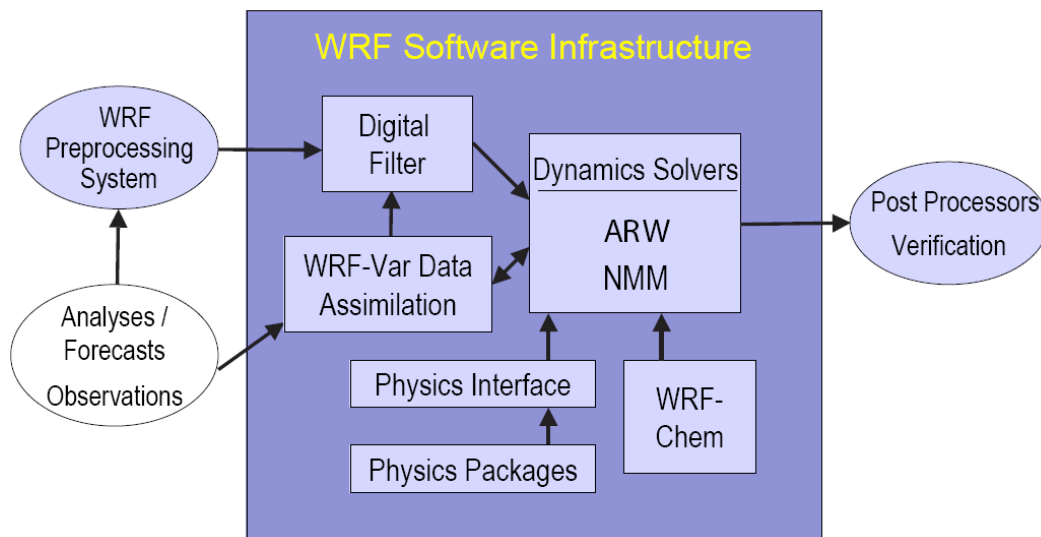


Figura 3.5: Esquemática da infraestrutura do sistema WRF. Créditos: Mesoscale & Microscale Meteorology Division (2010).

O diagrama da figura 3.6 permite apreciar os diversos componentes do sistema WRF-ARW, em consonância com a figura 3.5. De particular interesse para a investigação levada a cabo, destacam-se dos seus componentes principais, que cumprem funções específicas, nas aplicações a casos reais: o sistema de pré-processamento WPS, *WRF Preprocessing System*, e o núcleo dinâmico ARW, que serão analisados detalhadamente nas subsecções seguintes.

3.4.1 O sistema de pré-processamento WPS

O WPS constitui o ponto de partida para o início de qualquer simulação baseada em condições reais, na medida em que as suas funções se dedicam à definição dos domínios de simulação, interpolação de dados estáticos (topografia, tipo e uso de solo, coberto vegetal, médias climatológicas, entre outros) sobre a grelha de simulação definida e descodificação e interpolação para a grelha computacional dos dados meteorológicos que constituirão as condições iniciais e de fronteira, preparando assim os dados de entrada para a simulação e de realimentação para a simulação, conforme ilustra o diagrama da figura 3.7. Desta forma, cada um dos programas específicos do sistema de pré-processamento cumpre uma finalidade determinada:

- o *geogrid* define os domínios de simulação de acordo com uma determinada projecção e interpola um conjunto de dados de inicialização para a malha computacional

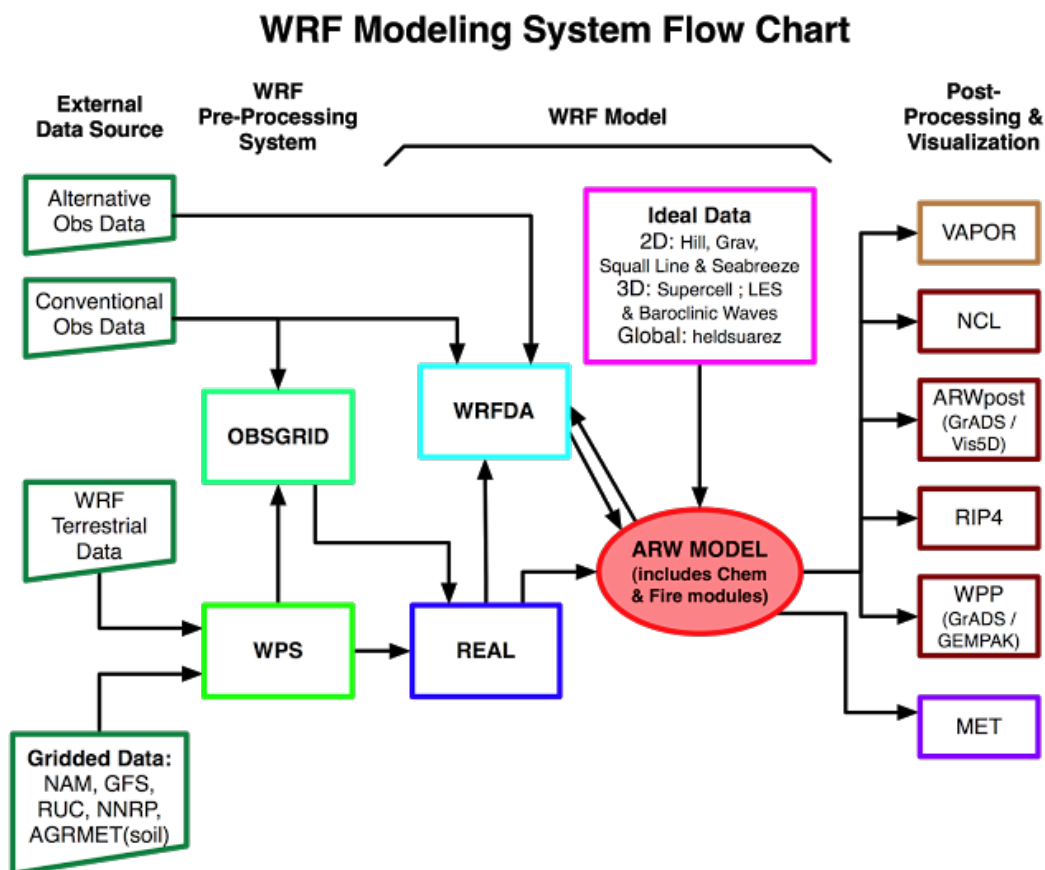


Figura 3.6: Esquematização da infraestrutura do sistema WRF baseado no núcleo ARW. Créditos: Mesoscale & Microscale Meteorology Division (2010).

definida, na formulação das grelhas horizontal e vertical do ARW;

- o *ungrib* procede à descodificação dos dados e selecção dos campos de interesse a extrair dos dados atmosféricos de inicialização, tipicamente provenientes de outros modelos, normalmente de escala global;
- o *metgrid* procede à interpolação horizontal dos dados obtidos mediante o uso do programa *ungrib* sobre os domínios de integração definidos no *geogrid* ao longo dos tempos de simulação indicados.

3.4.2 O núcleo dinâmico ARW

O núcleo dinâmico ARW procede à integração numérica das equações Eulerianas não-hidrostáticas mediante o uso de um esquema *time-split* de Runge-Kutta de terceira ordem (Skamarock e Klemp, 2008; Skamarock et al., 2008). A formulação das coordenadas verticais no WRF faz uso da coordenada Eta, η , que acompanha a topografia do terreno,

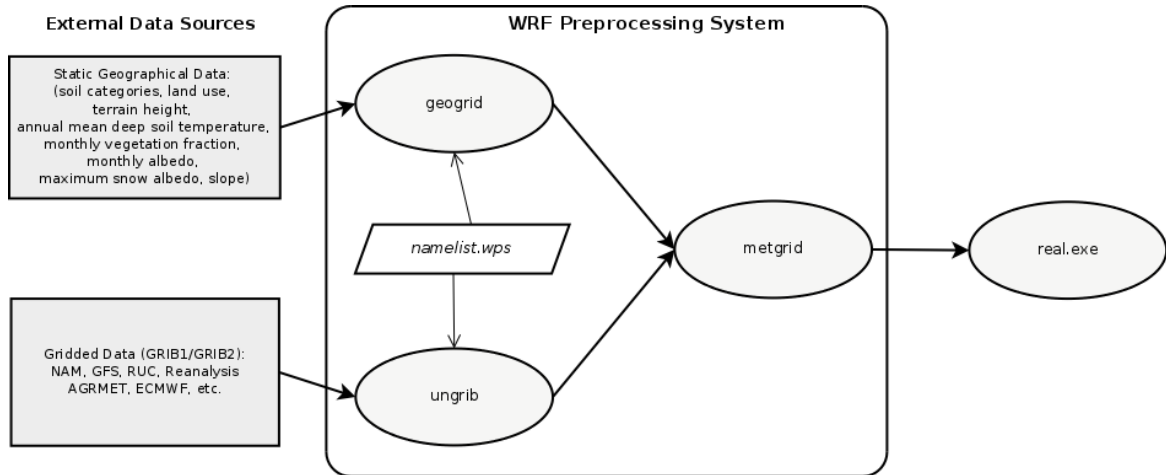


Figura 3.7: Componentes do sistema de pré-processamento WPS.

definida em relação à componente hidrostática da pressão (conforme representado na figura 3.8), como:

$$\eta = \frac{p_h - p_{ht}}{p_{hs} - p_{ht}} = \frac{p_h - p_{ht}}{\mu} \quad (3.44)$$

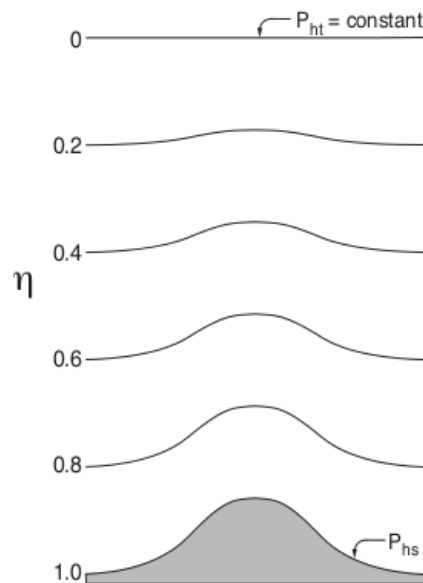


Figura 3.8: A coordenada vertical η , utilizada no WRF. Créditos: Skamarock et al. (2008).

Pela equação anterior, a coordenada vertical definida é, pois, dependente da massa da coluna de ar que se estende desde um determinado nível até à fronteira superior do modelo, onde a pressão é considerada constante, dividida pela massa de toda a coluna de ar.

Naturalmente, η varia desde 1, à superfície, até 0, na fronteira superior do modelo. Desta forma, e atendendo à definição de $\mu = p_{hs} - p_{ht}$ na equação 3.44, o vector tridimensional que representa a velocidade covariante horizontal e vertical $\vec{v} = (u, v, w)$, a temperatura potencial θ , a velocidade vertical contravariante, $\omega = \dot{\eta} = \frac{D\eta}{Dt}$, podem ser redefinidas, respectivamente, como:

$$\vec{V} = \mu\vec{v} = (U, V, W) \quad , \quad \Omega = \mu\dot{\eta} \quad , \quad \Theta = \mu\theta \quad (3.45)$$

Assim, podem ser obtidas seis equações de prognóstico Eulerianas em forma de fluxo para o ar seco: três equações para o momento (equações 3.46a, 3.46b e 3.46c), a equação que reflecte a energia termodinâmica (equação 3.46d), a equação da continuidade (equação 3.46e) e a derivada material do geopotencial (equação 3.46f), conforme Skamarock et al. (2008):

$$\frac{\partial U}{\partial t} + (\nabla \cdot \vec{V}u) - \frac{\partial}{\partial x}(p\phi_\eta) + \frac{\partial}{\partial \eta}(p\phi_x) = F_U \quad (3.46a)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (\nabla \cdot \vec{V}v) - \frac{\partial}{\partial y}(p\phi_\eta) + \frac{\partial}{\partial \eta}(p\phi_y) = F_V \quad (3.46b)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + (\nabla \cdot \vec{V}w) - g \left(\frac{\partial p}{\partial \eta} - \mu \right) = F_W \quad (3.46c)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + (\nabla \cdot \vec{V}\theta) = F_\Theta \quad (3.46d)$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} + (\nabla \cdot \vec{V}) = 0 \quad (3.46e)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{\mu} [(\vec{V} \cdot \nabla \phi) - gW] = 0 \quad (3.46f)$$

Os termos, F_U , F_V , F_W e F_Θ nas equações 3.46a a 3.46d representam termos de forçamento decorrentes da física do modelo, mistura turbulenta, projecções esféricas e rotação da Terra (Skamarock e Klemp, 2008; Skamarock et al., 2008). As variáveis ϕ e p representam, respectivamente, o geopotencial e a pressão. Define-se, adicionalmente, uma relação de diagnóstico para a densidade inversa, $\alpha = \frac{1}{\rho}$, como:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \eta} = -\alpha\mu \quad (3.47)$$

De modo análogo, para a equação de estado, $p = \rho R_d T$, sendo R_d a constante universal dos gases para o ar seco e T a temperatura, pode escrever-se $p = \frac{R_d T}{\alpha}$. Por outro lado,

partindo da definição de temperatura potencial, $\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{R_D/c_p}$, obtém-se, para a equação de estado:

$$p = p_0 \left(\frac{R_D \theta}{p_0 \alpha} \right)^\gamma \quad (3.48)$$

Na equação 3.48 $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1,4$ representa o quociente entre as capacidades térmica mássica do ar seco a pressão e a volume constantes, respectivamente, e, por outro lado, $R_d = 287,058 \text{ J}/(\text{kg K})$ é a constante universal dos gases para o ar seco.

Tendo em conta que as equações 3.46a a 3.46f não podem ser resolvidas analiticamente, o método utilizado para a discretização espacial consiste na resolução das equações para cada elemento da grelha de cálculo. No ARW é utilizada uma grelha do tipo Arakawa C, conforme ilustra a figura 3.9: as variáveis termodinâmicas (θ) são calculadas nos pontos i, j , no centros da malha, ao passo que as velocidades (u, v, w) são calculadas nos pontos $(i + 1/2, j + 1/2, \eta + 1/2)$

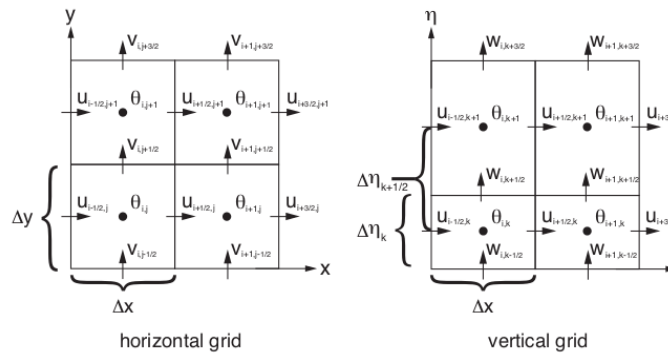


Figura 3.9: Grelhas computacionais horizontal e vertical utilizadas no WRF. Créditos: Skamarock et al. (2008).

No WRF está disponível uma vasta gama de esquemas que representam processos físicos e dinâmicos que não podem ser resolvidos pelas equações apresentadas anteriormente. Tais parametrizações constituem, pois, modelos de representação aproximada destes fenómenos, acopladas ao modelo, por forma a estimar os efeitos dos processos físicos sobre as variáveis determinadas pelo núcleo dinâmico do modelo, modificando os seus valores a intervalos de tempo regulares. As ditas parametrizações disponíveis no WRF, exibidas na tabela 3.1, referem-se a:

- esquemas radiativos de curto e longo comprimento de onda, que tratam as trocas radiativas de curto e longo comprimento de onda, respectivamente;
- esquemas de microfísica, que resolvem os processos de condensação e evaporação no ar;

- esquemas de camada de superfície, que resolvem o atrito e os fluxos de energia sob a forma de calor, de quantidade de movimento e de vapor de água na camada mais próxima do solo;
- esquemas de modelo de superfície do solo, que resolvem as trocas de energia sob a forma de calor e de água no interior do solo;
- esquemas de camada limite planetária, que tratam as trocas turbulentas na camada limite planetária e ao longo da extensão vertical do modelo;
- esquemas de cumulus, que providenciam a resolução de nuvens de origem convectiva.

O WRF suporta aninhamento (*nesting*) horizontal, o que significa que uma (ou mais) grelha(s) pode(m) ser adicionada(s) à simulação, com o objectivo de aumentar a resolução numa região de interesse. A(s) grelha(s) extra deve(m) ser rectangular(es) e alinhada(s) com a malha mais grosseira, sob a qual se aninha(m). As simulações com grelhas aninhadas podem ser obtidas com aninhamento de uma ou duas vias, referindo-se este aspecto à forma como a malha grosseira (*parent domain*) e a malha mais refinada interagem. Em ambos os casos, as condições de fronteira são interpoladas da malha mais grosseira para a malha mais fina. No aninhamento de uma via (*one-way nesting*), esta é a única informação trocada entre as grelhas. No aninhamento de duas vias (*two-way nesting*), as soluções obtidas na grelha de malha mais fina substituem as soluções na malha mais grosseira, para os pontos da grelha mais grosseira que se situam na região delimitada pela grelha mais fina, justificando, assim, a bidireccionalidade da troca de informação entre as grelhas.

Parametrização	Opções disponíveis (WRF V3.1)
Microfísica	<i>Kessler</i> <i>Linn et al.</i> <i>WSM3</i> <i>WSM5</i> <i>Ferrier (new ETA)</i> <i>WSM6</i> <i>Goddard GCE</i> <i>Thompson</i> <i>Morrison</i> <i>WDM5</i> <i>WDM6</i>
Radiação longo c.d.o.	<i>RRTM</i> <i>CAM</i> <i>RRTMG</i> <i>GFDL</i>
Radiação curto c.d.o.	<i>Dudhia</i> <i>Goddard</i> <i>CAM</i> <i>RRTMG</i> <i>GFDL</i>
Camada de superfície	<i>Monin-Obukhov (MM5)</i> <i>Monin-Obukhov (Janjic ETA)</i> <i>QNSE</i> <i>MYNN</i> <i>Pleim-Xiu</i>
Modelo de Superfície do Solo	<i>5-layer thermal diffusion</i> <i>Unified Noah LSM</i> <i>RUC LSM</i>
Camada limite planetária	<i>YSU</i> <i>Mellor-Yamada-Janjic</i> <i>NCEP GFS</i> <i>QNSE</i> <i>MYNN 2.5 level TKE</i> <i>MYNN 3rd level TKE</i> <i>ACM2</i> <i>Bougeault and Lacarrere TKE</i> <i>MRF</i>
Cumulus	<i>Kain-Fritsch (New ETA)</i> <i>Betts-Miller-Janjic</i> <i>Grell-Devenyi</i> <i>New Grell (G3)</i> <i>Old Kain-Fritsch</i>

Tabela 3.1: Conjuntos de parametrizações disponíveis na versão 3.1 do WRF.

Capítulo 4

Detecção Remota e Incêndios Florestais

O quarto capítulo condensa, de forma geral, os princípios físicos inerentes à detecção remota de incêndios florestais. Assim, na primeira secção, apresentam-se os conceitos fundamentais da Detecção Remota. De seguida, contextualiza-se a detecção de incêndios a partir de plataformas orbitais, no contexto da detecção do sinal térmico resultante da biomassa. Na penúltima secção, apresentam-se as metodologias correntemente empregues para a detecção de incêndios a partir do sinal coligido por satélite; na última secção do capítulo, explora-se a evolução histórica dessas técnicas de detecção.

4.1 Conceitos fundamentais

A Detecção Remota, entendida neste contexto como um conjunto de métodos e técnicas destinadas à medição de propriedades físicas de objectos (alvos, doravante) sobre a superfície terrestre a partir de instrumentos a bordo de satélites, permite uma visão periódica, sistemática e consistente do planeta, possibilitando, por intermédio do sinal recebido pelos instrumentos sensores, uma capacidade de monitorização a curto, médio e longo prazos sem precedentes, com inúmeros contributos para as mais variadas áreas do saber, tanto no que se refere à investigação fundamental, como no que à investigação aplicada diz respeito, com impactos por demais evidentes no quotidiano do mundo contemporâneo.

Para ir ao encontro da demanda de vários tipos de utilizadores de dados oriundos de Detecção Remota, inúmeros sistemas têm vindo a ser desenvolvidos, abarcando diferentes metodologias de recolha de informações sobre as propriedades dos alvos sobre a superfície da Terra, diferentes frequências temporais de aquisição de informação e diferentes níveis de detalhe sobre os alvos cujas propriedades são medidas, sem que exista contacto físico entre o alvo e o instrumento de medição.

À luz do parágrafo anterior, devem, de antemão, distinguir-se **sensores activos** como os que, ao utilizarem uma fonte de radiação própria, emitem uma determinada quantidade de energia em direcção a um alvo, com a qual este interage, sendo registado posteriormente o resultado da energia reflectida pelo alvo e respectivas alterações relativamente ao feixe emitido. Por outro lado, os sistemas sensores ditos **passivos** recorrem ao registo da quantidade de radiação reflectida relativamente à radiação que o sol incide sobre o alvo, ou à radiação emitida pelo alvo em virtude da sua temperatura (Lillesand et al., 2008).

Ao abordarem-se as diferentes frequências de aquisição de informação e diferentes níveis de detalhe, urge referir e caracterizar os conceitos de **resolução espectral**, **espacial**, **temporal** e **radiométrica** (Khorram et al., 2012).

A **resolução espectral** relaciona-se com o número e características dos intervalos (bandas) de comprimento de onda captadas pelo sensor, podendo ser definida como a menor porção do espectro electromagnético que o sistema sensor é capaz de segmentar. Já a **resolução espacial** refere-se à área da superfície terrestre observada pelo sistema sensor em cada instante e define a distância mínima para a distinguibilidade entre dois objectos na área observacional coberta pelo sensor. Neste sentido, a distância entre o alvo e o sensor assume particular relevância na determinação do detalhe da informação obtida. No caso dos sensores passivos, a resolução espacial está directamente relacionada com o ângulo do cone de observação que corresponde ao mais elementar elemento da imagem (*pixel*), isto é, com o campo de visão instantâneo (IFOV), na medida em que a resolução espacial máxima de um sensor pode ser obtida através da multiplicação do IFOV pela distância do sensor à superfície. Note-se, todavia, que o IFOV não constitui um indicador exclusivo das dimensões do menor objecto detectável. Conforme se referirá ao longo deste capítulo, o conceito de *subpixel* ilustra a detectabilidade de um elemento de dimensões inferiores às do *pixel*, tendo em conta o forte contraste com a região em redor do elemento, dentro do *pixel*, modificando, assim, a radiação global do *pixel* e tornando-se, portanto, detectável.

A **resolução temporal** de um sistema de detecção remota é definida como o intervalo de tempo decorrido entre duas observações consecutivas do mesmo local sobre a superfície terrestre, equivalendo, portanto, à duração de um ciclo orbital completo do satélite. Por último, a **resolução radiométrica**, expressa normalmente em *bits*, está relacionada com a sensibilidade do sensor em discriminar pequenas variações da energia recebida.

Em Detecção Remota, a radiação electromagnética é, em conformidade com o discurso dos parágrafos anteriores, o agente possibilitador da aquisição de informação sobre o alvo cujas propriedades físicas se pretende quantificar. Nesse sentido, atente-se que a radiação electromagnética, cujo espectro se ilustra na figura 4.1, está envolvida em diversas interacções.

Considere-se, em primeiro lugar, que, antes de a radiação solar atingir a superfície

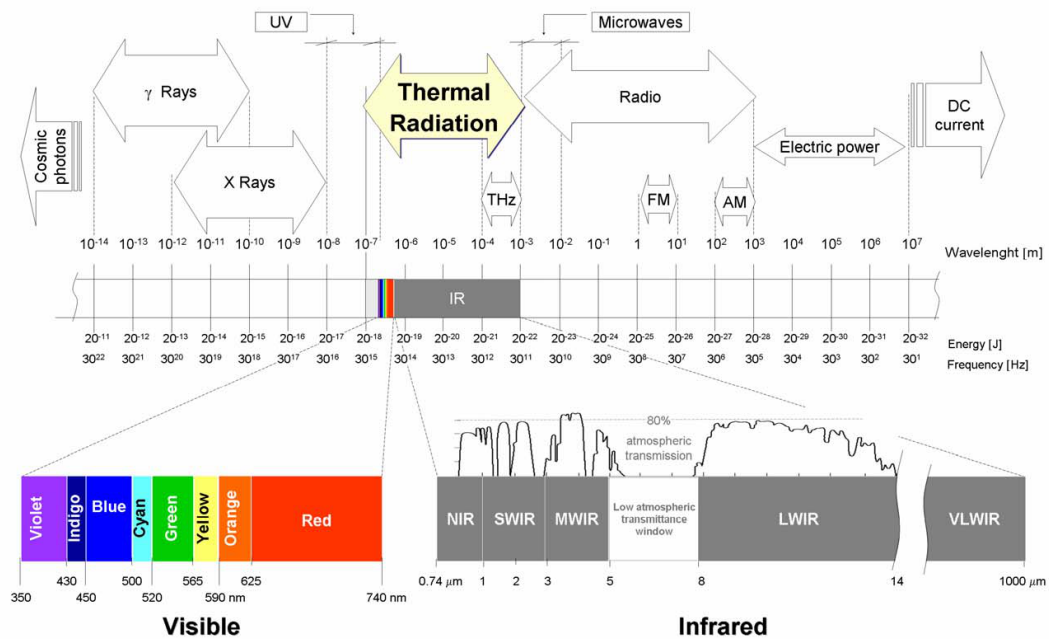


Figura 4.1: Espectro electromagnético. Crédito da imagem: Ibarra-Castanedo (2005, p. 128).

terrestre, a atmosfera irá exercer influência sobre ela. Reciprocamente, também a atmosfera terrestre irá influenciar a radiação emitida por um alvo antes de esta ser detectada por um sistema sensor.

Dada a composição da atmosfera terrestre, maioritariamente por azoto e oxigénio e tendo em conta a existência de vapor de água e aerossóis, os processos físicos mais relevantes são a dispersão e a absorção, muito embora se deva reconhecer que as alterações efectuadas sobre a radiação electromagnética possam variar com o comprimento de onda, estado da atmosfera e ângulo zenital solar, isto é, o ângulo entre a radiação solar com a normal ao plano onde incide. No que à dispersão diz respeito, devem ser consideradas a dispersão de Rayleigh, de Mie e a dispersão não-selectiva.

Enquanto que a dispersão de Rayleigh é devida às moléculas com dimensões muito inferiores às do comprimento de onda da radiação (tipicamente, $\frac{1}{10}\lambda$), a dispersão de Mie ocorre para comprimentos de onda da mesma ordem de grandeza das dimensões das partículas da atmosfera, tipicamente aerossóis e, em particular, poeiras. Já a dispersão não-selectiva é originada por partículas de dimensões superiores aos comprimentos de onda envolvidos. Exemplos típicos de dispersores não-selectivos são as gotículas de água nas nuvens. No seu conjunto, os processos de dispersão são responsáveis pela formação da radiação difusa.

A absorção da radiação por parte da atmosfera ocorre quando os gases que a compõem atenuam a transmissão da radiação ao longo da atmosfera, tornando-a opaca para certos intervalos de comprimento de onda, conforme se ilustra na figura 4.2.

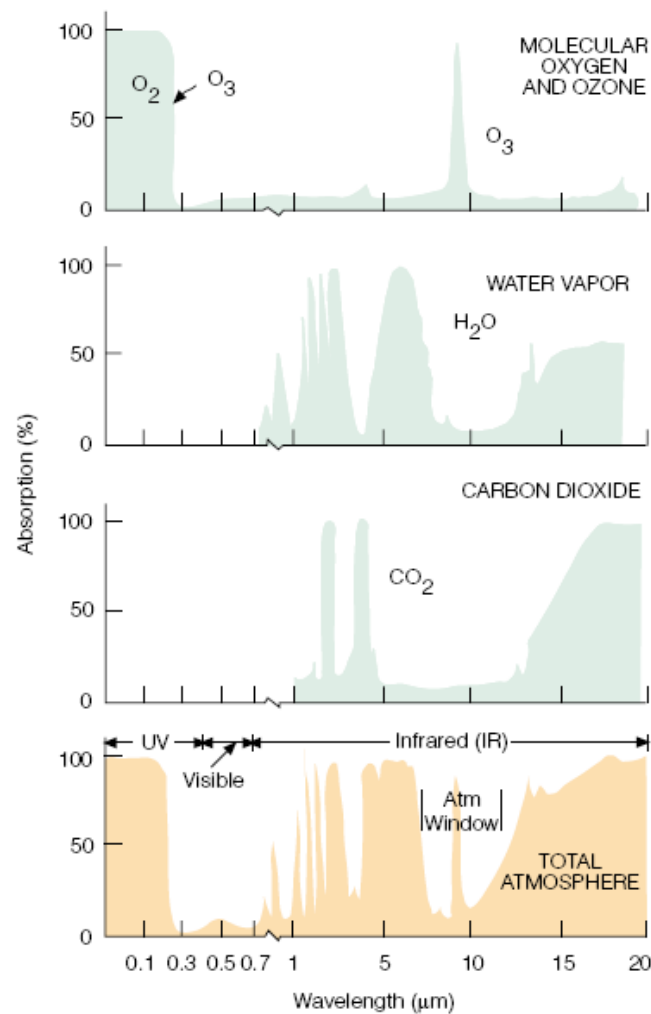


Figura 4.2: Absorção da radiação pelos principais gases presentes na atmosfera. Crédito da imagem: Ahrens (2011, p. 36).

O ozono, formado pela interacção da componente ultra-violeta da radiação solar com as moléculas de oxigénio na estratosfera, possui forte absorvência nos curtos comprimentos de onda ($\lambda < 0,24 \mu\text{m}$). Já o dióxido de carbono absorve radiação nas componentes do infravermelho médio (MIR) e longínquo (FIR) do espectro electromagnético, com um máximo de absorvência na região compreendida entre os 13 e os 17,5 μm do espectro. O vapor de água possui, igualmente, elevada absorvência no infravermelho, sendo de destacar as bandas de absorção entre os 5,5 e os 7,0 μm , bem como na região de comprimentos de onda do espectro electromagnético superiores a 27 μm .

Por análise da figura 4.2, é possível verificar a existência de regiões do espectro electromagnético onde a absorvência da atmosfera é reduzida (ou, reciprocamente, a sua transmitância é mais elevada): a janela solar ($0,3 < \lambda < 1 \mu\text{m}$) e a janela atmosférica entre os 8 e os 11 μm .

Considerando, por outro lado, a interacção da radiação com os objectos sobre a superfície terrestre, há que reconhecer que estes podem promover a reflexão, a absorção e/ou a transmissão da radiação electromagnética que sobre eles incida, sendo a predominância de cada um dos fenómenos determinada pelas propriedades do objecto. Deste modo, no espectro do visível ($0,4 < \lambda \leq 0,7 \mu\text{m}$), infravermelho próximo (NIR, com $0,7 < \lambda \leq 1,5 \mu\text{m}$) e infravermelho médio (SWIR, com $1,5 < \lambda \leq 3 \mu\text{m}$), é usual medir-se a quantidade da radiação solar incidente sobre o objecto que é reflectida por este, isto é, a reflectância. Por outro lado, e reconhecendo que todos os corpos a temperatura superior a 0 K emitem radiação, a potência radiada numa dada direcção, por unidade de ângulo sólido e por unidade de área projectada da fonte radiante, no ângulo de visão do sistema sensor, isto é, a radiância, é detectada pelos dispositivos sensores na banda espectral do infravermelho térmico (MWIR, LWIR, VLWIR, com $3 < \lambda \leq 14 \mu\text{m}$).

A figura 4.3 ilustra a resposta espectral de algumas superfícies comuns na gama de comprimentos de onda até aos 3 μm . Conforme se pode apreciar, a água absorve a maior parte da radiação incidente naquela faixa de comprimentos de onda, reflectindo apenas uma pequena porção da radiação, em particular na gama visível do espectro electromagnético. Os solos, por sua vez, apresentam uma resposta em reflectância dependente dos seus constituintes e do teor em água, o que justifica igualmente o decréscimo da reflectância na gama do infravermelho médio, bem como o facto de o solo húmido possuir uma menor reflectância que o solo seco. Já a vegetação possui, de uma forma geral, uma curva de resposta espectral em reflectância característica: a reflectância no visível é, em geral, baixa, devido à absorção desta gama de comprimentos de onda por parte da clorofila, sobretudo no que diz respeito às bandas do azul e do vermelho. No infravermelho próximo, a absorção da radiação não assume expressão, pelo que a reflectância nesta faixa do espectro é elevada. Na região do infravermelho médio, a influência do teor em água faz-se sentir, o que justifica

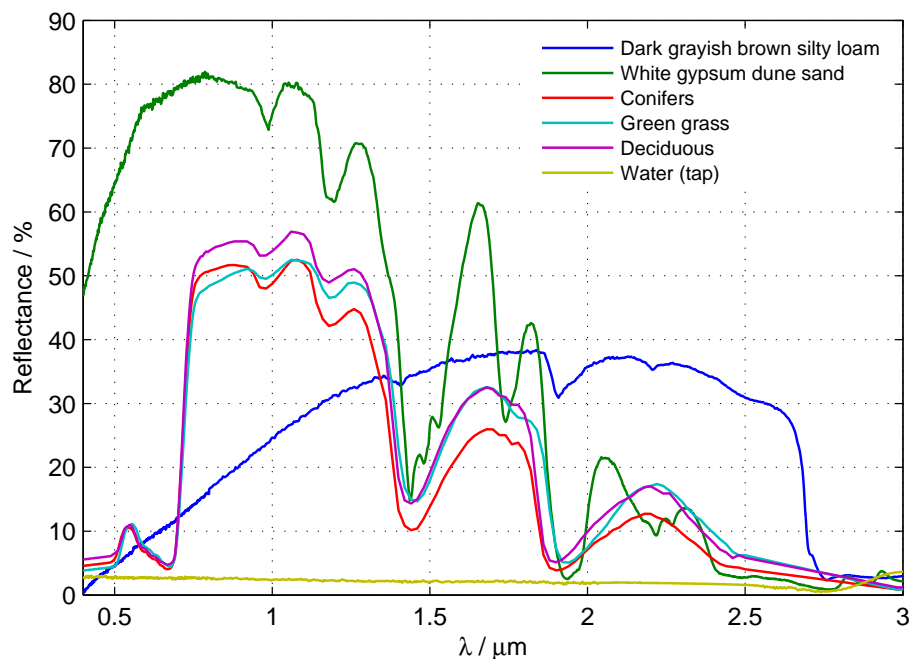


Figura 4.3: Curvas de resposta espectral para diferentes alvos sobre a superfície terrestre. Fonte dos dados: ASTER Spectral Library Version 2.0 (Baldrige et al., 2009).

o decréscimo da reflectância (Campbell, 2011).

As grandezas fundamentais utilizadas em Detecção Remota podem sistematizar-se na tabela 4.1, adaptada de Schaepman-Strub et al. (2006); já as grandezas geométricas referidas na tabela 4.1 são sistematizadas sumariamente na figura 4.4.

4.2 Base Física da detecção remota de incêndios florestais

A detecção remota de incêndios florestais baseia-se, fundamentalmente, na medição de radiação electromagnética emitida por objectos na superfície terrestre em diferentes comprimentos de onda na região do infravermelho do espectro electromagnético (tipicamente entre 3 a 5 μm e de 8 a 14 μm, bandas em que a atmosfera é praticamente transparente e o sinal térmico é fracamente atenuado pela absorção atmosférica), registada por sensores passivos.

Assim, e de forma global, pode dizer-se que a formulação genérica do problema da detecção remota de incêndios florestais assenta na teoria da radiação de um corpo negro, uma fonte de energia hipotética que absorve e reemite toda a radiação incidente. Deste modo, recorde-se que toda a matéria a temperaturas superiores a 0 K emite radiação electromag-

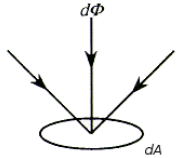
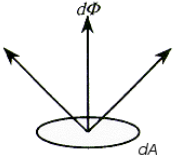
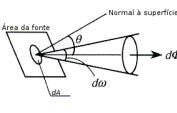
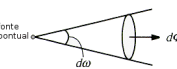
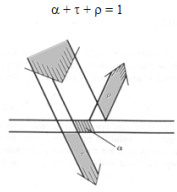
Grandeza	Símbolo	Definição	Significado Físico	Unidades (SI)	Representação esquemática
Energia Radiante	Q		Energia associada à radiação electromagnética.	J	
Fluxo Radiante	Φ	$\Phi = \frac{dQ}{dt}$	Energia Radiante por unidade de tempo.	W	
Irradiância	E	$E = \frac{d\Phi}{dA}$	Energia Radiante incidente numa secção unitária, por unidade de tempo.	$W.m^{-2}$	
Exitância	M	$M = \frac{d\Phi}{dA}$	Fluxo radiante emitido por uma fonte extensa, por unidade de área projectada, para um dado hemisfério.	$W.m^{-2}$	
Radiância	L	$L = \frac{d^2\Phi}{dA \cos\theta d\omega}$	Fluxo radiante emitido ou transmitido na direcção radial, por unidade de ângulo sólido, por unidade de área projectada.	$W.m^{-2}.sr^{-1}$	
Intensidade radiante	I	$I = \frac{d\Phi}{d\omega}$	Fluxo radiante emitido por uma fonte pontual, por unidade de ângulo sólido.	$W.sr^{-1}$	
Reflectância	ρ	$\rho = \frac{\pi I}{E}$	Fracção da irradiância reflectida pela superfície.		
Absortância	α		Fracção da irradiância absorvida pela superfície.		
Transmitância	τ		Fracção da irradiância transmitida pela superfície.		

Tabela 4.1: Grandezas fundamentais utilizadas em Detecção Remota, respectivas unidades de medida e esquematização.

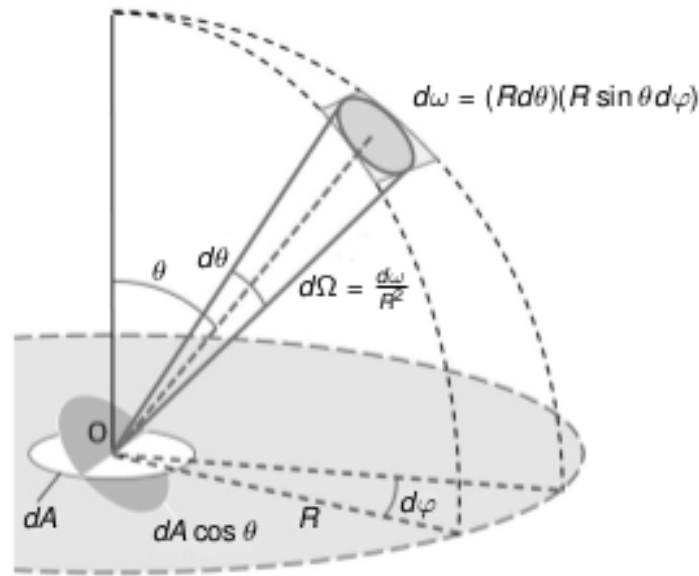


Figura 4.4: Grandezas geométricas inerentes à definição das grandezas fundamentais utilizadas em Detecção Remota. Adaptado de Matsapey et al. (2013).

nética, sendo que a distribuição espectral da exitância, ou seja, a taxa de transferência de energia radiante por unidade de tempo, por unidade de área ($\frac{\partial \Phi}{\partial A}$) de um corpo negro a tal temperatura, T , é determinada pela Lei de Planck, que estabelece que (Palmer, 2010):

$$M_{(\lambda, T)} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} \quad (4.1)$$

Note-se que, a exitância, M , e a radiância, L , se relacionam, assumindo que a radiação é isotrópica e que, portanto, a radiância é independente da direção, a partir de:

$$M = L \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\phi=0}^{2\pi} \cos \theta d\Omega = \pi L \quad (4.2)$$

Por outro lado, a quantidade total de energia, por unidade de área e por unidade de tempo, emitida por um corpo negro a uma dada temperatura pode ser expressa pela Lei de Stefan-Boltzmann enunciada na equação 4.3, que resulta, obviamente, da integração da Lei de Planck (equação 4.1) sobre todos os comprimentos de onda:

$$M_{Total} = \int_{\lambda=0}^{\infty} M_{\lambda, T} d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4 \quad (4.3)$$

Na equação 4.3, $M = \frac{\partial \Phi}{\partial A}$ é utilizado para designar a exitância, isto é, a quantidade de energia por unidade de tempo e por unidade de área que atravessa uma super-

fície (em W/m^2) e σ representa a constante de Stefan-Boltzmann, cujo actual valor é $5,6704 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$.

Note-se, todavia, que a quantidade total de energia emitida pelo corpo negro abarca todo o espectro electromagnético, isto é, os corpos negros emitem radiação em todo o espectro electromagnético ao invés de em comprimentos de onda discretos, pelo que se torna necessário considerar a Lei do deslocamento de Wien, que determina o comprimento de onda λ_{max} para o qual a radiação emitida por um corpo negro a uma determinada temperatura atinge o seu máximo:

$$\lambda_{max} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{T} \quad (4.4)$$

A figura 4.5, que pretende representar a exitância espectral, $M_{(\lambda, T)}$, conforme a equação 4.1, permite, de imediato, reconhecer a faixa em torno dos $4 \mu\text{m}$ como extraordinariamente útil para as temperaturas envolvidas nos incêndios florestais, na ordem dos 600 a 1400 K (Wotton et al., 2012):

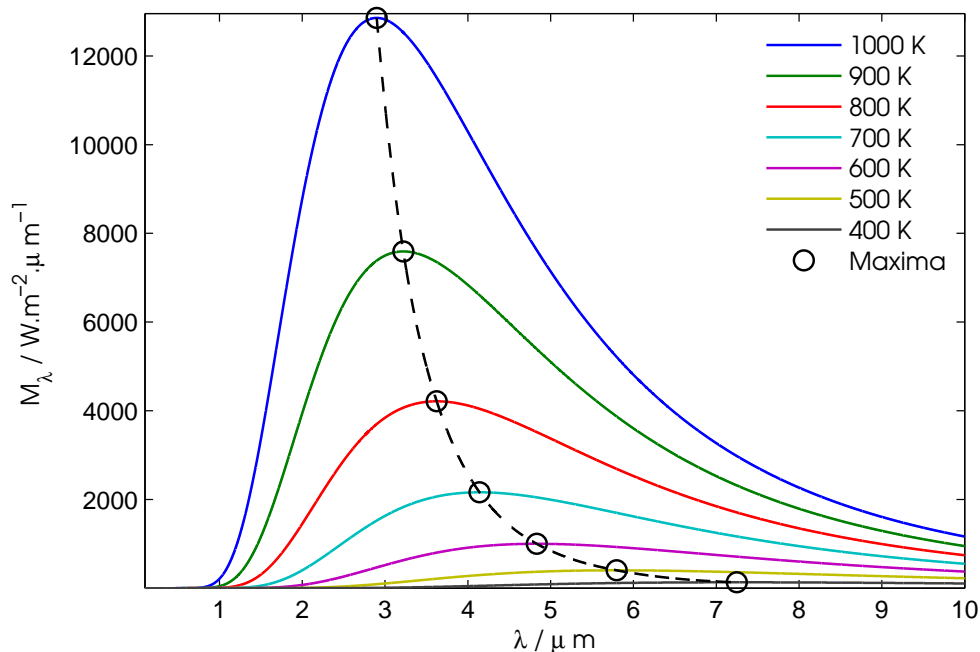


Figura 4.5: Traçado gráfico da exitância espectral de corpos negros a diferentes temperaturas e da linha que une os picos de máximos de intensidade de radiação emitida.

4.3 Descrição geral dos algoritmos de detecção de incêndio

Tendo em conta a grande quantidade de algoritmos de detecção de focos de incêndio existentes na literatura, surge a necessidade de os caracterizar e descrever basicamente de acordo com algumas características próprias. Deste modo, a maioria dos algoritmos de detecção de incêndio pode ser agrupada em três grandes categorias, conforme exposto em Carvalheiro (2006):

1. Algoritmos de *threshold* mono-canal;
2. Algoritmos de *threshold* multi-canal;
3. Algoritmos contextuais, que comparam o potencial pixel de fogo com as propriedades térmicas do fundo da cena.

Note-se que, neste contexto, os algoritmos mono e multicanal possuem valores limiares fixos, ao passo que os algoritmos contextuais possuem limiares variáveis. De seguida, apresentam-se as características gerais de cada um dos tipos de algoritmos referidos anteriormente.

4.3.1 Algoritmos de *threshold* mono-canal

Os algoritmos de *threshold* mono-canal baseiam-se, tipicamente, num canal no infravermelho médio. De acordo com a função de Planck, a emissão de energia por radiação térmica atinge um valor máximo para temperaturas típicas que vão desde 500 a 1000 K.

Acontece, porém, que certos canais dos sensores a bordo dos satélites podem saturar para temperaturas de brilho inferiores à temperatura atingida pelo foco de incêndio. No caso do sensor AVHRR, para a sua segunda versão, essa temperatura de brilho localiza-se entre 320 e 331 K, no canal 3 (centrado em torno dos 3,75 μm). Na terceira versão do AVHRR, a calibração anterior ao lançamento, permitia valores de temperaturas de brilho no canal 3B até cerca de 335 K. Já no caso do sensor SEVIRI, a bordo dos satélites MSG, o canal 4, centrado em 3,9 μm , satura para uma temperatura de brilho de cerca de 336 K.

Assim, pode referir-se que a utilização destes comprimentos de onda disponibilizados nos diferentes radiómetros se reveste de extrema utilidade para a detecção de focos de incêndio activos, em especial para a região de Portugal, em virtude do seu clima ameno (quando comparado com as regiões de África, por exemplo).

Não obstante, uma ligeira contrariedade surge na monitorização de incêndios ao longo do dia, dado que há que levar em consideração a reflectividade imposta quer por nuvens

quer por superfícies lisas e brilhantes. Por outro lado, deve dar-se especial atenção ao valor de *threshold* escolhido, na medida em que este pode variar de acordo com o tipo de cobertura do solo.

4.3.2 Algoritmos de *threshold* multi-canal

De forma a ultrapassar algumas limitações inerentes aos algoritmos mono-canal, foram desenvolvidos os algoritmos multi-canal. Basicamente, a grande maioria destes algoritmos consiste em três etapas:

1. Utilização de um canal para identificar todos os potenciais fogos;
2. Utilização de outro canal, também no infra-vermelho médio para eliminar nuvens;
3. Usar a diferença entre as temperaturas de brilho registadas nos dois canais para isolar os fogos do fundo quente da imagem.

Note-se que, apesar destes algoritmos permitirem uma distinção mais rigorosa entre situações de fogo e não-fogo, não contemplam ainda a possibilidade de distinguir a presença de superfícies altamente reflectoras. Não obstante, estes algoritmos têm sido usados para aplicações regionais ou mesmo continentais com bastante êxito, em biomas como, por exemplo, a Savana do Oeste Africano e florestas boreais. É importante referir que, para além dos três testes básicos expostos anteriormente, podem ser efectuados testes adicionais, de forma a dar conta de diferentes tipos de nuvens, por exemplo.

Dos algoritmos de *threshold* multi-canal mais utilizados refira-se, nomeadamente, o de Kennedy et al. (1994), baseado em limiares fixos para as temperaturas de brilho nos canais 3 e 4 do AVHRR para identificação de alvos quentes, e na reflectividade do canal 2 para a remoção de superfícies altamente reflectoras. Neste modelo, um pixel é identificado como fogo se:

$$\left\{ \begin{array}{l} BT_{CH_3} \geq 320 \text{ K} \\ BT_{CH_4} \geq 295 \text{ K} \\ BT_{CH_3} - BT_{CH_4} \geq 15 \text{ K} \\ R_{CH_2} \leq 0,16 \end{array} \right. \quad (4.5)$$

4.3.3 Algoritmos contextuais

Os algoritmos contextuais visam expandir a capacidade dos algoritmos multi-canal anteriormente referidos, e, em vez de fazerem uso de limiares fixos ao longo da região em

estudo, efectuam uma abordagem mais localizada, determinando assim *thresholds* variáveis, específicos dos *pixels* em estudo. Esta tarefa envolve duas etapas: em primeiro lugar, o estabelecimento dos limiares para a identificação de potenciais focos de incêndio, e, em segundo lugar, o ajuste fino dos limiares para a confirmação efectiva da ocorrência de incêndios em torno da detecção inicial.

Deste modo, os testes efectuados na primeira etapa do algoritmo são, de certa forma, similares aos efectuados nos algoritmos multi-canal, salvaguardando alguma flexibilidade do *threshold* imposto, por forma a evitar a não-deteção de verdadeiros focos de incêndio. Já a segunda etapa engloba uma abordagem estatística, determinando-se a média e o desvio-padrão das variáveis de *threshold* a partir de *pixels* de incêndio não-potenciais envolvendo potenciais *pixels* de incêndio. Após obtenção das variáveis estatísticas, procede-se à sua utilização para a redefinição do *threshold* para a confirmação de um incêndio.

Os pressupostos básicos inerentes aos algoritmos de detecção contextuais generalizam-se na equação 4.6, de acordo com Cuomo et al. (2001); Calle e Casanova (2012):

$$\begin{cases} BT_{MIR} > \mu_{MIR} + f \times \sigma_{MIR} \\ BT_{MIR} - BT_{TIR} > \mu_{(MIR-TIR)} + f \times \sigma_{(MIR-TIR)} \\ R_{NIR} < \mu_{NIR} - f \times \sigma_{NIR} \end{cases} \quad (4.6)$$

Na equação anterior, μ e σ representam os valores da média e do desvio-padrão no entorno do pixel analisado, sendo f um factor numérico estabelecido. O ambiente em torno do qual se determinam os parâmetros estatísticos anteriormente referidos é analisado numa janela de $N \times N$ pixels, sendo N , frequentemente, um número ímpar dependente do sensor a que o algoritmo é aplicado (Calle e Casanova, 2012).

Um exemplo de algoritmo contextual é o proposto por Flasse e Ceccato (1996), conforme Cuomo et al. (2001). O procedimento de detecção de focos de incêndio activos baseia-se em duas etapas. A primeira etapa selecciona potenciais pixels de fogo utilizando limiares para os canais 2 e 3 do AVHRR e para a diferença de temperatura de brilho entre os canais 3 e 4:

$$\begin{cases} BT_{CH_3} \geq 311 \text{ K} \\ BT_{CH_3} - BT_{CH_4} \geq 8 \text{ K} \\ R_{CH_2} < 0,2 \end{cases} \quad (4.7)$$

Numa segunda etapa, os potenciais pixels de fogo são confirmados ou excluídos mediante

o uso de informação contextual sobre a vizinhança, obtida através de:

$$\begin{cases} (BT_{CH_3} - BT_{CH_4})_{PF} > \mu_{(BT_{CH_3}-BT_{CH_4})_B} + \sigma_{(BT_{CH_3}-BT_{CH_4})_B} \\ BT_{CH_3PF} - [\mu_{BT_{CH_3B}} + 2\sigma_{BT_{CH_3B}}] > 3 K \end{cases} \quad (4.8)$$

Na equação 4.8, escrita anteriormente, PF designa um potencial foco de incêndio e B representa a vizinhança do pixel, ao passo que $\mu_{BT_{CH_3B}}$, $\sigma_{BT_{CH_3B}}$, $\mu_{(BT_{CH_3}-BT_{CH_4})_B}$ e $\sigma_{(BT_{CH_3}-BT_{CH_4})_B}$ representam, respectivamente, a média e o desvio-padrão da temperatura de brilho no canal 3 do AVHRR e a média e o desvio-padrão da diferença entre as temperaturas de brilho no canal 3 e 4 do AVHRR, numa janela, centrada num potencial pixel de fogo, de dimensão variável entre os 3×3 e os 15×15 pixels.

4.4 Evolução do processo de detecção de focos de incêndio por satélite

O uso de plataformas orbitais para a monitorização de ocorrências de fogos florestais remonta aos anos oitenta do século XX, a partir dos trabalhos pioneiros de Dozier (Dozier, 1981), que estabeleceu os primeiros esforços para a identificação de anomalias térmicas ao nível do *subpixel*, empregando as diferentes respostas dos canais na banda dos 3 e dos 11 μm do radiómetro AVHRR.

No modelo teórico de Dozier, o ponto de partida reside no facto de que, nos pressupostos de que a atmosfera não tem influência no sinal detectado pelo radiómetro e que o fogo se comporta como um corpo negro, a radiância integrada no canal 3 aumenta, com o aumento da temperatura, numa maior proporção que a mesma quantidade no canal 4, em perfeito acordo com a Lei do deslocamento de Wien.

A primeira aplicação do modelo teórico de Dozier a dados reais fez-se com a detecção de alvos quentes industriais em Detroit, bem como de fochos resultantes da queima de resíduos industriais no Golfo Pérsico (Matson e Dozier, 1981). De forma análoga, usando, todavia, dados de detecção nocturna, Muirhead e Cracknell (1984) detectaram com êxito chamas de gás em oleodutos no mar do Norte. Os mesmos autores destacaram-se, aliás, entre os primeiros na detecção de fogos em vegetação.

Matson et al. (1984) dedicaram-se ao estudo de diversas ocorrências de incêndios, tendo sido capazes de detectar algumas ocorrências no Brasil e nos EUA, com dados de detecção diurna do AVHRR. Com este estudo, os autores demonstraram a adequabilidade do sensor AVHRR para a detecção de alvos quentes. Todavia, os métodos aplicados careciam de inspecção manual com a verdade terrestre, pelo que não se demonstraram talhados para a detecção de incêndios a larga escala.

A primeira aplicação automatizada do uso do AVHRR para detecção de incêndios florestais data de meados dos anos oitenta do século XX (Flannigan, 1985; Flannigan e Von der Haar, 1986). Comparando os resultados do método de detecção com dados recolhidos *in situ* durante um evento severo em Alberta, no Canadá, os autores obtiveram como resultado a capacidade de detectar correctamente 80% dos fogos, quando não cobertos por nuvens ou fumo.

As limitações da detecção de focos de incêndio activos por via do sensor AVHRR foram alvo de vários estudos de caso, debruçando-se, por exemplo, sobre a ocultação do fogo por plumas de fumo (Matson e Holben, 1987; Matson et al., 1987), problemas relacionados com a extensão do modelo de Dozier à reflectividade e emissividade da superfície de áreas recentemente ardidas (Langaas e Muirhead, 1989).

Uma abordagem distinta à detecção automatizada de incêndios com o AVHRR foi proposta por Lee e Tag (1990), após análise de dados do Golfo Pérsico e da região de S. Francisco (EUA). Ao invés da abordagem de Dozier, que se centra na identificação da temperatura do fogo mediante observação, os autores estabeleceram, intuitivamente, um valor de temperatura admissível para um incêndio. Posteriormente, empregaram o modelo de Dozier para obter uma tabela contendo medições de satélite representativas de detecções de incêndio válidas.

A primeira aplicação da detecção de incêndios com o AVHRR ao nível operacional, à escala regional, foi implementada no Brasil, por Setzer e Pereira (1991), que, desde 1989, monitorizavam cuidadosamente a época de incêndios nesse país. A técnica de detecção de incêndios utilizada por estes autores consistiu num limiar fixo de temperatura na banda dos 3,7 μm para a identificação de *pixels* que pudessem conter focos de incêndio activos, a par com a inspecção visual dos dados na banda dos 0,64 μm para a detecção de plumas de fumo. Na eventual falta de correspondência entre um *pixel* contendo potencialmente fogo e pluma de fumo, o *pixel* seria, pois, rejeitado. A metodologia empregue pelos autores revelou, para a época de incêndios de 1989 no Brasil, que 96% dos incêndios detectados foram positivamente confirmados por equipas no terreno (Kaufman et al., 1998). Flasse e Ceccato (1996) propuseram um algoritmo contextual para o AVHRR que, ao contrário das metodologias existentes à data, procedia à detecção de incêndios não por *thresholds* fixos mas antes pela comparação de *pixels* com a vizinhança. O algoritmo proposto era auto-adaptativo, sendo, pois, consistente ao longo de diferentes áreas e diferentes estações. Não obstante, Ravail e San-Miguel-Ayanz (2002) procederam à avaliação da performance do algoritmo proposto por Flasse e Ceccato, tendo por base dados do AVHRR sobre Espanha, em 1997 e 1998, tendo verificado que mais de 90% dos incêndios detectados constituíam falsos alarmes.

Arino e Melinotte (1998) efectuaram um conjunto de detecções por intermédio do

canal do AVHRR a operar nos 3,9 μm , com temperaturas de brilho na ordem dos 320 K, por um conjunto de testes de *thresholds* fixos, culminando com uma comparação com o índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI). Uma abordagem diferente foi encetada por Lasaponara et al. (1998), que propuseram um algoritmo contextual em que os limiares obtidos mediante a estimativa por métodos estatísticos não consideravam apenas a dimensão espacial, mas também a sua evolução temporal, fazendo uso de imagens de dias anteriores. O algoritmo proposto foi, posteriormente, sujeito a análises adicionais (Lasaponara et al., 2003), tendo sido aplicado a diferentes regiões do Norte e Sul de Itália, com uma eficácia de detecção de cerca de 80% e uma taxa de falsos alarmes na ordem dos 15%.

Um marco importante na comparação entre três diferentes metodologias de detecção de incêndios à escala global foi estabelecido com o trabalho de Giglio et al. (1999). Nesta obra foram determinados, simulando dados AVHRR para um vasto leque de biomas e condições de observação, em condição de ocorrência de fogos florestais, os limites mínimos de detectabilidade de incêndios por intermédio do AVHRR: 1000 m^2 para incêndios em combustão lenta (*smoldering*) à temperatura de 600 K e cerca de 100 m^2 para incêndios em fase de combustão flamejante, tipicamente à temperatura de 900 K. De igual modo, o estudo demonstrou o limite superior de temperatura e tamanho de fogos, no que às detecções por intermédio do AVHRR diz respeito. Segundo os autores, a detecção de fogos com o AVHRR torna-se problemática para incêndios maiores que 1 ha devido à saturação do sensor. Para além disso, os autores concluíram que algoritmos de *threshold* fixos não seriam adequados à detecção de incêndios à escala global, na medida em que requerem um ajusto fino para diferentes regiões do globo. Por último, propuseram uma versão melhorada do algoritmo desenvolvido por Justice et al. (1996), possibilitando uma melhor detecção de ocorrências e minimizando falsas detecções na maior parte dos biomas (Goessmann, 2007).

Li et al. (2000) apresentaram um algoritmo de detecção multi-canal de *thresholds* fixos, em que sucessivos testes constituem máscaras para identificação de potenciais focos de incêndio e remoção de falsos alarmes. O método proposto foi aplicado a mosaicos sobre o Canadá, construídos por composição de imagens diárias do satélite NOAA-14, para um período de 5 anos, compreendido entre 1994 e 1998, tendo verificado que o algoritmo permitia a detecção da maioria das ocorrências, não ocultadas pela presença de nuvens espessas. Porém, as estatísticas obtidas pelos autores reportam uma subestimação da área ardida total na ordem de 35%, para o período em análise, que os autores justificam pela cobertura de nuvens e resolução temporal do AVHRR.

Algumas das lacunas inerentes à detecção de incêndios por intermédio de sinal coligido por satélites de órbita polar, nomeadamente, a sua relativamente baixa resolução temporal pretenderam ser mitigadas com o uso de satélites de órbita geostacionária que, numa órbita a

36000 km acima da superfície da Terra, capacitam a monitorização contínua da mesma área sobre a superfície terrestre, a expensas de uma menor resolução espacial, comparativamente aos satélites de órbita polar.

A utilização de satélites de órbita geostacionária para a monitorização de fogos florestais remonta ao final dos anos oitenta do século XX, a partir das iniciativas do Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies (CIMSS) da Universidade de Wisconsin-Madison, utilizando os dados do Visible Infrared Spin Scan Radiometer Atmospheric Sounder (VAS) a bordo do satélite Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) 7, segundo a abordagem de Dozier (Prins e Menzel, 1992). Com o lançamento para o espaço do GOES-8, em 1994, e, sobretudo, dadas as melhorias introduzidas no radiómetro a bordo (Imager), foi possível tornar operacional o algoritmo de detecção de incêndios Automated Biomass Burning Algorithm (ABBA) no continente americano. Subsequentes desenvolvimentos deram origem ao WFABBA, que se mantém operacional desde 2000, providenciando, em regime operacional, produtos de detecção de focos de incêndio activos para o hemisfério oeste, baseados nos dados coligidos nas bandas do visível, 3,9 e 10,7 μm (Koltunov et al., 2012) dos satélites GOES.

O lançamento do satélite Meteosat 8 (MSG-1), o primeiro satélite da série Meteosat Second Generation, da Eumetsat, em 2002, consubstanciou uma mais-valia para a detecção e monitorização de incêndios em tempo quase real sobre os continentes europeu e africano, dadas as características em termos de resolução temporal, de 15 minutos, de resolução espacial, de 3 km no nadir, e de resolução espectral, de doze canais, do radiómetro SEVIRI. Fazendo uso da elevada resolução temporal das imagens adquiridas pelo radiómetro SEVIRI, Laneve et al. (2006) propuseram uma estratégia de detecção baseada na comparação de imagens sucessivas para a identificação de mudanças de temperatura atribuídas a incêndios em curso. Numa linha de raciocínio similar, Calle et al. (2006) desenvolveram uma metodologia de identificação de incêndios sobre a Península Ibérica, bem como uma aferição dos limites de detectabilidade de fogo com o radiómetro SEVIRI. Roberts e Wooster (2008) implementaram um algoritmo de detecção do tipo contextual aplicado aos dados SEVIRI para aplicação no continente africano, ilustrando uma boa concordância entre o algoritmo desenvolvido e os resultados obtidos pelo produto de detecção de incêndios MODIS. Hassini (2009) desenvolveu o Active Fire Monitoring Algorithm (AFMA), um algoritmo que constituiu a base do produto de detecção de fogos activos da EUMETSAT, conjugando testes de limites fixos com técnicas de análise contextual. Amraoui et al. (2010) propuseram uma metodologia operacional de detecção de incêndios sobre África (FiDALgo) assente em técnicas contextuais, tendo demonstrado, por um lado, a coerência entre os resultados do algoritmo e os resultados do produto de detecção de incêndios MODIS e, por outro, que a distribuição da duração temporal dos incêndios florestais segue uma relação de potência.

Capítulo 5

Detecção de Incêndios com base no produto FIR, da EUMETSAT

Ao longo deste capítulo dá-se a conhecer uma ferramenta de visualização de focos de incêndio activos, recorrendo ao produto FIR, da EUMETSAT, disponibilizado via EUMETCast. A ferramenta de visualização assim desenvolvida faz uso da tecnologia Google Maps/Google Earth para a disponibilização, em tempo quase-real, dos focos de incêndio detectados pelo produto FIR, sobre o horizonte de visão dos satélites EUMETSAT, constituindo-se, assim, como uma aplicação de elevado interesse, a par com outras, já existentes. O trabalho inerente ao desenvolvimento desta ferramenta é discutido numa publicação do autor (Carvalho et al., 2010); à data, uma metodologia de validação dos resultados obtidos não fora apresentada, tendo em conta que o processo de validação de resultados se encontrava em curso. Na sexta secção deste capítulo, após se proceder à apresentação da estação de recepção MSG da Universidade de Aveiro, descrição do produto FIR e do processo de implementação da ferramenta e ilustração de alguns exemplos de utilização da ferramenta desenvolvida, efectua-se a validação das detecções de focos de incêndio activos em Portugal Continental, com recurso aos dados do produto de detecção de incêndios assente em dados MODIS, para alguns períodos específicos da época de incêndios de 2010.

5.1 A Estação de Recepção *EUMETCast* da Universidade de Aveiro

A estação de recepção *EUMETCast* da Universidade de Aveiro, colocada em funcionamento em 2005, no seguimento do plano de trabalhos do Mestrado em Física Aplicada do autor, consubstancia uma via de acesso privilegiada a uma miríade de dados ambientais

(Carvalho, 2006).

O sistema EUMETCast constitui um nó regional, para a Europa e África, do sistema de distribuição de dados GEONETCast, uma iniciativa que preconiza um sistema de disseminação, baseada em satélites, de dados ambientais coligidos por plataformas orbitais e/ou sensores no terreno e que se insere no programa Global Earth Observation System of Systems (GEOSS). Paralelamente, o sistema EUMETCast constitui uma contribuição da EUMETSAT para o Integrated Global Data Dissemination Service (IGDS), uma componente do serviço de informação da WMO, com a cobertura que se assinala na figura 5.1.

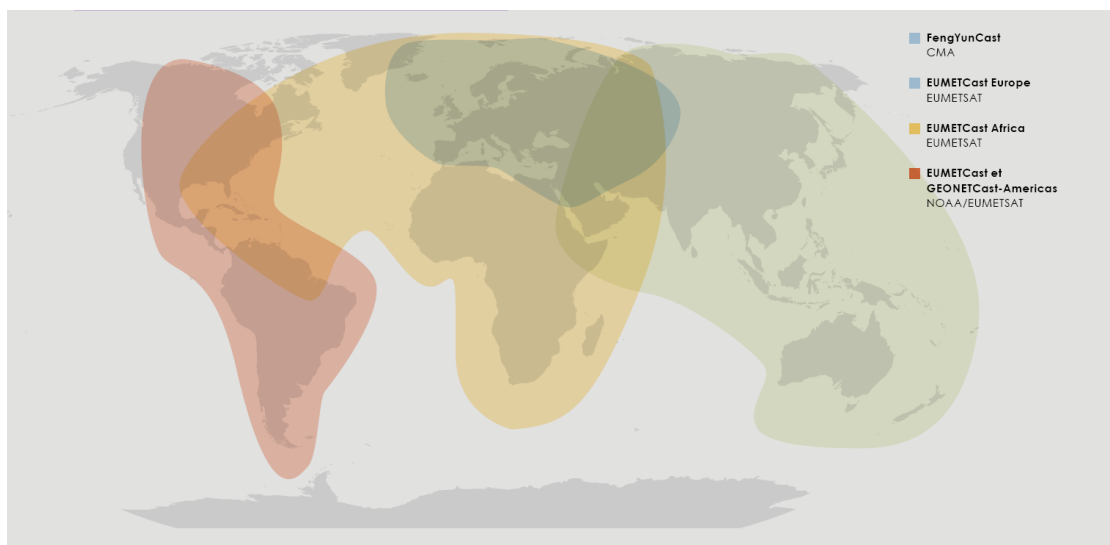


Figura 5.1: Cobertura global do sistema GEONETCast. Créditos da imagem: Foerster et al. (2013).

O sistema EUMETCast assenta tecnicamente na norma Digital Video Broadcasting (DVB) para a retransmissão de dados e, fazendo uso de satélites de telecomunicações convencionais, permite a uma vasta população o acesso contínuo a inúmeras fontes de dados, incluindo:

- Dados observacionais dos satélites Meteosat, Metop, Jason-2, GOES, MT-SAT e FY2;
- Produtos derivados MODIS, em nível 1 ou 2, à escala regional;
- Resultados de modelos de previsão numérica de tempo;
- Dados observacionais *in-situ*;
- Produtos decorrentes de aplicações para o solo nas regiões da Europa, África e América do Sul;

- Produtos de interesse oceanográfico à escala global e regional;
- Produtos relacionados com a química atmosférica.

A mais-valia do sistema de disseminação EUMETCast reside na simplicidade e relativa facilidade de instalação de uma estação de recepção. Conforme se esquematiza na figura 5.2, uma antena de 1,20 m de diâmetro, no foco principal da qual se acopla um LNB convencional para a banda Ku, permite a aquisição do sinal oriundo do satélite comercial EUTELSAT 9A, localizado a 9 °E. O fluxo de dados oriundos do transponder TP63 do satélite, nos 11976,82 MHz, alimenta um receptor DVB comercial (no caso, o SkyStar2, da Technisat), instalado num computador de recepção. A EUMETCast Key Unit (EKU) e o software que permitem a operação como cliente EUMETCast providenciam a posterior descodificação deste serviço licenciado e restrito.

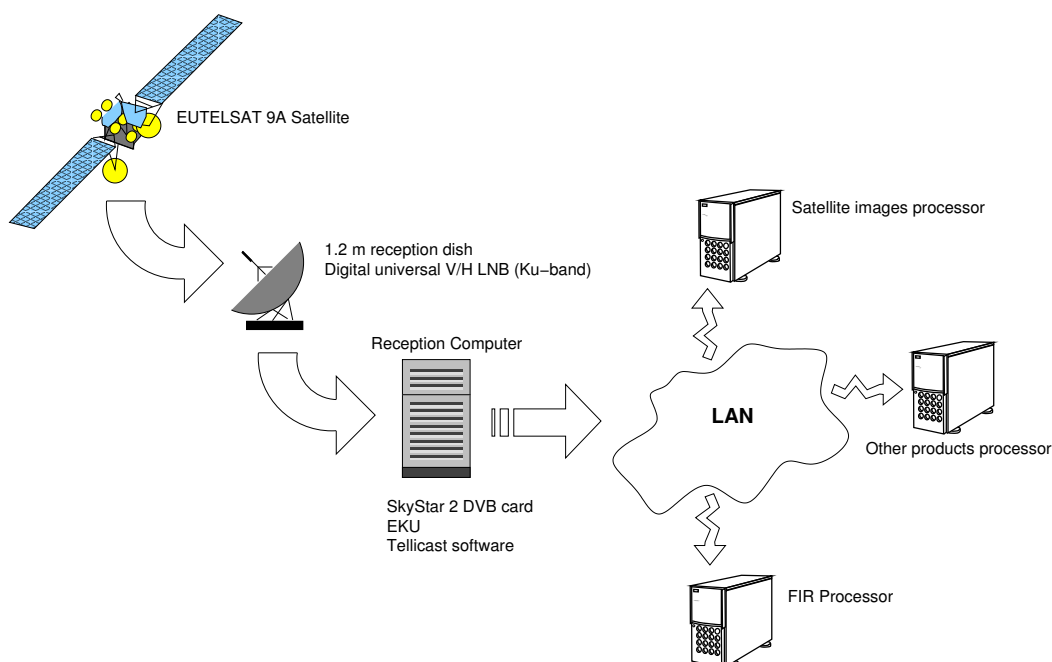


Figura 5.2: Esquematização geral da estação de recepção MSG da Universidade de Aveiro.

5.2 O radiómetro SEVIRI

O instrumento de maior destaque a bordo dos satélites MSG é o radiómetro óptico Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI), que proporciona a aquisição de dados em quatro canais na banda do visível e do infra-vermelho próximo e oito canais na banda do infra-vermelho, possibilitando a monitorização contínua do planeta em doze canais espectrais, a uma periodicidade de 15 minutos e com uma resolução espacial de 3 km

no nadir, e com um canal de alta resolução, no visível, oferecendo a resolução espacial de 1 km. As principais características do instrumento resumem-se na tabela 5.1.

5.3 O produto FIR da EUMETSAT

O produto de monitorização de focos de incêndio activos da EUMETSAT é designado por FIR e resulta da aplicação do algoritmo *Active Fire Monitoring with MSG*, que faz uso dos canais na banda dos 3,9 e 10,8 μm do radiómetro SEVIRI, cujas características se resumem na tabela 5.1, para obtenção de informações sobre eventual presença de fogo num pixel, em plena resolução espacial do instrumento (3 km, no nadir), dentro do campo de visão dos satélites MSG, ilustrado na figura 5.3.

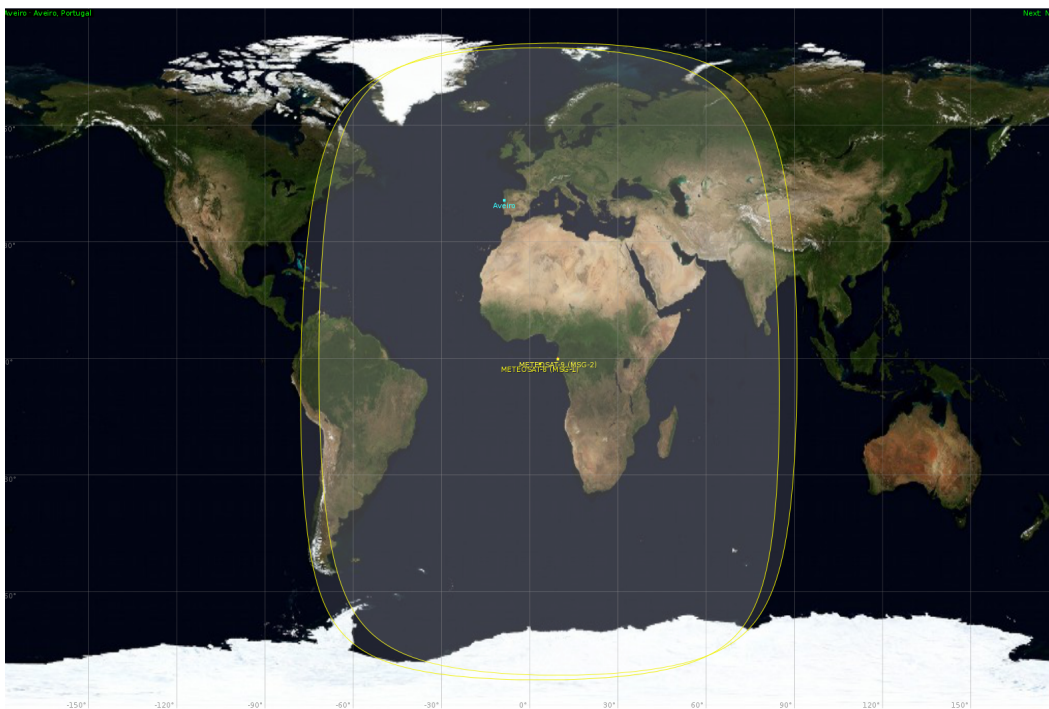


Figura 5.3: Ilustração do campo de visão dos satélites Meteosat Second Generation.

A formulação mais recente do algoritmo (EUMETSAT, 2010) utiliza uma abordagem similar à empregue em algoritmos aplicados a outros instrumentos, como o *Visible Infrared Spin-Scan Radiometer*, a bordo dos satélites GOES (VISSR) (Weaver et al., 1995), o *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) a bordo dos satélites NOAA e MetOp (Giglio et al., 1999) e o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) (Giglio et al., 2003), a bordo dos satélites Terra e Aqua, operados pela NASA, efectuando a distinção entre focos de incêndio prováveis e focos de incêndio possíveis. No contexto em que esta terminologia é empregue, fogo possível significa que a presença de fogo no

Canal	Designação	Banda Espectral (μm)	Resolução Espacial no Nadir (km)	Principal Utilização
1	VIS0.6	0,56 - 0,71	3	Superfície, nuvens e campos de vento
2	VIS0.8	0,74 - 0,88	3	Superfície, nuvens e campos de vento
3	NIR1.6	1,50 - 1,78	3	Superfície, fase das nuvens
4	IR3.9	3,48 - 4,36	3	Superfície, nuvens e campos de vento
5	WV6.2	5,35 - 7,15	3	Vapor de água instabilidade atmosférica
6	WV7.3	6,85 - 7,85	3	Vapor de água instabilidade atmosférica
7	IR8.7	8,30 - 9,10	3	Superfície, nuvens instabilidade atmosférica
8	IR9.7	9,38 - 9,94	3	Ozono
9	IR10.8	9,80 - 11,80	3	Superfície, nuvens, campos de vento Instabilidade Atmosférica
10	IR12.0	11,00 - 13,00	3	Superfície, nuvens instabilidade atmosférica
11	IR13.4	12,40 - 14,40	3	Altura de cirrus. Instabilidade atmosférica
12	HRV	0,40 - 1,10	1	Superfície, nuvens

Tabela 5.1: Caracterização geral do radiómetro SEVIRI.

pixel respectivo não pode ser garantida absolutamente, ao passo que fogo provável deve ser interpretado como uma ocorrência de incêndio activa. Por outras palavras, e de modo análogo aos intervalos de confiança presentes noutros produtos de detecção de incêndio (como o disponibilizado via MODIS), pixels com baixo grau de confiança nos resultados de detecção são classificados como fogos possíveis, ao passo que aqueles em que o grau de confiança é maior são classificados como fogos prováveis.

O algoritmo de detecção é apenas aplicado a cenas sobre terra livres da presença de nuvens. Superfícies cobertas por solo árido, assim consideradas por informação de entorno climatológico, são excluídas do esquema de processamento. Adicionalmente, a diferença entre os canais nos 10,8 e 8,7 μm é levada em conta para a determinação de pixels sobre solo árido, já que a sua diferença, em tais casos, é elevada. Nestas condições, a presença de fogo nos pixels processados pelo FIR é determinada a partir dos seguintes critérios:

1. a temperatura de brilho do canal 4, centrado em 3,9 μm , sendo identificados pixels com temperatura de brilho nos 3,9 μm muito superior ao esperado;
2. a diferença nas temperaturas de brilho nos canais na banda dos 3,9 e 10,8 μm . Como o canal a operar nos 10,8 μm é muito menos sensível a alvos quentes que o canal nos 3,9 μm , isso significa que a diferença nas temperaturas de brilho entre estes canais é elevada para pixels contendo fogo;
3. a diferença entre os desvios-padrão dos canais IR3.9 e IR10.8 numa janela de 3x3 pixels centrada num alvo quente, que permite a identificação do alvo quente em detrimento da temperatura do entorno. No caso de fogos activos, espera-se que o desvio-padrão do canal IR3.9 seja bem maior que o do canal IR10.8. Noutras circunstâncias, os valores são semelhantes, ao passo que, na presença de nuvens, o desvio-padrão da temperatura de brilho no canal IR10.8 é superior ao do canal IR3.9;
4. O desvio-padrão do canal IR3.9 numa janela de 3x3 pixels centrada num alvo quente é utilizado para distinguir o potencial fogo da sua vizinhança naturalmente mais quente. Não obstante, este teste detecta superfícies naturalmente quentes, bem como, eventualmente, bordos de nuvens;
5. O desvio-padrão do canal IR10.8 numa janela de 3x3 pixels. A sensibilidade reduzida deste canal é utilizada para a correcção de pixels com fogo incorrectamente classificados, já que o valor do desvio-padrão da temperatura de brilho medida por este canal será relativamente baixo em regiões com fogo, uma vez que os pixels possuem uma temperatura de brilho similar às regiões sem fogo circundantes.

Como resultado do processamento deste algoritmo, são disponibilizados, via EUMET-Cast ou através do centro de dados da EUMETSAT, com periodicidade de quinze minutos, ficheiros com o conteúdo similar ao que se reproduz na figura 5.4.

HeaderVersionNo		0
FileType		2
SubHeaderType		1
SourceFacilityID		6
SourceEnvId		1
SourceInstanceId		2
SourceSUIId		60021
SourceCPUId	10 20 50	4
DestFacilityId		5
DestEnvId		1
DataFieldLength		1324
SubHeaderVersionNo		0
ServiceType		171
ServiceSubType		27
FileTime	19199:	787906
SpacecraftId		322
Data from EUMETSAT, Satellite: MET09, Date: 2010/07/26 00:00Z		
Row: 1090	Col: 3246	Lat: -23.089 Lon: -49.957 Possible fire
Row: 1120	Col: 3275	Lat: -22.179 Lon: -51.063 *** Probable fire ***
Row: 1657	Col: 3293	Lat: -5.750 Lon: -46.088 Possible fire
Row: 1659	Col: 3288	Lat: -5.689 Lon: -45.841 *** Probable fire ***
Row: 1660	Col: 3287	Lat: -5.659 Lon: -45.790 Possible fire
Row: 1660	Col: 3288	Lat: -5.660 Lon: -45.838 *** Probable fire ***

Figura 5.4: Estrutura e conteúdos típicos dos ficheiros resultantes do processamento do produto FIR (adaptado).

5.4 A aplicação de visualização de focos de incêndio desenvolvida

O propósito do desenvolvimento da aplicação FOMA (acrónimo de *forest fires mapping and monitoring application*) residiu no impacto da internet na sociedade. Neste sentido, pretendeu-se tornar possível que utilizadores de qualquer parte do mundo, a qualquer instante, pudessem ser capazes de visualizar informação, numa interface web de utilização intuitiva, sobre a possibilidade de detecção de ocorrência de incêndios sobre o campo de visão dos satélites MSG. Esta informação, para além da sua óbvia utilidade como alerta de incêndios, pode também ser frutífera para o desenvolvimento de estudos sobre a distribuição espacial e temporal de incêndios. Por outro lado, tendo em conta que os resultados

são publicados numa página web, com recurso à API do Google Maps, e disponibilizados para download no formato KML, a compatibilidade de utilização da ferramenta, a par com outros recursos de software, fica, à partida, satisfeita.

À data do desenvolvimento do FOMA, verificou-se que outros sistemas de visualização online, como o European Forest Fire Information System (EFFIS), o Fire Information for Resource Management System (FIRMS), o Advanced Fire Information System (AFIS), entre outros, ofereciam capacidades similares ao produto desenvolvido, apesar de assentarem sobre outros produtos de detecção de incêndios activos, como o derivado do MODIS. Muito embora alguns sistemas de visualização providenciassem informação adicional à localização dos focos de incêndio detectados (por exemplo, o produto FIRMS disponibiliza informação sobre o nível de confiança das detecções efectuadas), o FOMA, durante o intervalo de tempo em que funcionou em regime operacional, possibilitou um serviço em tempo quase-real, de cobertura quase global, actualizado e de funcionamento ininterrupto. Adicionalmente, tendo em conta que os ficheiros de dados iniciais foram arquivados, o FOMA permite um modo retrospectivo, segundo o qual se torna possível a criação de atlas de ocorrências de incêndios, transformando esta ferramenta numa inestimável fonte de potencial benefício para os sectores sociais relacionados com a avaliação, gestão e mitigação de riscos, bem como para o desenvolvimento de estudos em áreas afins.

5.5 Sistemática da ferramenta de visualização de focos de incêndio

A figura 5.5 ilustra o mecanismo básico subjacente às operações desenvolvidas no FOMA. No seu modo de funcionamento em tempo quase-real, a rotina de processamento é iniciada com um *bash script* que verifica periodicamente a existência de novos ficheiros resultantes do produto FIR no computador de recepção. Caso existam, o nome do satélite, a data e a hora do ficheiro FIR em uso são retidos, efectuando-se a separação entre fogos prováveis e possíveis. Posteriormente, procede-se à reformatação da informação, com vista à criação de dois ficheiros KML, fazendo uso do software GPSBabel. O ciclo de processamento termina com o upload dos ficheiros KML para uma página web, que faz uso da API do Google Maps para a representação, sobre o mapa, da informação constante dos dois ficheiros criados, conforme ilustra a figura 5.6.

A aplicação desenvolvida possibilita igualmente um funcionamento em modo retrospectivo, permitindo, assim, a criação de uma base de dados (no formato KML) de ocorrências de incêndio. Neste modo, um ciclo de processamento similar ao representado na figura 5.5 é levado a cabo, com a diferença de serem considerados todos os ficheiros FIR localmente existentes para a construção de um histórico de ocorrências.

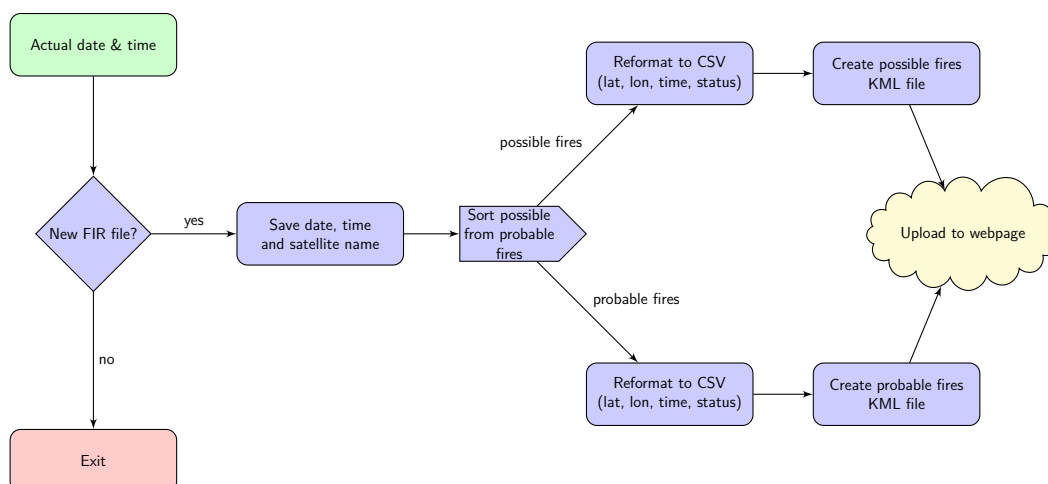


Figura 5.5: Diagrama de fluxo da cadeia de processamento.

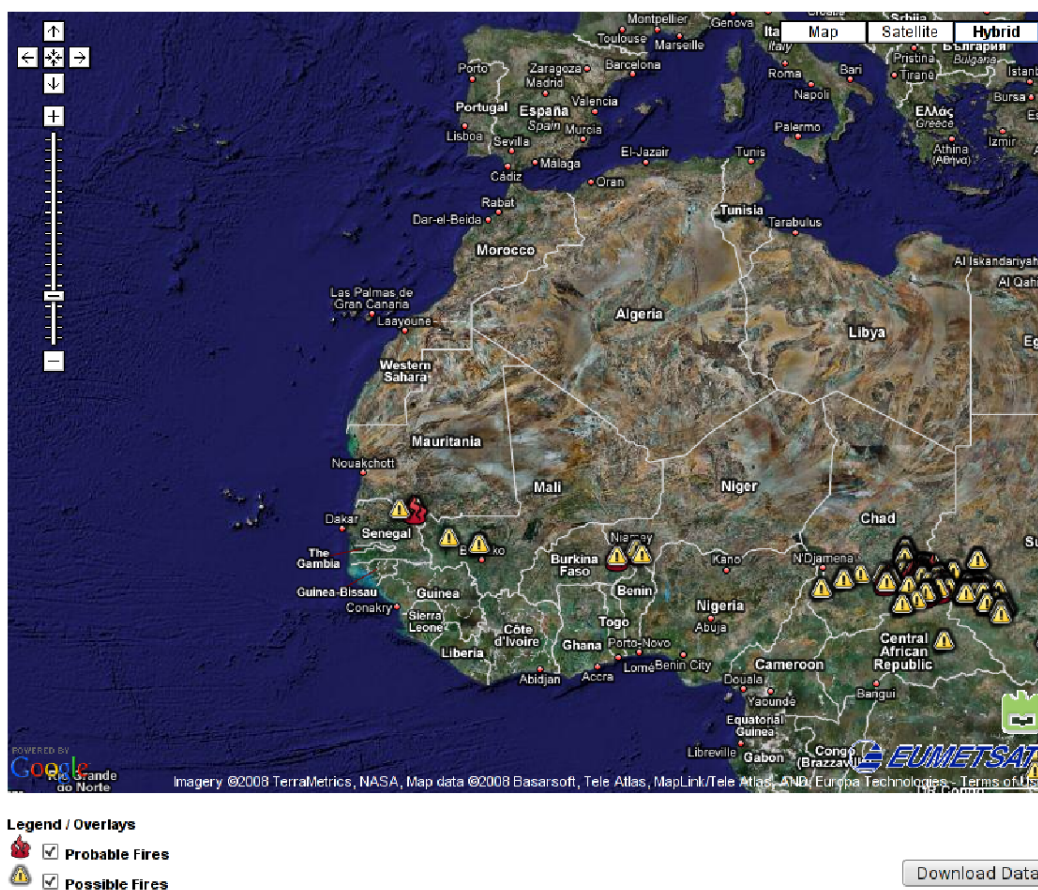


Figura 5.6: Visualização de dados com o FOMA, na página web criada.

A operação da aplicação FOMA em tempo real permitiu o acompanhamento de algumas ocorrências, confirmadas pelos dados de terreno provenientes dos relatórios provisórios da então Direcção Geral dos Recursos Florestais. Como exemplo, destaca-se a figura 5.7,

5.6 Validação dos dados FIR sobre Portugal Continental

dando conta de uma ocorrência visualizada na plataforma web da aplicação FOMA, a 5 de Agosto de 2008, confirmada como uma ocorrência de incêndio de que resultaram 535 ha de área ardida. Por outro lado, a utilização da aplicação FOMA em modo retrospectivo e offline (isto é, fazendo uso do Google Earth, ao invés da API do Google Maps), ilustra-se na figura 5.8, onde se representam as detecções de incêndio efectuadas pelo produto FIR, nas regiões da Europa e de parte do norte de África, nas duas últimas semanas de Agosto de 2008.

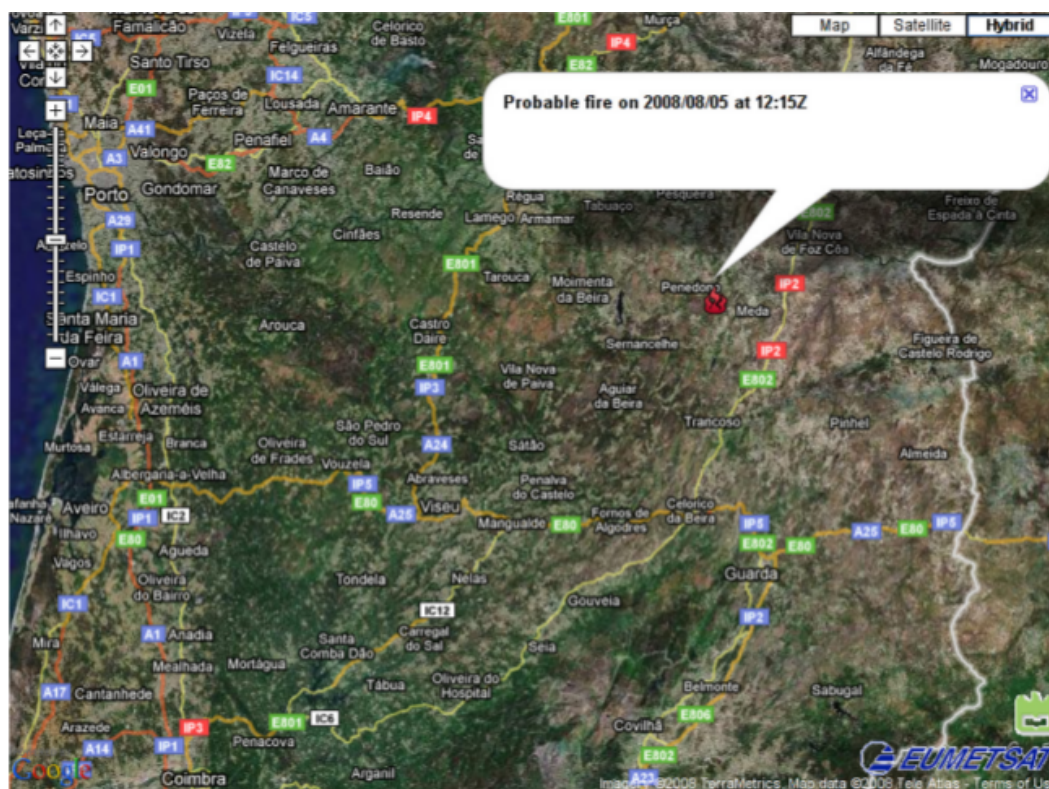


Figura 5.7: Exemplo da visualização, por intermédio do FOMA, da detecção de uma ocorrência de incêndio, confirmada no terreno pelos dados do relatório de incêndios para a época de 2008, a 5 de Agosto de 2008.

5.6 Validação dos dados FIR sobre Portugal Continental

A ferramenta de visualização de focos de incêndio activos assente no produto FIR da EUMETSAT constitui um recurso de extrema utilidade para a sociedade em geral. Todavia, urge determinar quantitativamente a sua performance sobre o território português, no sentido da determinação da acuidade da detecção de incêndios pelo produto FIR. A figura



Figura 5.8: Exemplo de utilização da aplicação FOMA em modo retrospectivo e offline, para visualização de ocorrências de incêndio nas regiões da Europa e parte do Norte de África, nas duas últimas semanas de Agosto de 2008.

5.9 permite apreciar, em primeira análise, a justaposição dos resultados de detecção de incêndios com recurso ao produto FIR, considerando tanto fogos possíveis como prováveis, comparativamente com as detecções MODIS, por via do produto MOD14 disponibilizado no sistema de visualização FIRMS, para o dia 26 de Julho de 2010. Para a construção da figura 5.9 foi utilizado o conjunto de 96 ficheiros FIR (um ficheiro a cada 15 minutos), bem como os dados resultantes das detecções MODIS especificados, para o dia 26 de Julho, na tabela 5.2. Pese embora as diferenças na resolução temporal das duas plataformas orbitais, pode apreciar-se, em primeira análise, uma boa concordância entre as detecções efectuadas pelos dois produtos.

Alguns dos estudos relativos à validação do produto FIR da EUMETSAT efectuados não são aplicados sobre Portugal. Por exemplo, Tekeli et al. (2009) validam o produto FIR para utilização sobre a Turquia, enquanto que Sifakis et al. (2011) levaram a mesma tarefa a cabo para a Grécia. Por outro lado, Amraoui et al. (2010) efectuam um procedimento similar, baseado, porém, no seu próprio produto (FiDALgo) sobre África. Em ambos os casos citados, o produto FIR revela a sua adequabilidade e exequibilidade para a detecção em tempo quase real de ocorrências de incêndios florestais. Assim, procurou desenvolver-se uma metodologia para a validação dos dados das detecções FIR sobre Portugal continental.

Os dados FOMA, tanto no que diz respeito a fogos possíveis como a fogos prováveis, obtidos mediante o uso do FOMA, em modo retrospectivo, para o período compreendido

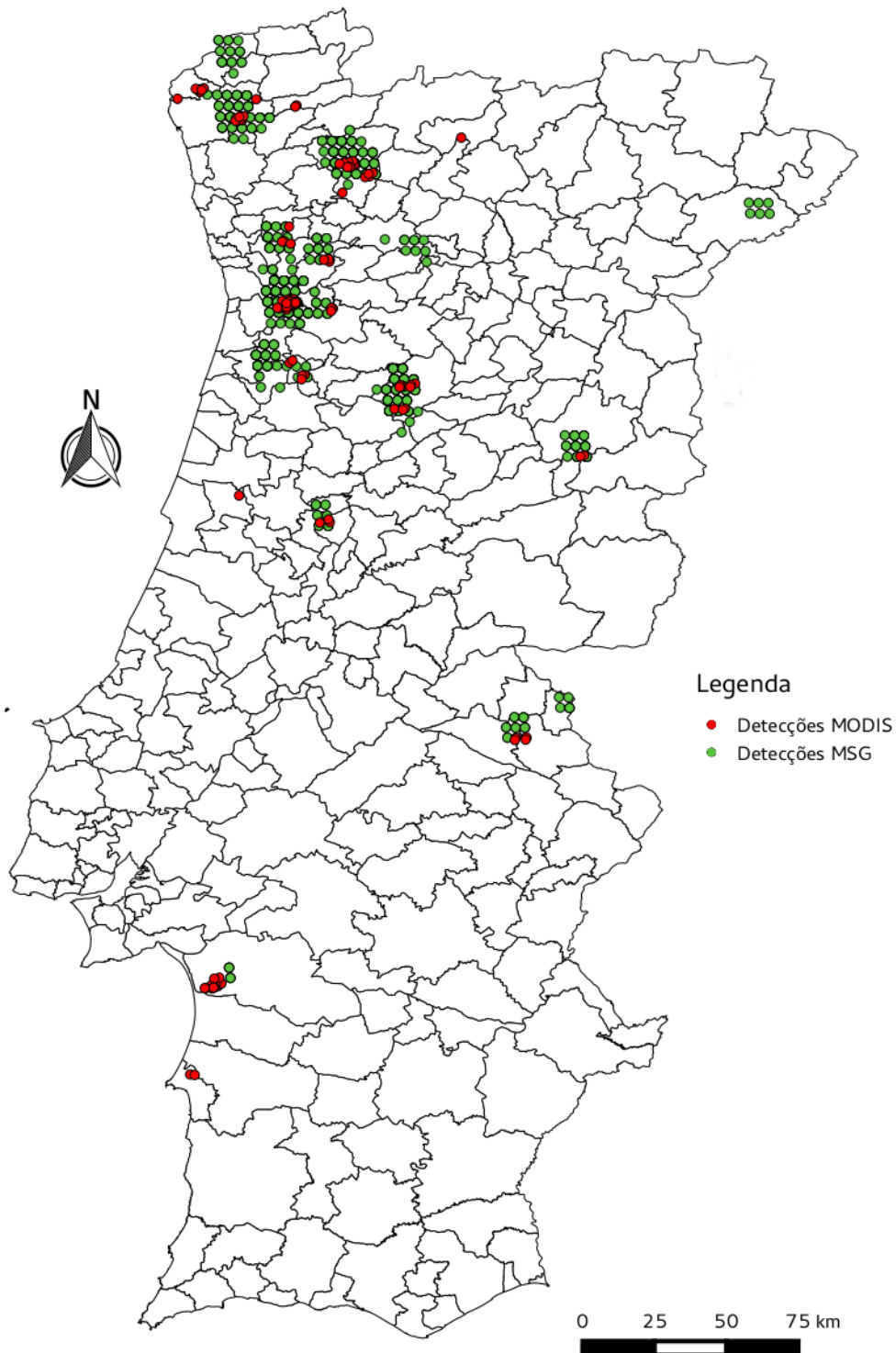


Figura 5.9: Comparação das detecções de incêndio via FIR e MOD14 para o dia 26 de Julho de 2010.

entre 25 a 29 de Julho de 2010, foram comparados com os dados do produto de detecção de incêndios activos assente no radiómetro MODIS, obtidos por intermédio do *Fire Information for Resource Management System (FIRMS)*¹, para o mesmo período.

A selecção dos ficheiros FIR a utilizar efectuou-se segundo o critério de alinhar temporalmente os ciclos de processamento referentes aos dois produtos, conforme sistematizado na tabela 5.2, criando uma janela temporal de meia hora de ficheiros FIR centrada no horário MODIS.

Data	Hora MODIS	Hora MSG	Data	Hora MODIS	Hora MSG
2010-07-25	02:37	02:30	2010-07-27	13:30	13:15
		02:45			13:30
		03:00			13:45
	12:01	12:00		22:54	22:45
		12:15			23:00
		12:30			23:15
	13:43	13:30	2010-07-28	03:08	03:00
		13:45			03:15
		14:00			03:30
	23:07	23:00		10:54	10:45
		23:15			11:00
		23:30			11:15
2010-07-26	03:20	03:15	2010-07-29	12:31	12:30
		03:30			12:45
		03:45			13:00
	11:06	11:00		14:13	14:00
		11:15			14:15
		11:30			14:30
	12:48	12:45	21:59	21:45	
		13:00		22:00	
		13:15		22:15	
	14:25	14:15		02:13	02:00
		14:30			02:15
		14:45			02:30
22:11	22:00	11:37	11:30		
	22:15		11:45		
	22:30		12:00		
2010-07-27	02:25		02:15	13:18	13:15
			02:30		13:30
			02:45		13:45
	11:49	11:45	22:41		22:30
		12:00			22:45
		12:15			23:00

Tabela 5.2: Datas e horas de aquisição dos ficheiros MOD14 e FIR utilizados para validação.

¹<http://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data/firms>

Posteriormente, procedeu-se à análise dos resultados, recorrendo ao *software* QGIS para delimitar eventuais ocorrências de incêndio correspondentes a pixels identificados como tal. Emergiu, porém, a necessidade de lidar com as diferentes resoluções espaciais dos dois sensores, bem como com o facto de um incêndio activo poder ser representado, por ambos os instrumentos, por mais do que um *pixel*, e, adicionalmente, a eventual mudança de posição dos pixels de fogo MSG ao longo de três imagens consecutivas. Assim, os dados foram sujeitos a agregação segundo um *buffer* de raio igual a dois *pixels*, correspondendo a 2 km no caso dos dados MODIS e a 6 km no caso dos dados FIR. Considerou-se, igualmente, que o resultado da sobreposição dos *buffers* assim construídos, para cada fonte de dados, define um único evento de ocorrência de incêndio.

A análise de resultados foi, pois, efectuada à luz das premissas expostas anteriormente, tendo por base uma matriz de erro similar à da tabela 5.3.

		Detecções MODIS		Total
		Fogo detectado	Fogo não-detectado	
Detecções FIR	Fogo detectado	a	b	a + b
	Fogo não-detectado	c	d	c + d
Total		a + c	b + d	

Tabela 5.3: Exemplo de matriz de erro aplicada para a determinação das medidas de avaliação de precisão das detecções FIR.

A precisão da detecção de incêndios obtida pelo produto FIR, comparativamente ao produto de detecção de incêndios MODIS, foi avaliada pelo cálculo das seguintes medidas: erros de comissão, erros de omissão e percentagem de eventos de fogo detectados (Congalton e Green, 1999).

Os erros de comissão (EC) correspondem à situação em que é identificado fogo pelo FIR quando tal não acontece no produto MODIS, ou seja, representam falsos resultados positivos, sendo, pois, calculados através de:

$$EC = \frac{b}{a + b} \quad (5.1)$$

Os erros de omissão correspondem à não-identificação de fogo pelo produto FIR, quando, pelos dados MODIS, são detectados incêndios; representam, assim, falsos negativos, sendo, portanto, calculados como:

$$EO = \frac{c}{a + c} \quad (5.2)$$

A percentagem de eventos de fogo detectados² (PA) pode ser determinada como:

$$PA = \frac{a}{a + c} \quad (5.3)$$

²Aqui entendida no âmbito do conceito de *Producer's accuracy*, conforme Boschetti et al. (2004).

No contexto do anteriormente exposto, devem ser tecidas algumas considerações sobre como foram avaliados os resultados. Assim, considerou-se como acerto a situação resultante da intersecção/sobreposição dos *buffers* MODIS e FIR, isto é, tendo em conta a diferença na resolução espacial dos instrumentos MODIS e SEVIRI, e, conseqüentemente, dos *buffers* criados, foi contabilizado o número de *buffers* MODIS contidos na área delimitada pelos *buffers* FIR, conforme se ilustra na figura 5.10, onde se representa o que se considerou como três eventos de fogo MODIS correctamente identificados pelo SEVIRI e um evento de fogo MODIS não detectado pelo SEVIRI.

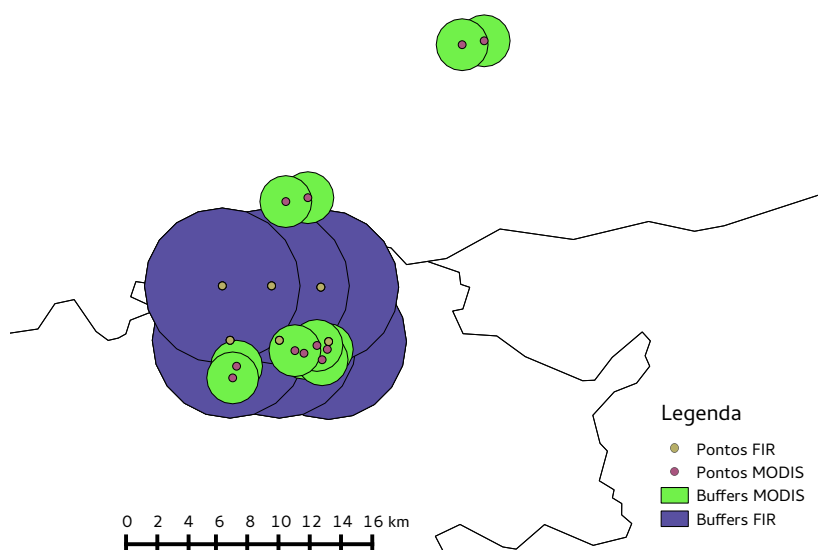


Figura 5.10: Exemplo ilustrativo das premissas efectuadas para a validação das detecções FIR contra as detecções MODIS.

Por outro lado, como falso resultado positivo considerou-se a situação em que um *buffer* MSG é detectado, sem nenhum *buffer* FIRMS na sua vizinhança imediata, conforme se ilustra na figura 5.11, que representa o que se considerou como dois eventos de fogo MODIS correctamente identificados pelo SEVIRI, duas ocorrências MODIS não detectadas, e uma falsa detecção pelo SEVIRI.

Os resultados obtidos da análise efectuada sistematizam-se na tabela 5.4, destacando-se que, de 206 eventos de fogo detectados pelo MODIS, o produto FIR identificou correctamente 83, resultando, portanto, numa percentagem de eventos de fogo correctamente identificados de 40,29%. O valor aparentemente baixo dos erros de comissão, isto é, referentes a falsas detecções, carece, porém, de alguns comentários: a metodologia utilizada, nomeadamente o facto de se considerarem os agregados de buffers FIR como representantes de um único evento, pode levar a que, incorrectamente, não sejam consideradas possíveis falsas detecções FIR.

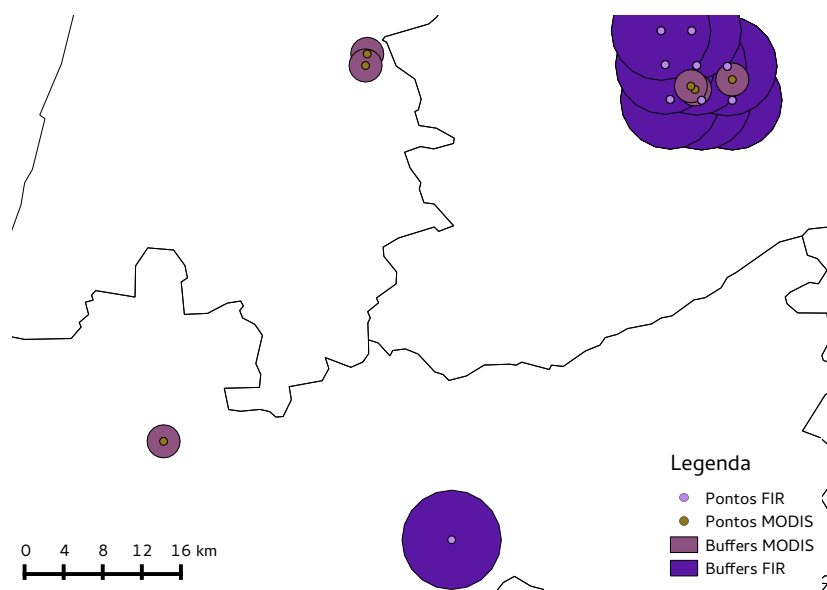


Figura 5.11: Exemplo ilustrativo das premissas efectuadas para a validação das detecções FIR comparativamente com as detecções MODIS.

Não obstante, deve referir-se que, na generalidade, os incêndios detectados pelo SEVIRI são igualmente detectados pelo MODIS. Já o recíproco, tendo em conta a mais elevada resolução espacial do sensor MODIS, não tem necessariamente que ser verdadeiro, na medida em que um eventual incêndio tem muito mais impacto radiativo sobre o sensor MODIS (de aproximadamente 1 km de resolução espacial) do que sobre o radiómetro SEVIRI, isto é, a radiância medida incrementa de forma proporcionalmente maior, tornando, portanto, um incêndio mais facilmente detectável pelo MODIS.

Os resultados emergentes desta tentativa de validação das detecções de incêndio sobre Portugal pelo produto FIR da EUMETSAT sugerem a necessidade de um aprofundamento de estudos de validação, numa maior extensão temporal. A metodologia empregue deve igualmente ser revista, no sentido de apurar, de forma mais precisa, a taxa de falsas detecções do produto.

Data	Hora MODIS	MODIS sim/ MSG sim	MODIS sim/ MSG não	MODIS não/ MSG sim	PA	EO	EC
2010-07-25	02:37:00	1	3	0	23,81%	76,19%	0,00%
	12:01:00	0	2	0			
	13:43:00	0	7	0			
	23:07:00	4	4	0			
	total	5	16	0			
2010-07-26	03:20:00	0	3	0	48,72%	51,28%	9,52%
	11:06:00	1	3	0			
	12:48:00	4	4	1			
	14:25:00	6	5	1			
	22:11:00	8	5	0			
	total	19	20	2			
2010-07-27	02:25:00	15	3	0	39,56%	60,44%	0,00%
	11:49:00	5	18	0			
	13:30:00	11	25	0			
	22:54:00	5	9	0			
	total	36	55	0			
2010-07-28	03:08:00	3	3	0	50,00%	50,00%	12,50%
	10:54:00	2	4	0			
	12:31:00	0	1	2			
	14:13:00	7	1	0			
	21:59:00	2	5	0			
	total	14	14	2			
2010-07-29	02:13:00	0	3	0	33,33%	66,67%	0,00%
	11:37:00	1	5	0			
	13:18:00	5	5	0			
	22:41:00	3	5	0			
	total	9	18	0			
GLOBAL		83	123	4	40,29%	59,71%	4,60%

Tabela 5.4: Sistematização dos resultados da avaliação das detecções FIR comparativamente às detecções MODIS.

Capítulo 6

Detecção de Incêndios com dados AVHRR

Ao longo do sexto capítulo da presente dissertação, aborda-se a aplicação dos dados coligidos pela Estação de Recepção HRPT da Universidade de Aveiro no âmbito da detecção de incêndios activos. O capítulo inicia-se com uma breve resenha histórica sobre os satélites de órbita polar operados pela NOAA, assim como pela apresentação das principais características do instrumento mais relevante para as aplicações desenvolvidas, o radiómetro AVHRR. De seguida descreve-se a Estação de Recepção HRPT da Universidade de Aveiro, quer em termos do hardware que a constitui, quer no que respeita às escolhas de software implementado. Na quarta secção apresenta-se uma proposta de algoritmo de detecção de focos de incêndio desenvolvido, bem como os processos auxiliares que lhe estão subjacentes. Após se ilustrarem alguns resultados de aplicação do algoritmo, procede-se à validação dos resultados, fazendo uma comparação com os dados do produto de detecção de fogos activos assente no radiómetro MODIS, a bordo dos satélites TERRA e AQUA, operados pela NASA.

6.1 Os satélites de órbita polar da NOAA

O conjunto de satélites NOAA actualmente em órbita é gerido pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), através do *National Environmental Satellite Data and Information Service* (NESDIS), fazendo parte do programa POES (Polar Operational Environmental Satellites), um programa desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), em cooperação com a NOAA, a França e o Reino Unido. A NASA constitui a entidade responsável pelo desenvolvimento e colocação em órbita dos satélites, aos passo que a NOAA é responsável pela operação, gestão do processamento e distribuição da informação coligida pelos satélites. A tradição nas missões de órbita polar da NOAA é

vasta, desde o lançamento do TIROS 1, em 1960, às séries de satélites ITOS, na década de setenta do século XX, TIROS-N, em finais dos anos setenta do século XX, ATN, nos anos oitenta do século XX, até à série KLM, em finais dos anos noventa do século XX (Capderou, 2005; Maini e Agrawal, 2011). Actualmente (final de 2013), o programa POES é constituído por seis satélites¹, conforme esquematizado na tabela 6.1.

Satélite	Estado Operacional
METOP-B	Primário AM
METOP-A	<i>Backup</i> AM
NOAA 15	AM secundário
NOAA 16	PM secundário
NOAA 17	Retirado a 2013/04/10
NOAA 18	PM secundário
NOAA 19	Primário PM

Tabela 6.1: Estado da missão POES, relevando os satélites activos.

Os satélites NOAA possuem uma órbita heliosíncrona com um período de aproximadamente 102 minutos, a uma altitude de cerca de 850 km, de modo que cada satélite cruza o equador à mesma hora solar. De entre os modos de transmissão de dados existentes nestas plataformas, há que enfatizar o modo *High Resolution Picture Transmission* (HRPT), um modo de transmissão digital em tempo real dos dados recolhidos pelos instrumentos a bordo dos satélites NOAA e MetOp, disponibilizados de forma aberta e gratuita, que é constituído por um fluxo de dados, onde se encontra multiplexada a informação de todos os instrumentos, num formato específico.

6.2 O radiómetro AVHRR

O *Advanced Very-High-Resolution Radiometer* (AVHRR), ilustrado na figura 6.1, é um radiómetro multiespectral presente nos satélites de órbita polar operados pela NOAA e nos satélites de órbita polar da METEOSAT (MetOP).

Actualmente na sua terceira versão, o AVHRR marcou a sua aparição, a bordo dos satélites NOAA lançados para o espaço, a partir de 1978, com o objectivo de providenciar uma visão sinóptica dos sistemas meteorológicos, bem como para avaliar o balanço térmico de superfícies terrestres em várias zonas climáticas. Deste modo, apesar do AVHRR ter sido desenhado para estudos meteorológicos, tem vindo a ser utilizado exhaustivamente para

¹No caso do satélite NOAA-16, verificou-se a perda de comunicação de dados e telemetria desde 6 de Junho de 2014, às 05:32 UTC. Não sendo possível registar dados do *beacon* do satélite, a NOAA decidiu, a 9 de Junho de 2014, descomissionar o satélite.

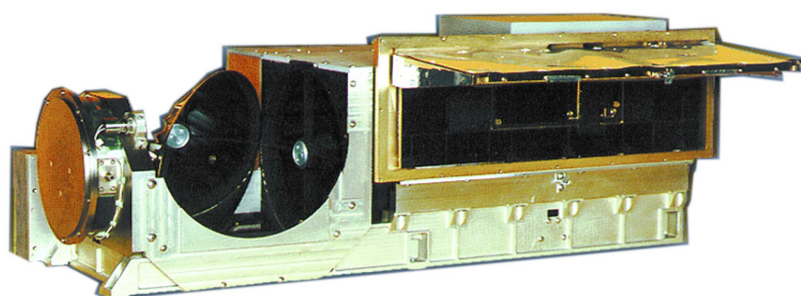


Figura 6.1: O radiómetro AVHRR. Créditos da imagem: http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2002/03/AVHRR_instrument.

outras aplicações de índole mais alargada, incluindo estudos oceanográficos, hidrológicos, do uso e cobertura de terreno, entre outras. O AVHRR, na sua configuração actual, detecta energia nas faixas do visível e do infravermelho do espectro electromagnético em seis canais, numa área de varrimento de cerca de 4000 por 2800 km, a uma resolução espacial de 1,1 km no nadir, e com uma resolução radiométrica de 10 bits. Tendo em conta as características das órbitas dos satélites equipados com o AVHRR, a resolução temporal é bastante aceitável, já que cada satélite pode coligir dados sobre um mesmo ponto da superfície terrestre a cada 12 horas, aproximadamente.

Canal	Região do E.E.	Banda Espectral (μm)	Resolução Espacial (km)	Principal utilização
1	Visível	0,58 - 0,68	1,1	Mapeamento diurno de nuvens/superfícies.
2	I.V. próximo	0,725 - 1,00	1,1	Delimitação de fronteiras terra/água.
3A	I.V. próximo	1,58 - 1,64	1,1	Detecção de neve e gelo.
3B	I.V.	3,55 - 3,93	1,1	Mapeamento nocturno de nuvens.
4	I.V.	10,30 - 11,30	1,1	Temperatura da superfície do mar.
5	I.V.	11,50 - 12,50	1,1	Mapeamento nocturno de nuvens. Temperatura da superfície do mar.

Tabela 6.2: Caracterização geral dos canais do radiómetro AVHRR (3ª versão).

De acordo com a tabela 6.2, o AVHRR mede a quantidade de energia solar reflectida (nas bandas do visível e do infravermelho próximo) nos canais 1, 2 e 3A. Os usos típicos para os dados coligidos por esses canais incluem a monitorização da vegetação, cobertura de nuvens, lagos, litorais, neve, aerossóis e gelo. Já a energia emitida pela superfície

terrestre (continentes e oceanos) e pela atmosfera é detectada com recurso aos canais 3B, 4 e 5. Deve salientar-se que, dos seis canais enunciados na tabela 6.2, apenas cinco são transmitidos simultaneamente. Nos satélites em órbitas vespertinas, os canais 3A e 3B são disponibilizados em alternância para operação diurna e nocturna, respectivamente. Nas missões matutinas, o canal 3B encontra-se permanentemente activo.

6.3 A Estação de Recepção HRPT da Universidade de Aveiro

Tornada operacional em Maio de 2006, a Estação de Recepção *High Resolution Picture Transmission* da Universidade de Aveiro, financiada no âmbito do Programa Nacional de Reequipamento Científico (PNRC) pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) e pelo Programa Operacional Ciência e Inovação (POCI2010), constitui uma infra-estrutura dedicada à aquisição em tempo real do modo HRPT dos satélites de órbita polar operados pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), bem como do modo Chinês HRPT (CHRPT) dos satélites FENGYUN da Agência Meteorológica Chinesa. Deste modo, a estação permite a **aquisição, processamento e arquivo** dos dados coligidos pelo radiómetro Advanced High Resolution Radiometer (AVHRR), à resolução de 1,1 km no nadir. De forma esquemática, a figura 6.2 pode providenciar um detalhe de toda a estrutura de *hardware* que constitui esta plataforma de aquisição de dados.

Operando continuamente desde a sua instalação até meados de 2011, quando foi desligada por avaria, a estação recorre a um conjunto de *software*, sendo um dos elementos da cadeia de processamento *software* proprietário² da Dartcom, ao passo que outros desenvolvidos especificamente pelo autor deste estudo para os propósitos do seu trabalho de investigação, e outros ainda, assentes em soluções de *Software* livre³, obtidos através do contacto directo com os seus desenvolvedores. A constituição da estação, quer em termos de *hardware*, quer no que ao *software* diz respeito, é apresentada, de forma detalhada, nas subsecções seguintes.

²Advoga-se a definição de *software* proprietário enquanto sinónimo de *software* não-livre, estabelecida pela Free Software Foundation (conforme <https://www.gnu.org/philosophy/categories.html>). Segundo esta definição, *software* proprietário é aquele cuja cópia, redistribuição ou modificação são em alguma medida proibidos pelo seu proprietário. Para uso, cópia ou redistribuição, deve ser solicitada permissão ao proprietário, ou pagar para o poder fazer.

³Segundo a Free Software Foundation, *software* livre é o *software* disponível com a permissão para que qualquer pessoa o possa usar, copiar e distribuir, seja na sua forma original ou com modificações, de forma gratuita ou não. Em especial, a possibilidade de poder modificar o código implica que este código fonte esteja disponível. Deve salientar-se que se distingue *software* livre de *software* gratuito na medida em que as liberdades associadas ao *software* livre de copiar, modificar e redistribuir, não dependem da sua gratuitidade.

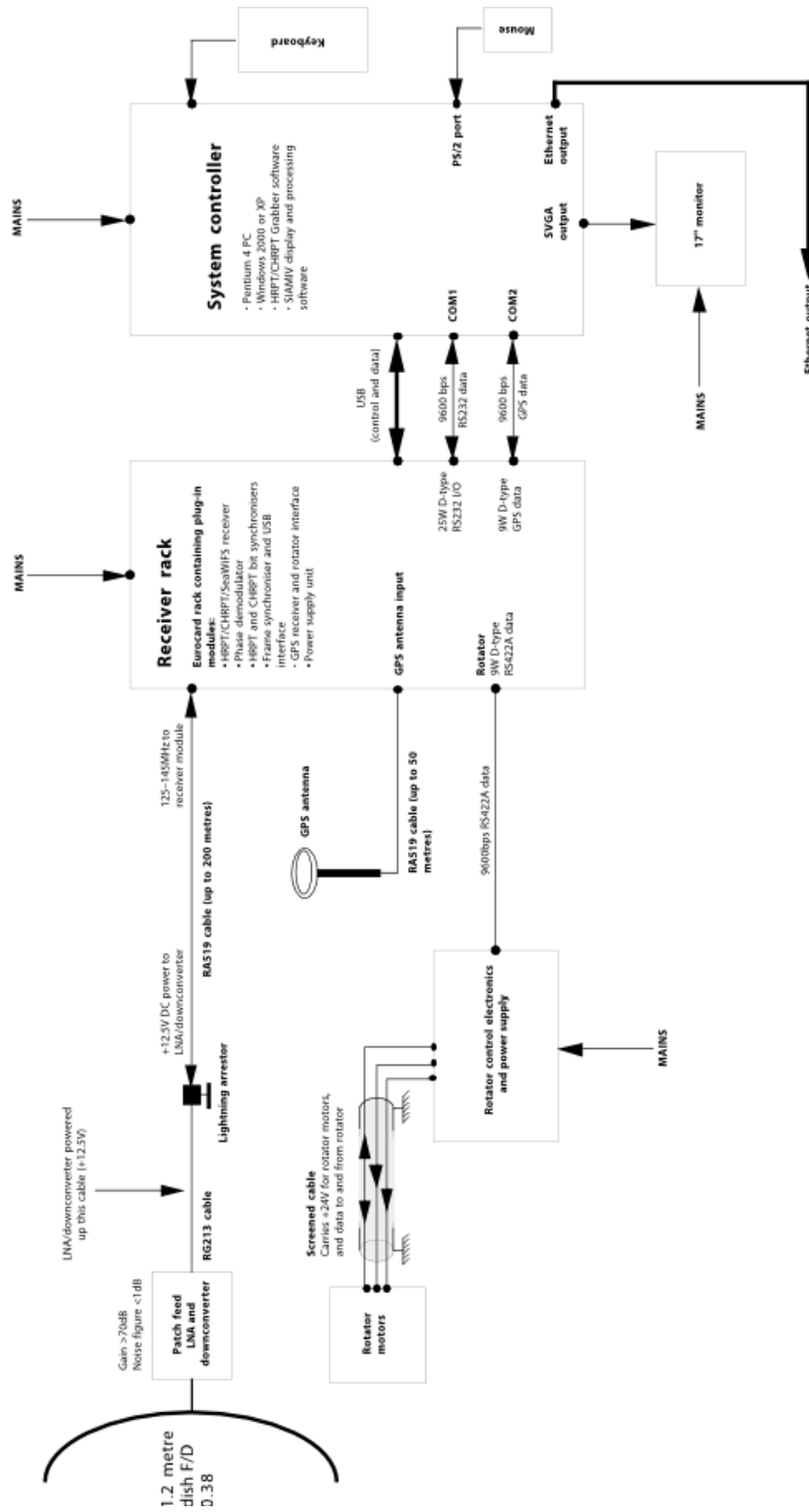


Figura 6.2: Visão esquemática geral do hardware que compõe a estação de recepção HRPT da Universidade de Aveiro (Dartcom, 2003).

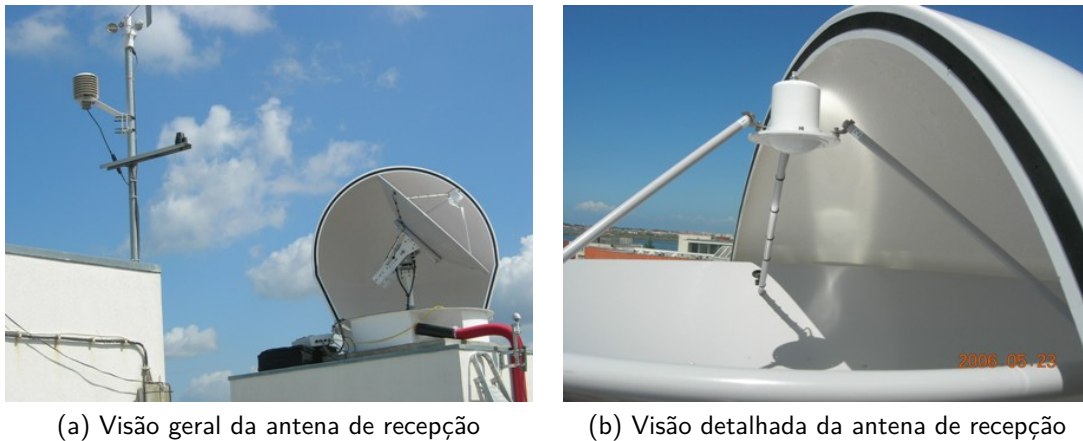


Figura 6.3: A antena de recepção da estação HRPT da UA.

6.3.1 Hardware

A Estação de Recepção HRPT do Departamento de Física da Universidade de Aveiro assenta numa proposta comercial da empresa Dartcom, sendo o sistema composto por uma antena parabólica de foco central de 1,2 m de diâmetro, construída em alumínio, à qual se encontra acoplado um rotor, para controlo automatizado de azimute e elevação.

No ponto focal do parabolóide de revolução encontra-se um sistema integrado de alimentador, amplificador, *downconverter* e filtro passa-banda (conforme ilustrado na imagem 6.3b da figura 6.3), talhado para a recepção de sinais de polarização circular direita, numa largura de banda de 20 MHz, alimentado por intermédio do cabo coaxial que transporta o sinal para o módulo de recepção. Este primeiro elemento da cadeia de recepção encontra-se envolto por uma redoma de fibra de vidro e instalado no terraço do Departamento de Física da Universidade de Aveiro, conforme ilustra a imagem 6.3a da figura 6.3.

A sincronização do posicionamento da antena, de acordo com as passagens dos satélites obtidas por modelos de propagação orbital, é assegurada por um receptor GPS que, três segundos antes do início da captura de sinal, assegura o azimute e elevação correctos da antena, garantindo assim a aquisição do sinal sem quaisquer falhas.

O elemento seguinte da cadeia de recepção de dados, segundo o esquema da figura 6.2, é a *rack* de recepção, ilustrada na figura 6.4.

A *rack* de recepção é constituída pelos seguintes módulos:

- Receptor sintetizado HRPT/CHRPT;
- Desmodulador de fase e filtro de banda base;
- Sincronizador de bits HRPT e CHRPT;
- Interface do receptor GPS e do rotor;



Figura 6.4: Visão da *rack* de recepção da Estação HRPT da UA.

- Sincronizador de *frames* e interface USB;
- Fonte de alimentação linear da *rack*.

O **receptor HRPT/CHRPT** recebe o sinal oriundo do *downconverter*, amplifica-o e filtra-o, convertendo-o posteriormente numa frequência adequada para entrada na **unidade de desmodulação**. Nesse estágio, o sinal é novamente amplificado e remetido a um detector de fase, no sentido de se obter sintonia em frequência e fase com o sinal recebido durante a passagem do satélite sobre o local de recepção, sendo as frequências do sinal a receber submetidas a filtragem por intermédio de um filtro passa-banda. O fluxo de dados brutos resultante deste estágio é remetido para o **sincronizador de bits** com o objectivo de se proceder à recuperação dos dados de relógio e à descodificação do fluxo de dados resultantes da transmissão HRPT de um fluxo bruto em codificação Manchester para codificação Non Return to Zero (NRZ). Este fluxo de dados (dados de relógio e fluxo de dados NRZ) dá entrada no **módulo de sincronização de *frames* e interface USB**, reconstruindo-se assim o fluxo de dados HRPT, que é enviado para o computador de recepção, por via USB. O **módulo de interface com o receptor GPS e com o rotor** permite, por um lado, o estabelecimento de comunicações entre o rotor da antena e a *rack* de recepção e, por outro, a determinação da posição da estação de recepção e respectiva referência de data e hora, por intermédio de um receptor de GPS. Por último, a **fonte de alimentação da *rack*** permite a alimentação de todos os módulos da *rack* com tensões reguladas de 15 V e -15 V (DC), bem como uma linha de alimentação de 12,5 V dedicada ao *downconverter*/LNA. A fonte de alimentação providencia ainda uma linha de

alimentação DC não regulada para alimentação do receptor GPS e módulo de comunicação do rotor (Dartcom, 2003).

6.3.2 *Software de aquisição de sinal*

No que diz respeito ao *software* de aquisição de sinal de satélite, a estação de recepção HRPT da UA faz uso de uma solução assente em *software* proprietário da Dartcom, designada por *HRPT/CHRPT Grabber*, que lida com as tarefas de captura automática e armazenamento de dados HRPT/CHRPT, para além de constituir uma interface com o *hardware* (rotor da antena, receptor GPS, etc). Por intermédio de ficheiros TLE obtidos de forma automática a partir de um servidor da Dartcom, o sistema obtém os dados orbitais dos satélites cuja recepção se pretende, permitindo, pois, a calendarização da recepção de sinal de satélite sobre uma região de interesse (especificada no *software*), e, paralelamente, o controlo do azimute e elevação da antena em função da passagem do satélite sobre o local de recepção.

6.3.3 *Software de processamento de sinal*

Muito embora a solução proprietária da Dartcom oferecesse *software* básico de processamento do sinal de satélite adquirido, algumas razões de compatibilidade e portabilidade com a plataforma computacional arquitecturada para o desenvolvimento deste trabalho de investigação levaram o autor a abandonar o seu uso⁴. Assim, a solução adoptada para tratamento do sinal de satélite adquirido, decomutação e tratamento dos dados e posterior arquivo num formato comum, como o HDF, assentou num conjunto de soluções desenvolvidas por Peter Hollemans, da Terrenus Earth Sciences, desenvolvidas sob licença GNU GPL: o *avhrrd*, o *Terrenus HRPT ingest* e as *CoastWatch Utilities*. Este conjunto de *software* específico foi obtido por comunicação pessoal com o criador destes diferentes pacotes de *software*.

Deste modo, o *software avhrrd* consiste num conjunto de pacotes de processamento reunidos sob a forma de um serviço em execução permanente, de forma inobtrusiva, em segundo plano (conforme a definição de *daemon*, no jargão dos sistemas UNIX/LINUX) que age como um *proxy* entre o computador de recepção de sinal de satélite e as demais ferramentas de processamento, por forma a agilizar, por automação, as rotinas inerentes ao processamento dos ficheiros brutos adquiridos pela estação de recepção HRPT. Os seus principais componentes são, pois,

⁴Entre algumas razões, o *software* da Dartcom não permitia a exportação correcta do sinal adquirido em formato de nível 1b, ou em qualquer outro formato que permitisse uma correcta análise dos dados, sob o ponto de vista do processamento científico das imagens adquiridas.

1. O **Terrenus Earth Sciences HRPT ingest**, que foi concebido para o processamento de arquivos brutos (designados por dados em nível 0) decorrentes da aquisição de sinal de satélite de Estações NOAA HRPT ou CHRPT, da Agência Meteorológica Chinesa. O programa, desenvolvido na linguagem Java, efectua a decomutação dos dados AVHRR, procede à calibração térmica para cada um dos canais, determina coordenadas espaciais e ângulos derivados, devolvendo como resultado final um ficheiro em formato HDF4;
2. As **CoastWatch Utilities**, que são usadas para os procedimentos inerentes à re-projecção dos dados obtidos pelo **Terrenus Earth Sciences HRPT ingest**, sobre uma projecção de mapa definida, bem como para análise subsequente e renderização de produtos resultantes dos ficheiros HDF assim criados, como, por exemplo, a composição colorida RGB(1,2,4) que se ilustra na figura 6.5.

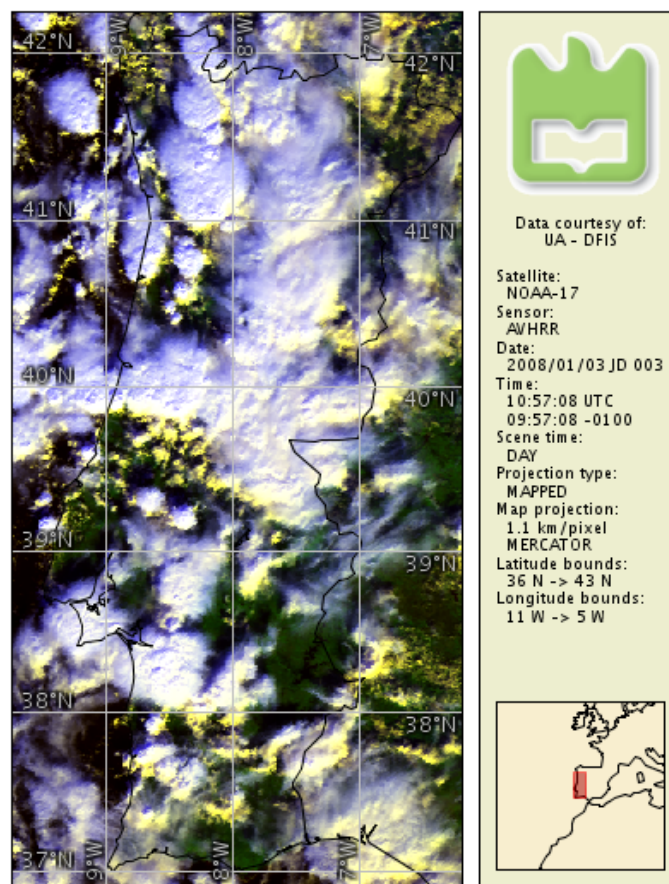


Figura 6.5: Exemplo de possível renderização dos produtos obtidos mediante o uso do software *CoastWatch utilities*: composição colorida RGB(1,2,4) de dados AVHRR reprojecados sobre um mapa de projecção Mercator, com informação adicional sobre os dados de origem.

O *daemon* *avhrrd* foi desenvolvido sob a forma de um *script* em Java BeanShell, co-ordenando todo o restante *software*, numa lógica de funcionamento específico que faz do *software* um possante gestor de dados. Assim, o *daemon* verifica periodicamente pela existência de novos ficheiros em formato bruto num directório específico, procedendo ao seu processamento até ao nível da criação dos ficheiros HDF4, descritos anteriormente.

6.4 Processamento de imagens AVHRR com vista à detecção de incêndios

6.4.1 Máscara de nuvens

O processo de identificação e delimitação de nuvens numa imagem de satélite é de extrema importância para diversas aplicações baseadas na detecção remota. Se, por um lado, a presença de nuvens limita a quantidade de informação válida sobre terra numa imagem, uma desvantagem clara, no que toca à detecção de incêndios, reside no facto de as nuvens poderem ocultar o foco de incêndio activo da cena, ou, ainda, em falsas detecções, em virtude de fenómenos de reflexão especular, ou bordos de nuvens poderem apresentar uma assinatura espectral no infravermelho médio similar à dos fogos florestais (Giglio et al., 2003). Neste sentido, o desenvolvimento de uma máscara de nuvens, possibilitando a distinção entre pixels com nuvens e pixels livres de nuvens, é crucial para garantir um desempenho fiável do modelo de detecção de incêndios.

A máscara de nuvens implementada, cujo código fonte se apresenta no anexo C, é baseada fundamentalmente no esquema *AVHRR Processing scheme Over cLOUDs, Land and Ocean* (APOLLO) (Saunders e Kriebel, 1988), e desenvolvimentos subsequentes (Kriebel et al., 2003), mais especificamente o de Azorin-Molina et al. (2013). Na sua forma básica, assenta em três simples testes, aplicados em imagens obtidas durante o dia, conforme esquematizado no diagrama da figura 6.6, e sobre os quais se detalha de seguida.

Na primeira etapa do processo que conduz à obtenção da máscara de nuvens é efectuado um teste de limites fixos simples, no sentido de seleccionar a maioria dos pixels da cena com nuvens. A premissa inerente ao teste é a de que, mesmo em meses mais frios, a temperatura da superfície do solo (LST) é sempre superior ao limite imposto.

O segundo teste é, tal como o anterior, um teste de limite fixo, baseado no facto de as nuvens serem mais reflectoras do que a superfície do solo. O último teste que é levado a cabo, faz uso do quociente entre a reflectividade no infra-vermelho próximo e o visível para agrupar pixels com nuvens. Os testes são efectuados sobre pixels que representem solo (a partir da máscara de separação água/solo aplicada previamente), devolvendo o valor lógico 1, indicador da presença de nuvens no pixel caso pelo menos dois dos três testes tenham

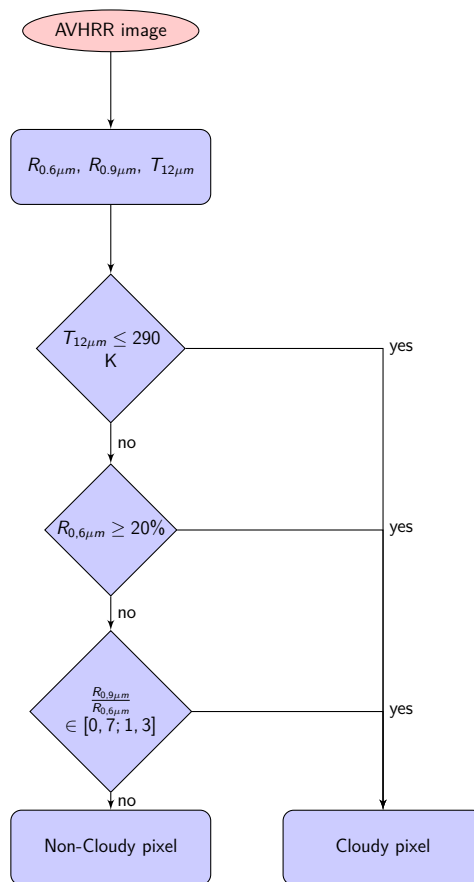


Figura 6.6: Esquematização dos testes efectuados para a obtenção da máscara de nuvens.

resultado positivo.

Como exemplo dos resultados propiciados pela máscara de nuvens implementada, a figura 6.7 ilustra a sua aplicação a uma imagem diurna captada pelo satélite NOAA-18, a 8 de Maio de 2008. Na composição colorida RGB(1,2,4) em 6.7a podem distinguir-se vários tipos e formas de nuvens, e em 6.7b pode apreciar-se o desempenho da máscara de nuvens.

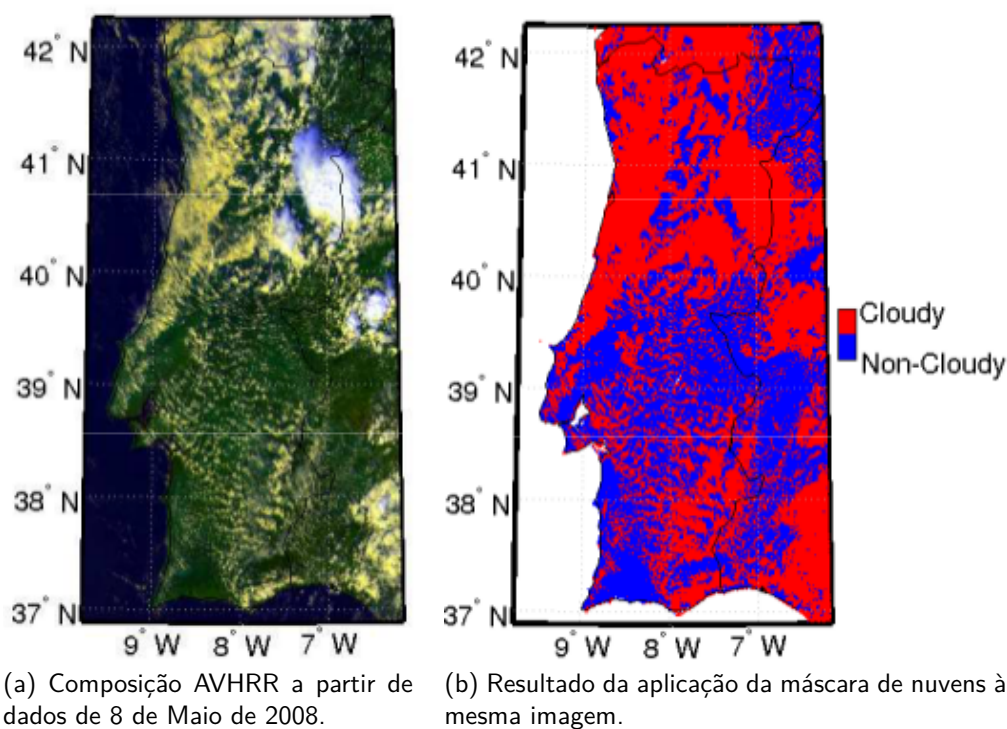


Figura 6.7: Resultado comparativo da *performance* da máscara de nuvens aplicada.

6.4.2 Algoritmo de detecção de focos de incêndio

No sentido de se proceder à detecção de focos de incêndio activos, o algoritmo de detecção implementado, cuja esquematização geral se apresenta na figura 6.8, são levados a cabo cinco testes dedicados à detecção da eventual presença de fogo num pixel das imagens resultantes do processamento do sinal HRPT adquirido pela Estação HRPT da Universidade de Aveiro, descritos nas secções anteriores.

De acordo com a esquematização da figura 6.8, o **primeiro teste**, de limiar fixo e absoluto, considera a existência de fogo num pixel da imagem sobre terra e não coberto por nuvens se o máximo valor da temperatura de brilho no canal 3 for superior ou igual ao limiar de saturação desse canal, isto é, 335 K.

O **segundo teste**, igualmente de limiares fixos, dedica-se à pesquisa, na imagem original, de pixels com temperatura de brilho no canal 3 superior ou igual a 315 K e que,

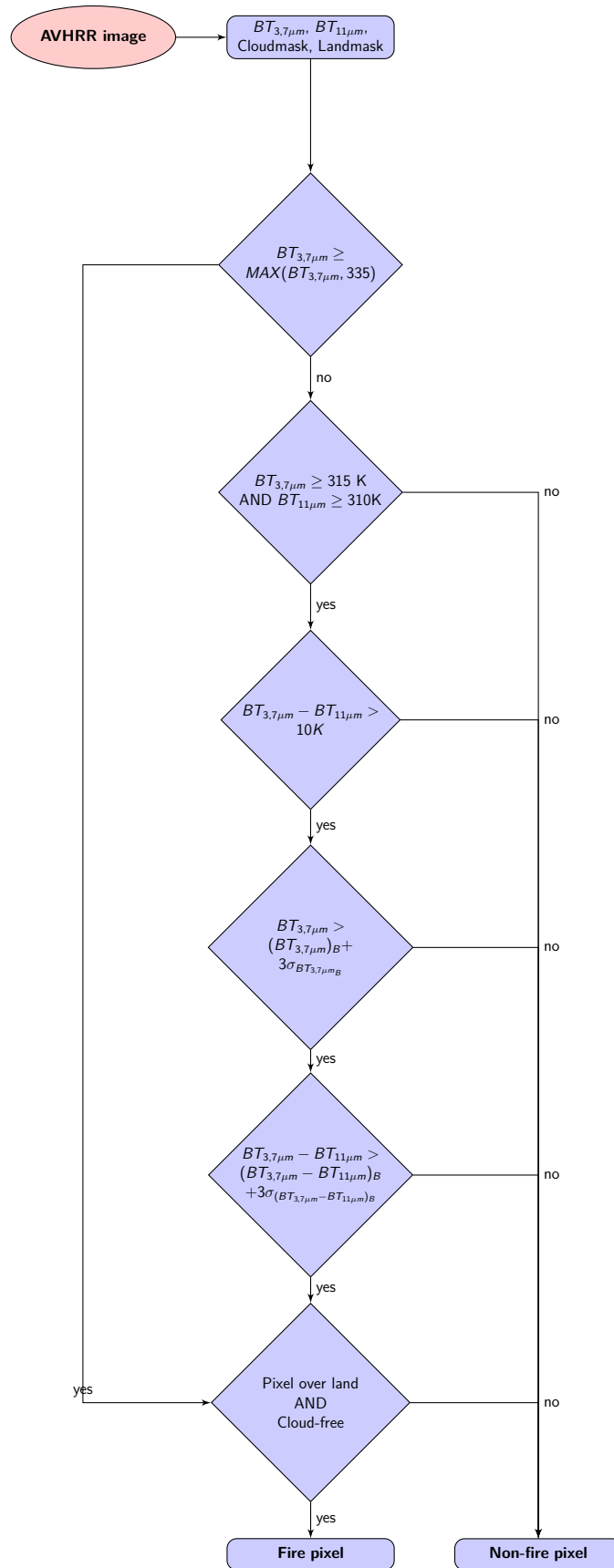


Figura 6.8: Esquematização dos testes efectuados para a detecção da presença de fogo num pixel de uma imagem AVHRR.

simultaneamente, exibam temperatura de brilho no canal 4 superior ou igual a 300 K, isto é:

$$T1 = BT_{ch3} \geq 315 \wedge BT_{ch4} \geq 300 \quad (6.1)$$

No teste anterior, os limiares propostos resultam, em primeiro lugar, do facto de a temperatura de brilho medida no canal 4 do AVHRR ser, de um modo geral, relativamente mais baixa que a temperatura de brilho detectada pelo canal 3, na pretensão de identificar todos os pixels da cena a temperaturas de brilho elevadas. O limiar imposto resulta do ajuste fino levado a cabo para as condições típicas de Verão, tendo sido analisadas as médias da temperatura de brilho dos canais 3 e 4 do AVHRR, para pixels sobre terra e não cobertos por nuvens em condições que incluam a presença ou a ausência de fogos. Dado que o algoritmo desenvolvido se dedica a funcionamento sobretudo nos meses de Verão, de imediato se reconhece que os limiares considerados consubstanciam um teste de banda larga, sobretudo nos meses marcados por dias mais quentes, pelo que se procurou usar de alguma parcimónia nos limites estabelecidos: limiares mais elevados podem levar a que determinados incêndios, mesmo que de grandes dimensões, não sejam detectados, ao passo que valores limites inferiores aos propostos podem resultar num aumento de falsos alarmes.

No sentido de efectuar uma triagem mais criteriosa dos pixels eventualmente detectados como fogo pelo teste anterior, um **terceiro teste**, igualmente de limiares fixos, resulta da imposição de um limite para a diferença entre as temperaturas de brilho registadas no canal 3 e no canal 4. Este teste, amplamente utilizado, baseia-se no facto de que, a $3,7 \mu\text{m}$ (isto é, na gama de comprimentos de onda de operação do canal 3b do AVHRR) a radiância de Planck aumenta grandemente num pixel onde exista fogo, comparativamente à radiância detectada a aproximadamente $11 \mu\text{m}$ (isto é, na região de operação do canal 4), em oposição ao que acontece numa situação de não existência de fogo num pixel.

Assim, para cada pixel onde exista um potencial foco de incêndio, a diferença entre as radiâncias, e, conseqüentemente, temperaturas de brilho, registadas no canal 4 e no canal 3, deve ser apreciavelmente grande, pelo que se impôs a condição:

$$T34 = BT_{ch3} - BT_{ch4} > 10 \quad (6.2)$$

No intuito de permitir a identificação de eventuais incêndios mais pequenos, ou de mais baixa potência radiativa, presentes numa imagem, o **quarto e quinto testes** constituem elementos contextuais de determinação da temperatura de brilho da envoltória da cena e comparação das temperaturas de brilho do canal 3 e da diferença das temperaturas de brilho entre os canais 3 e 4 com os valores resultantes desta análise de vizinhança.

Neste sentido, são determinados a temperatura de brilho média da vizinhança, \overline{BT} , no

canal 3, e a média local da diferença entre as temperaturas de brilho registadas nos canais 3 e 4, bem como os respectivos desvios-padrão destas grandezas (σ), numa janela de 5×5 pixels, varrendo toda a imagem. Estabeleceram-se, assim, o quarto e quinto testes como:

$$BT_{3,7\mu m} > \overline{BT_{3,7\mu m}} + 3\sigma_{BT_{3,7\mu m}} \quad (6.3)$$

$$BT_{3,7\mu m} - BT_{11\mu m} > \overline{BT_{3,7\mu m} - BT_{11\mu m}} + 3\sigma_{BT_{3,7\mu m} - BT_{11\mu m}} \quad (6.4)$$

Em ambos os testes anteriormente mencionados, foram testados vários tamanhos de janelas (3×3 , 5×5 , 7×7 , 9×9 e 11×11 pixels), tendo-se verificado que a escolha da janela de 5×5 pixels minimiza os falsos alarmes.

A combinação dos testes lógicos levados a cabo para a identificação de focos de incêndio activos num pixel da imagem AVHRR requer a satisfação do primeiro teste ou a satisfação simultânea dos demais quatro testes, sendo filtrados os resultados que identifiquem pixels sobre água ou cobertos por nuvens (de acordo com a aplicação da máscara de nuvens descrita na subsecção anterior), isto é:

$$fire = (firetest1 \vee ((firetest2 \wedge firetest3) \wedge (firetest4 \wedge firetest5))) \wedge (land) \wedge (\neg clouds) \quad (6.5)$$

6.5 Implementação do algoritmo

O algoritmo de detecção de focos de incêndio anteriormente exposto foi implementado na linguagem de programação MATLAB, versão R2013a, sendo o seu código-fonte exibido no anexo D.

Para uma imagem, em formato hdf, especificada como ficheiro de entrada, são importados alguns atributos gerais dos dados, nomeadamente o nome do satélite, o tipo de cena (imagem diurna ou nocturna) e a data e hora completas referentes ao instante de aquisição da imagem. Por outro lado, é igualmente obtido o vector que especifica os coeficientes de navegação da imagem, permitindo, pois, colmatar eventuais erros de navegação. Os dados de latitude e longitude são importados, bem como os dados de cada um dos canais do AVHRR, devidamente calibrados e escalados.

A correcção dos dados dos canais AVHRR é efectuada levando em conta a matriz de coeficientes de navegação. Assim, a posição de uma linha R' e de uma coluna C' correctamente navegadas é obtida por transformação da linha, R , e coluna, C , originais da matriz de dados de cada canal AVHRR a partir dos coeficientes de navegação, como

(Holleman, 2013):

$$\begin{bmatrix} R' \\ C' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & c & e \\ b & d & f \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R \\ C \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

No caso das imagens utilizadas neste estudo, as novas linhas e colunas das bandas AVHRR foram apenas sujeitas a translações lineares ($a = d = 1$ e $b = c = 0$), dadas por:

$$\begin{cases} R' = R + e \\ C' = C + f \end{cases} \quad (6.7)$$

Tendo esta translação em conta, os dados das bandas AVHRR são corrigidos em conformidade e sujeitos ao processamento da máscara de nuvens, sendo devolvido, como resultado, um mapa binário da presença ($clouds = 1$) ou ausência ($clouds = 0$) no pixel analisado.

Para a determinação das médias de temperatura do canal 3 e da diferença entre as temperaturas de brilho dos canais 3 e 4, bem como dos respectivos desvios-padrão, é feito uso das funções da *toolbox* de processamento de imagem `imfilter` e `stdfilt`, sendo o núcleo de convolução especificado com recurso à função `fspecial` da mesma *toolbox*.

Do mapa binário correspondente ao resultado final da combinação lógica dos testes de detecção expostos na secção anterior, são extraídas as coordenadas geográficas (latitude e longitude) dos pixels identificados como fogo, sendo posteriormente exportadas para um ficheiro de texto. Adicionalmente, é criado um mapa, onde se representam os fogos identificados, tendo como fundo uma composição RGB(1,2,4) da imagem adquirida, bem como as informações relativas ao nome do satélite e respectivas data e hora de aquisição da imagem. O processamento do algoritmo, de acordo com a sua implementação, carece de um intervalo de tempo, na generalidade, inferior a 10 segundos, para a obtenção de todos os resultados, em consonância com a intencionalidade de operação em tempo real.

6.6 Resultados obtidos com o modelo de detecção proposto

O modelo de detecção de focos de incêndio anteriormente explorado foi aplicado às imagens obtidas pelo satélite NOAA-19, durante alguns dias dos meses de Julho e Agosto de 2010, nomeadamente nos períodos de 25 a 29 de Julho, 4 a 7 de Agosto, 13 a 14 de Agosto e 27 de Agosto, sendo comparados com os dados de detecção de incêndios MODIS, obtidos via FIRMS, para os mesmos períodos e em horário consonante com o das imagens AVHRR, permitindo, assim, estabelecer algumas comparações sobre a distribuição espacial

dos focos de incêndio detectados, bem como a validação do algoritmo de detecção proposto, conforme se refere na secção seguinte. As figuras 6.9 a 6.20 pretendem, portanto, ilustrar o que se considera, de um modo geral, uma boa concordância entre as detecções efectuadas com o algoritmo proposto e as detecções MODIS.

Por outro lado, tendo em conta os dados do relatório anual de áreas ardidas e ocorrências em 2010, do ICNF, relativos aos grandes incêndios (área ardida igual ou superior a 100 hectares) ocorridos nos períodos em análise, devidamente filtrados cruzando-os com o ficheiro de ocorrências de incêndios florestais para o ano de 2010, disponível *online* no sítio web do ICNF, são registados na tabela 6.3 as ocorrências de incêndio reportadas no referido relatório identificadas pelo algoritmo de detecção proposto, ao nível da concordância da freguesia⁵, tendo-se removido resultados cuja hora de alerta, no referido relatório, fosse incongruente com a hora de aquisição das imagens AVHRR. Deve, adicionalmente, referir-se que três das detecções AVHRR constantes nos dados do relatório não foram confirmadas pelo MODIS: as ocorrências do dia 4 de Agosto, nos concelhos de Vila Pouca de Aguiar (distrito de Vila Real) e de Carrazeda de Ansiães, no distrito de Bragança, assim como a ocorrência de 7 de Agosto, no concelho de Valença, do distrito de Viana do Castelo.

6.7 Validação dos resultados obtidos

O processo de validação dos resultados obtidos constituiu uma das mais morosas tarefas inerentes à avaliação do modelo de detecção de focos de incêndio activos proposto. Por um lado, há que reconhecer que as diferenças nas órbitas dos satélites NOAA e TERRA/AQUA, e as próprias características dos respectivos sensores AVHRR e MODIS, não torna possível a obtenção de coincidências pontuais absolutas entre as detecções de incêndio MODIS e as detecções providenciadas pelo algoritmo proposto. Por outro, dada a dinâmica intrínseca dos incêndios florestais, e, ainda, o facto de o sinal térmico resultante de incêndios florestais poder ser de curta duração, deve reconhecer-se, dada a não coincidência temporal dos dados adquiridos, que podem existir discrepâncias entre as detecções de incêndio AVHRR e as detecções MODIS, aqui assumidas como constituindo a melhor fonte de verdade terrestre sobre a ocorrência de incêndios, muito embora se reconheça a potencial falibilidade do produto.

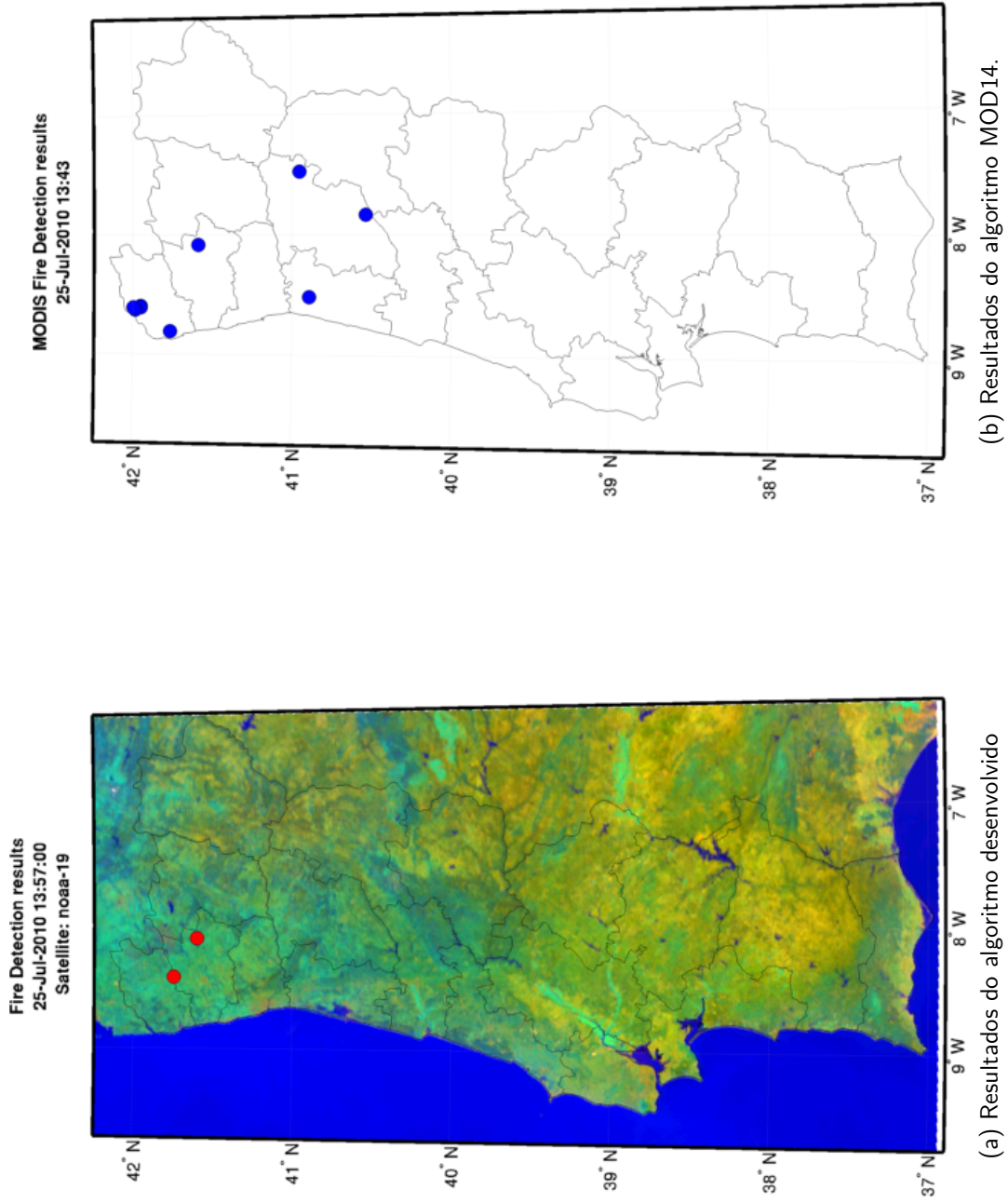
Adicionalmente, procurou-se fazer uso de imagens em condições de céu limpo, minimizando, assim, falsas detecções ou omissões em virtude da cobertura de nuvens por parte dos dois produtos em comparação. Deste requisito, aliado ao funcionamento anómalo da estação de recepção HRPT da Universidade de Aveiro, resultou um conjunto de dados de

⁵Fazendo uso da metodologia descrita na secção seguinte, isto é, estabelecendo um *buffer* de raio igual a aproximadamente dois pixel AVHRR em torno de cada ponto, considerado como em fogo, pelo modelo de detecção.

6.7 Validação dos resultados obtidos

Data	Distrito	Concelho	Freguesia	Área total ardida (ha)	Hora alerta
26/07/2010	Aveiro	Sever do Vouga	Sever do Vouga	295	12:35
26/07/2010	Aveiro	Santa Maria da Feira	Canedo	1165	16:30
26/07/2010	Braga	Fafe	Monte	934	11:14
26/07/2010	Setúbal	Alcácer do Sal	Comporta	1770	13:23
26/07/2010	Viana do Castelo	Caminha	Arga de São João	553	12:41
27/07/2010	Guarda	Almeida	Naves	379	01:31
27/07/2010	Viseu	Oliveira de Frades	Sejães	179	08:45
27/07/2010	Aveiro	Arouca	S. Miguel do Mato	1032	17:59
27/07/2010	Porto	Marco de Canaveses	Soalhães	481	17:25
27/07/2010	Viana do Castelo	Arcos de Valdevez	Pedreiro (Sta. Cristina)	117	15:31
28/07/2010	Viana do Castelo	Viana do Castelo	Montaria	543	03:35
29/07/2010	Braga	Celorico de Basto	Ribas	190	09:57
04/08/2010	Braga	Terras de Bouro	Rio Caldo	749	08:00
04/08/2010	Bragança	Carrazeda de Ansiães	Marzagão	1286	13:44
04/08/2010	Vila Real	Vila Pouca de Aguiar	Tresminas	100	14:15
05/08/2010	Viana do Castelo	Monção	Portela	272	13:00
05/08/2010	Vila Real	Ribeira de Pena	Alvadia	3380	01:35
05/08/2010	Bragança	Mogadouro	Bruçó	880	12:33
06/08/2010	Viseu	S. Pedro do Sul	São Cristóvão de Lafões	5066	11:05
06/08/2010	Aveiro	Castelo de Paiva	Pedorido	522	09:41
06/08/2010	Braga	Fafe	Queimadela	124	17:36
06/08/2010	Braga	Fafe	Várzea Cova	695	11:25
06/08/2010	Braga	Fafe	Serafão	254	16:14
07/08/2010	Viseu	Cinfães	Nespereira	521	10:52
07/08/2010	Leiria	Pombal	Abiul	439	14:00
07/08/2010	Porto	Penafiel	Abragão	264	13:31
07/08/2010	Viana do Castelo	Valença	Sanfins	405	14:30
07/08/2010	Bragança	Macedo de Caveleiros	Lagoa	411	14:16
13/08/2010	Viseu	Mangualde	Abrunhosa-a-Velha	1105	13:15
13/08/2010	Viana do Castelo	Ponte da Barca	Lindoso	3059	08:46
13/08/2010	Viana do Castelo	Valença	Sanfins	100	01:31

Tabela 6.3: Fogos de grandes dimensões na base de dados de fogos do ICNF detectados pelo modelo de detecção proposto.



(a) Resultados do algoritmo desenvolvido

(b) Resultados do algoritmo MOD14.

Figura 6.9: Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 25 de Julho de 2010.

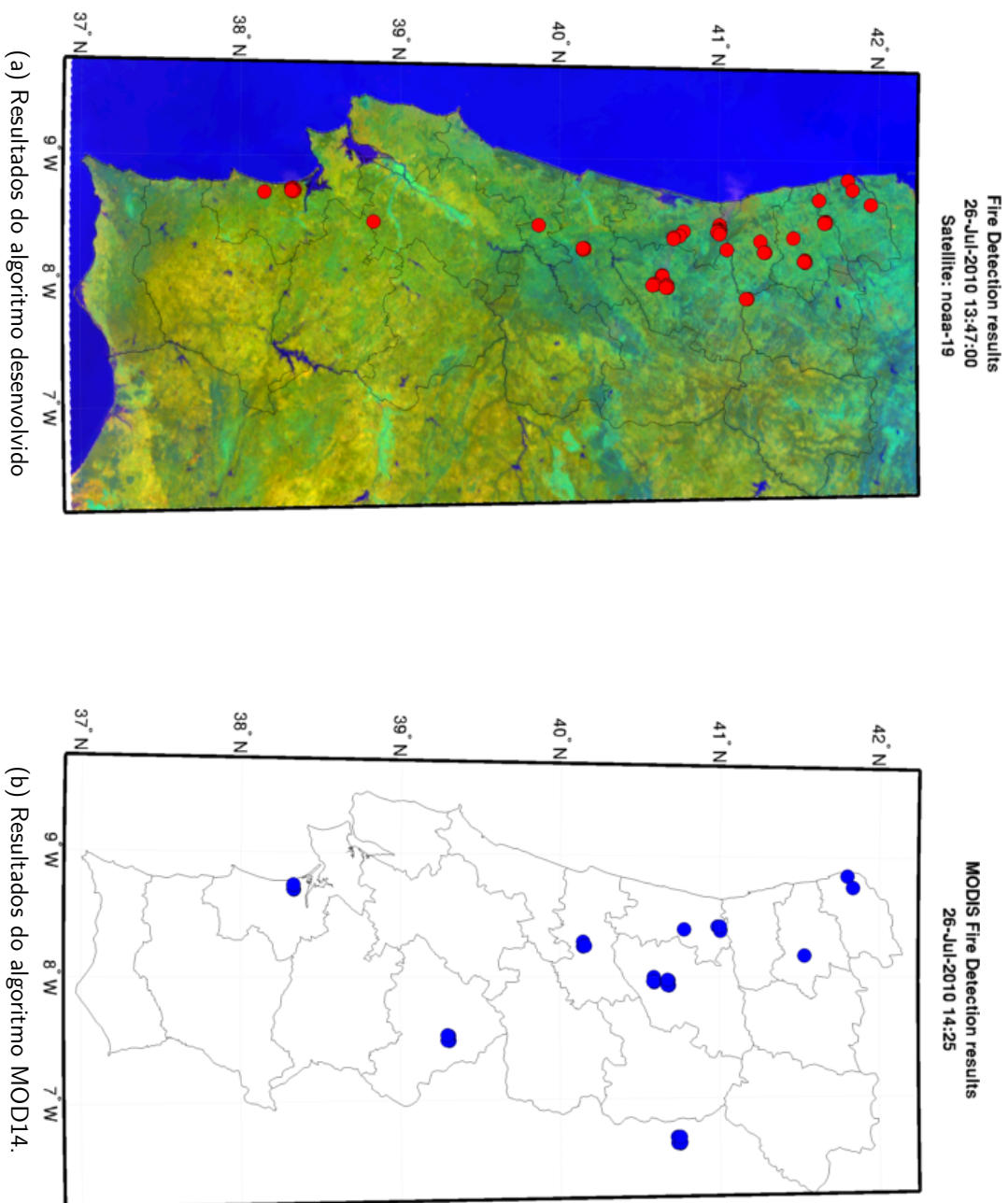


Figura 6.10: Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 26 de Julho de 2010.

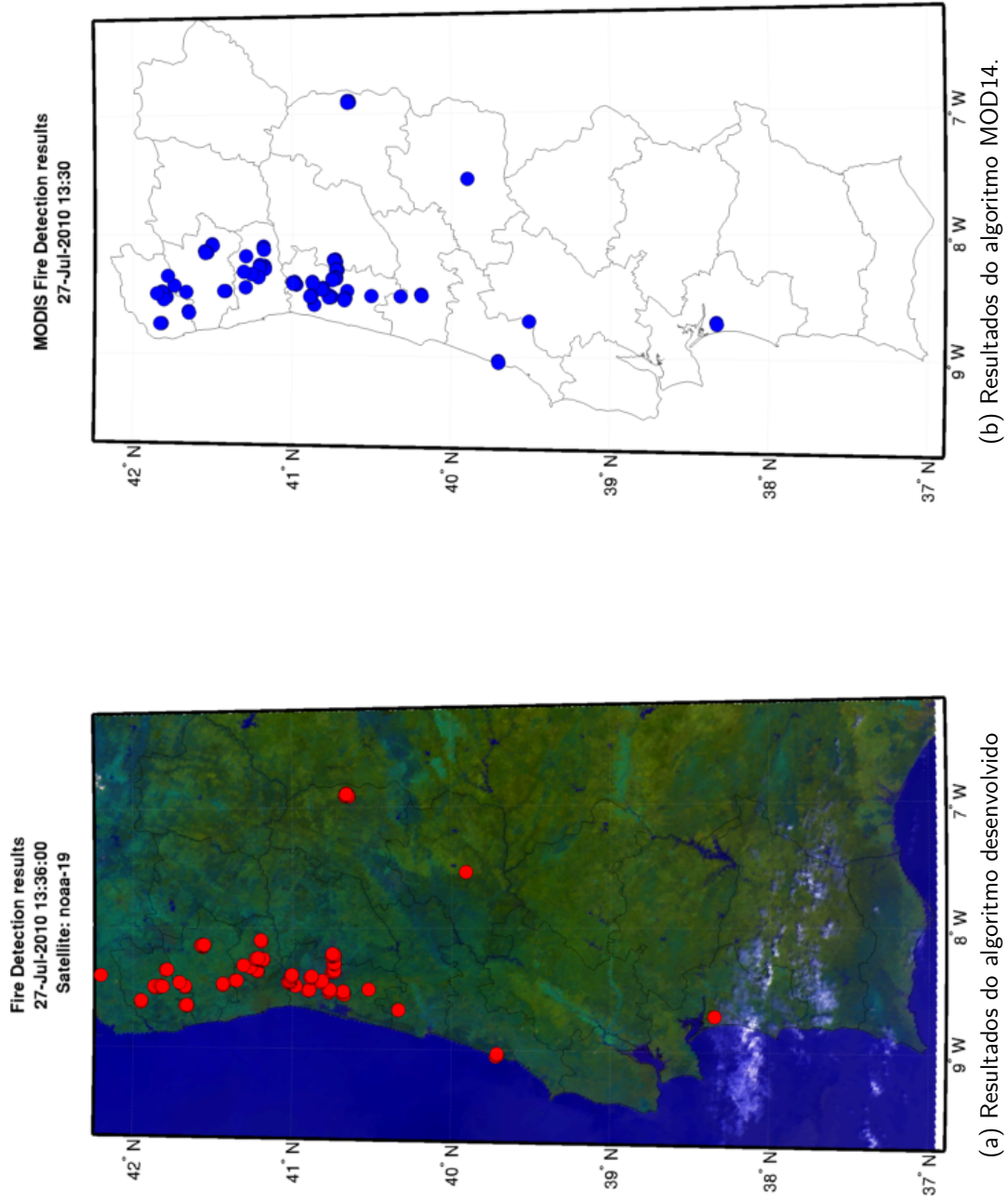


Figura 6.11: Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 27 de Julho de 2010.

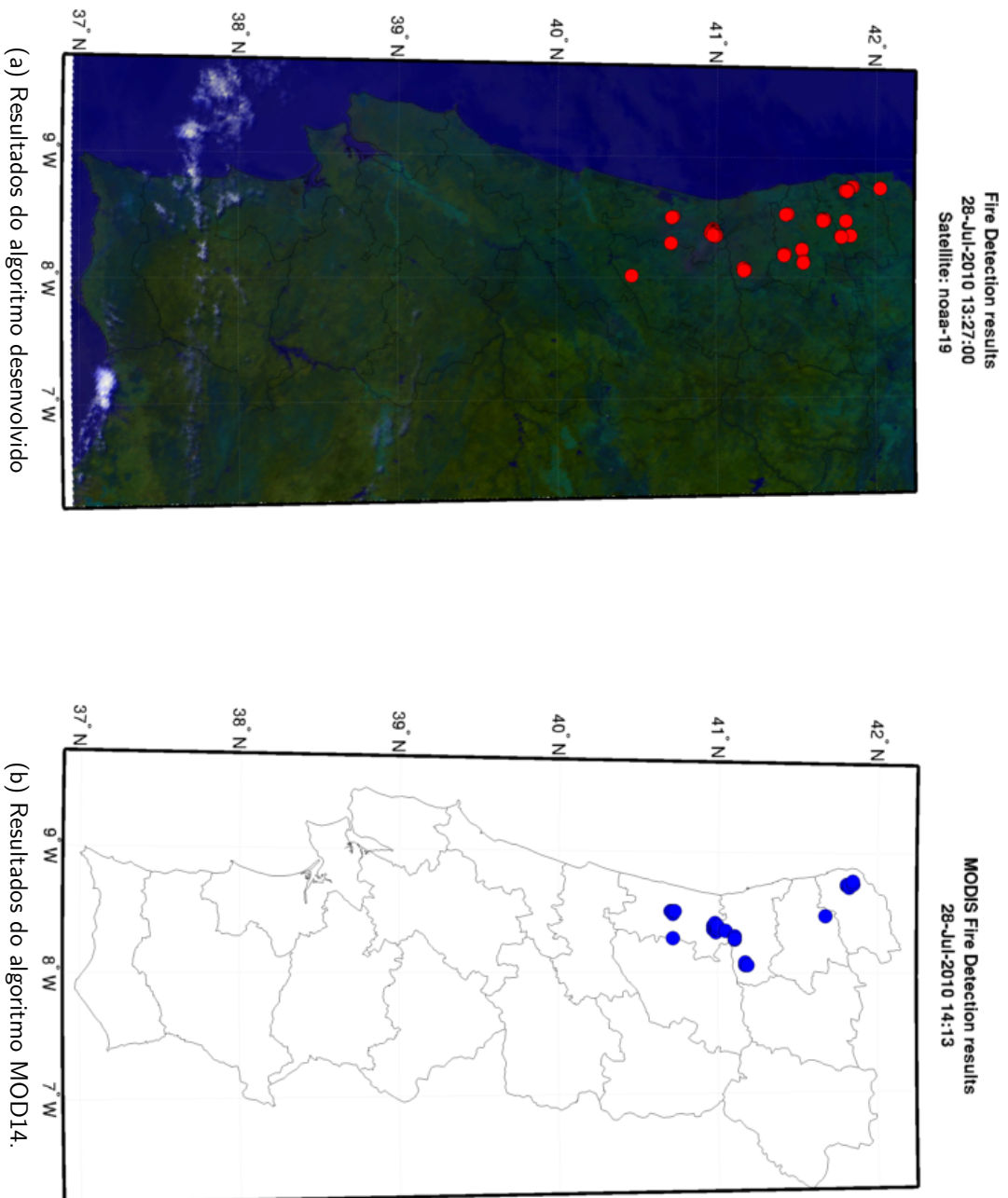
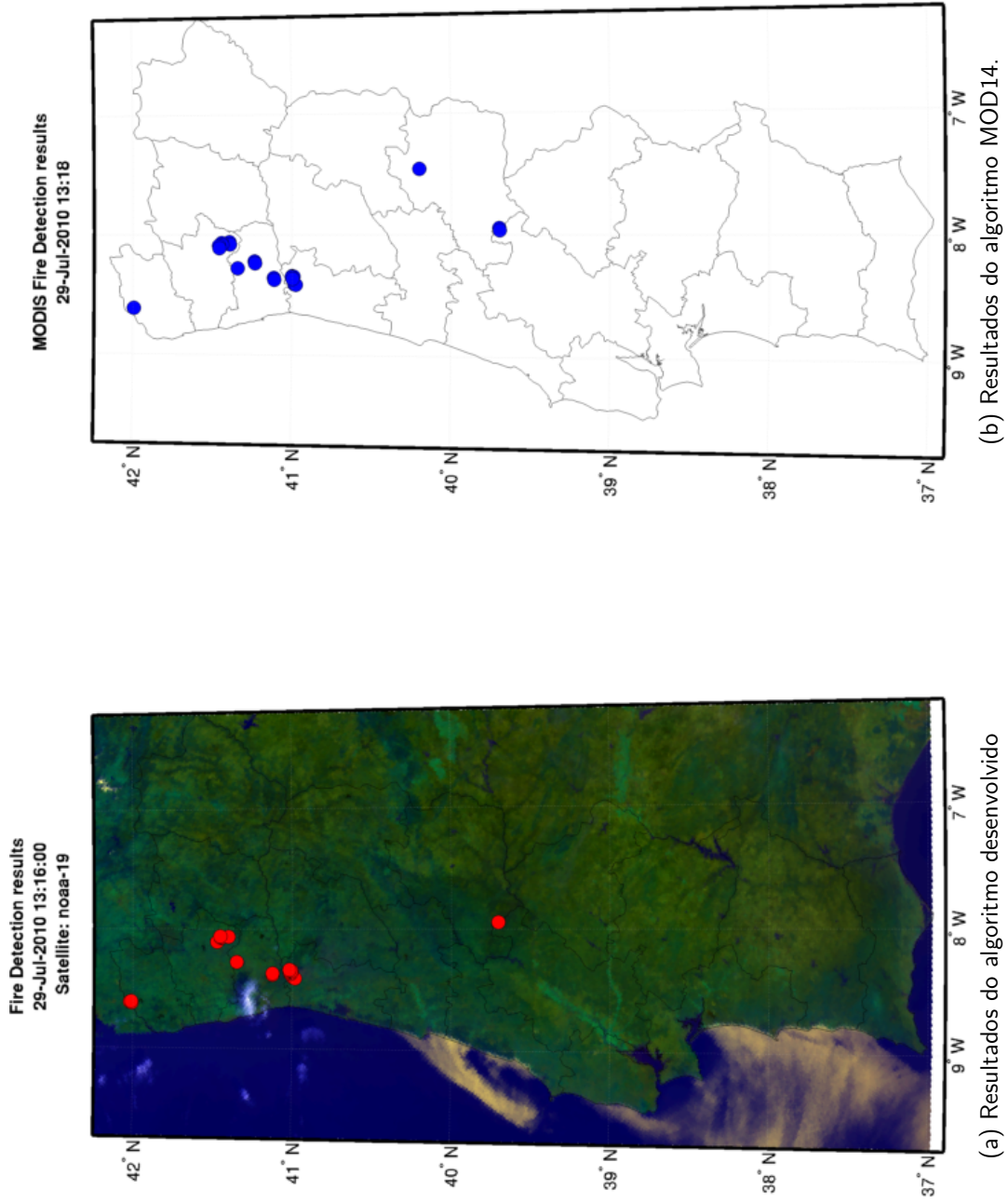


Figura 6.12: Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 28 de Julho de 2010.



(a) Resultados do algoritmo desenvolvido

(b) Resultados do algoritmo MOD14.

Figura 6.13: Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 29 de Julho de 2010.

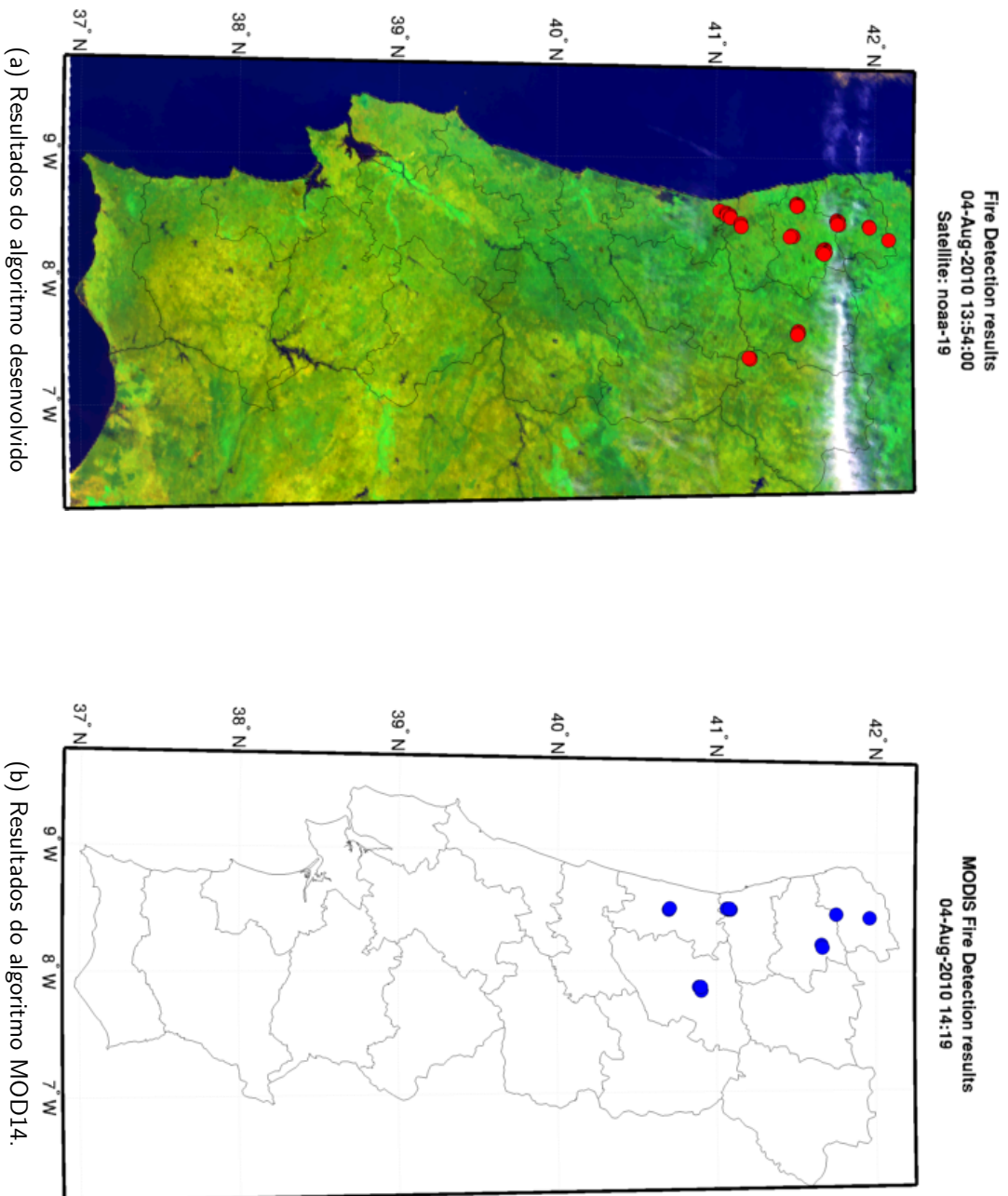
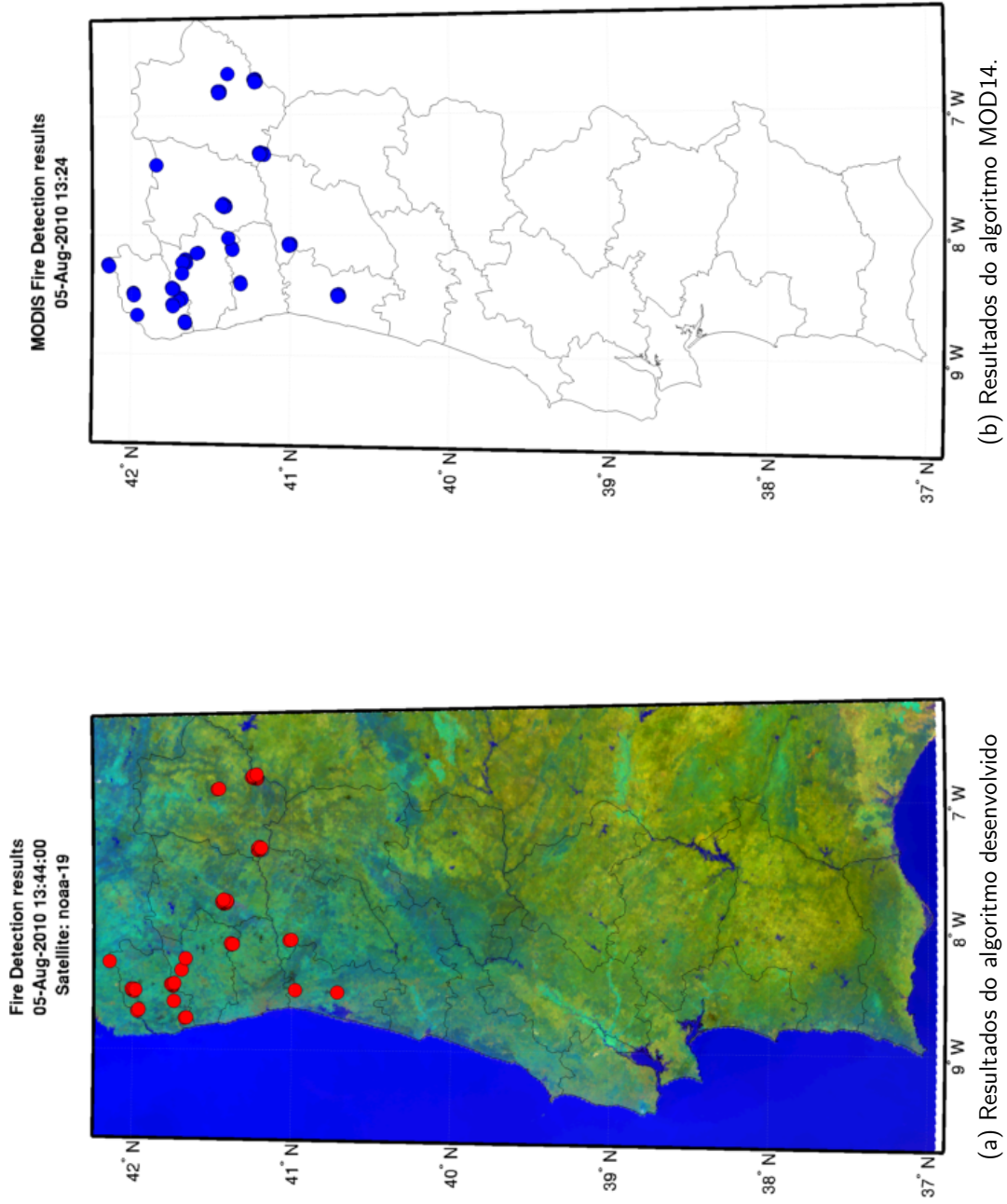


Figura 6.14: Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 4 de Agosto de 2010.



(a) Resultados do algoritmo desenvolvido

(b) Resultados do algoritmo MOD14.

Figura 6.15: Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 5 de Agosto de 2010.

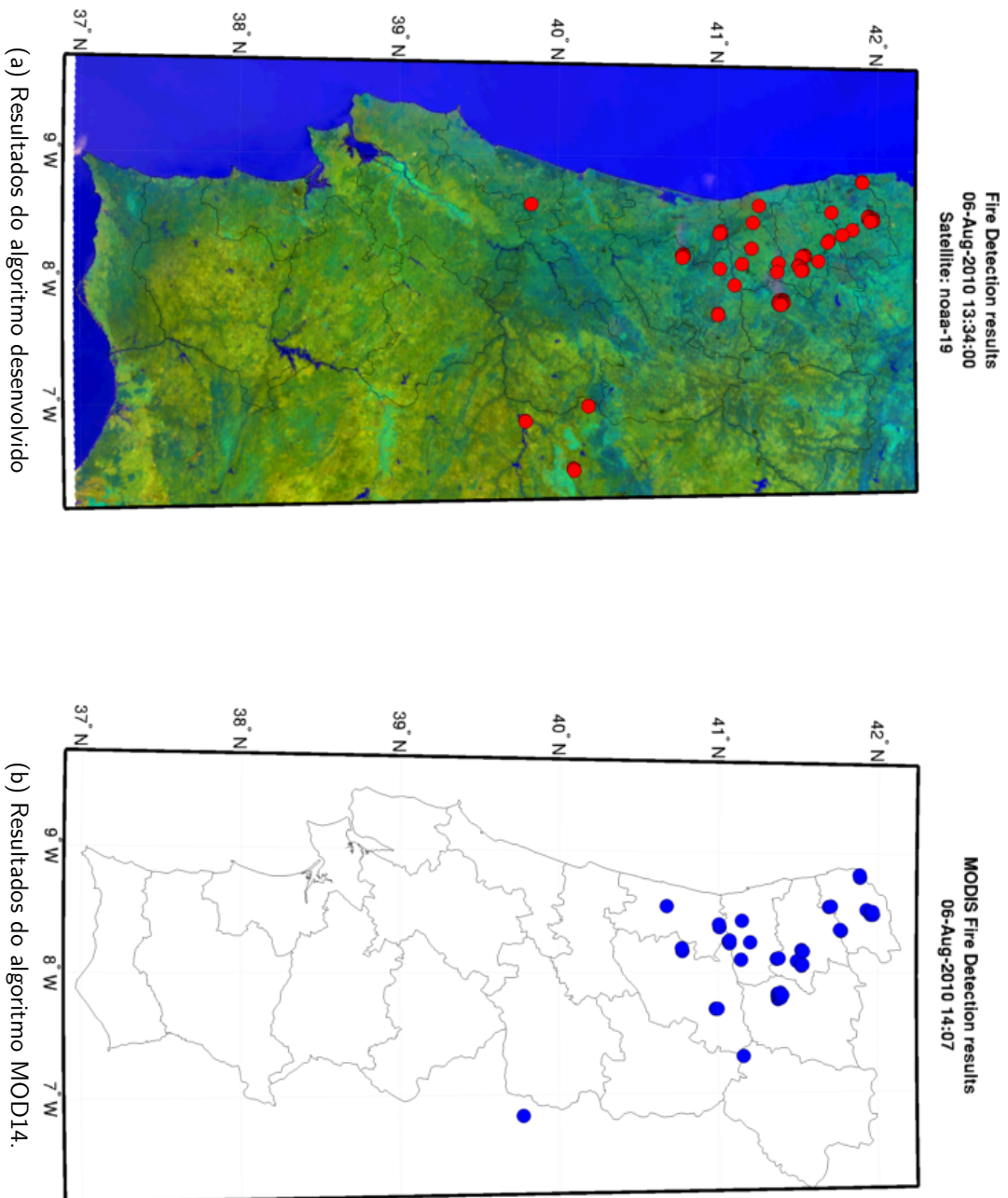


Figura 6.16: Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 6 de Agosto de 2010.

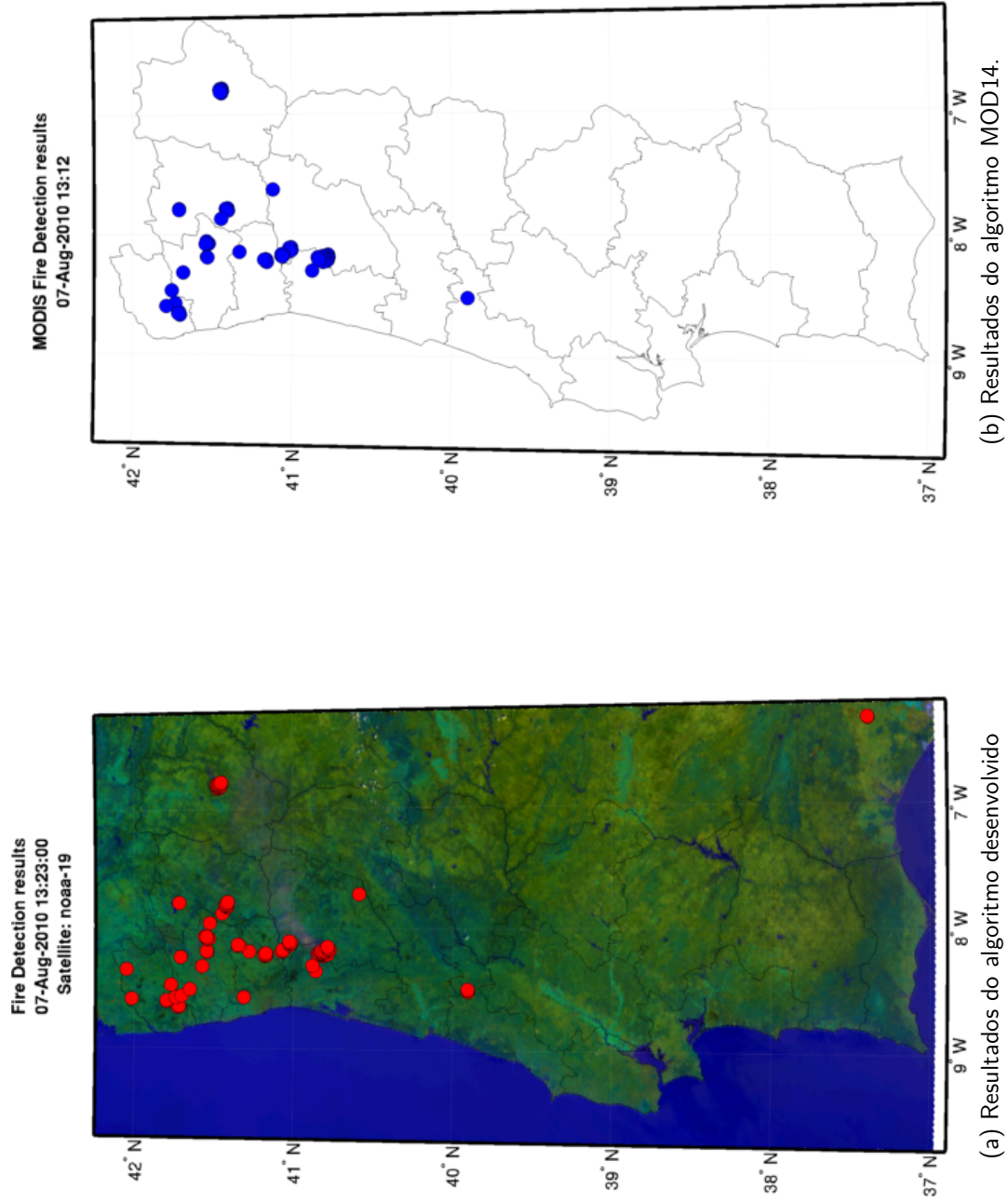


Figura 6.17: Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 7 de Agosto de 2010.

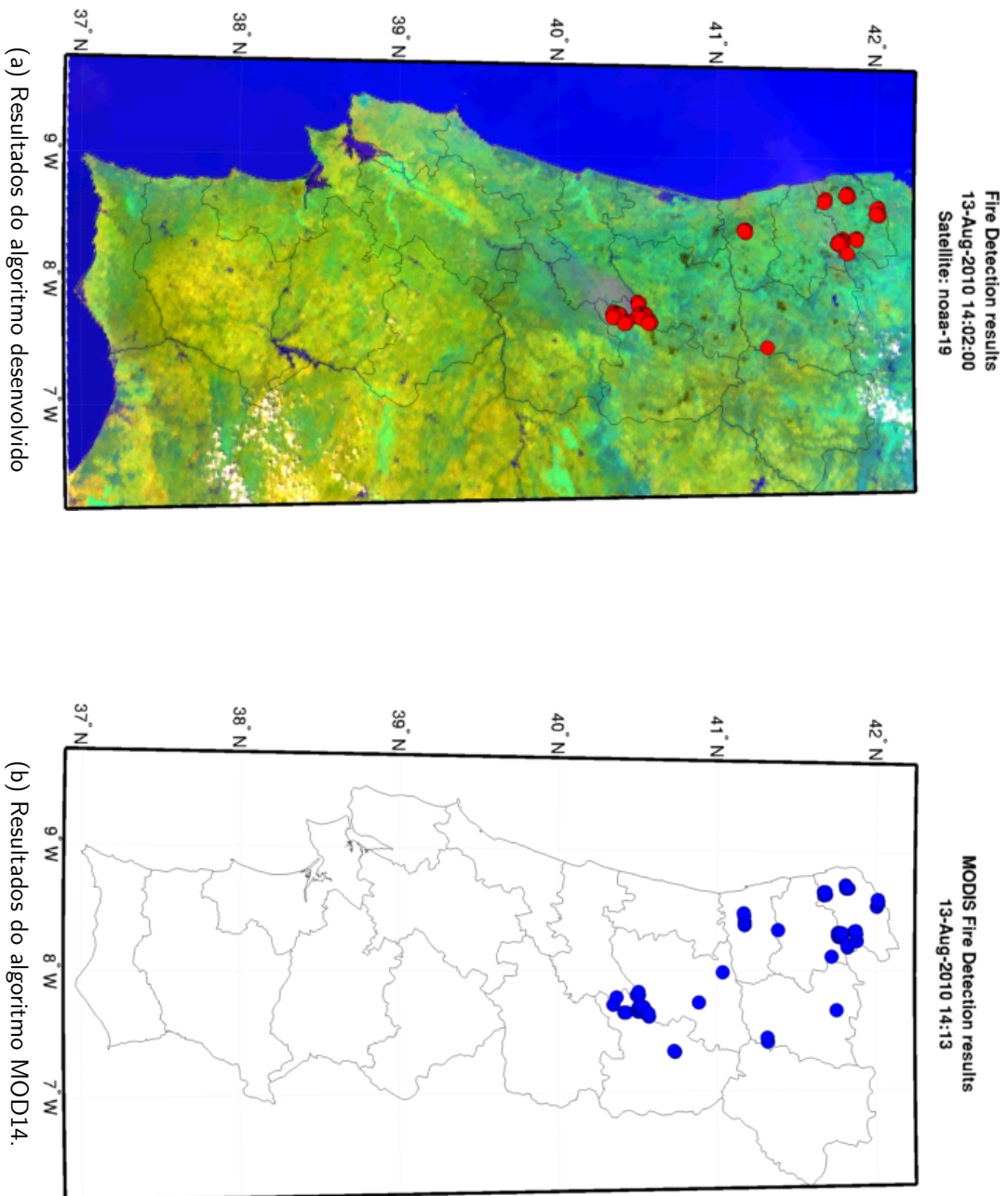
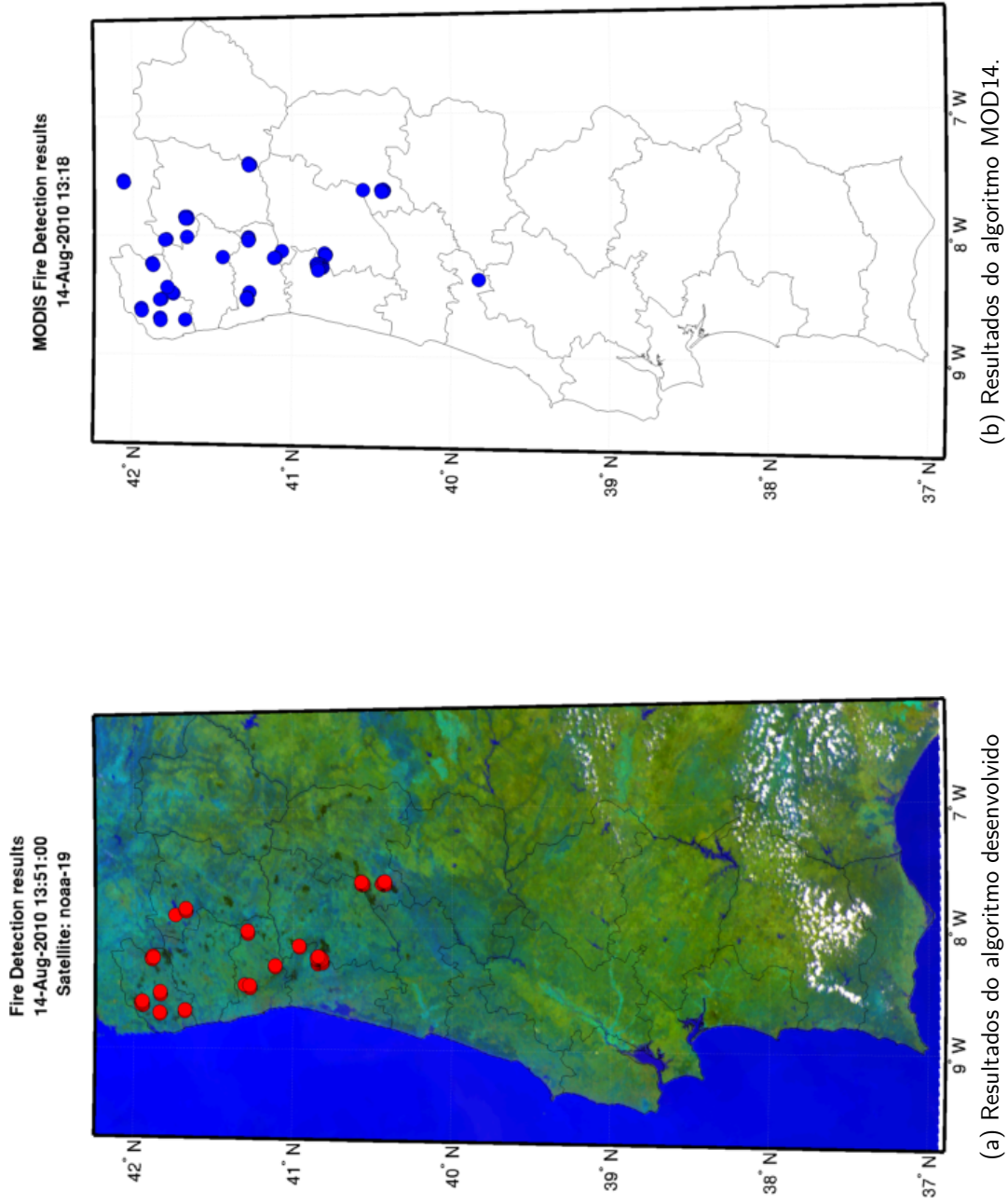


Figura 6.18: Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 13 de Agosto de 2010.



(a) Resultados do algoritmo desenvolvido

(b) Resultados do algoritmo MOD14.

Figura 6.19: Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 14 de Agosto de 2010.

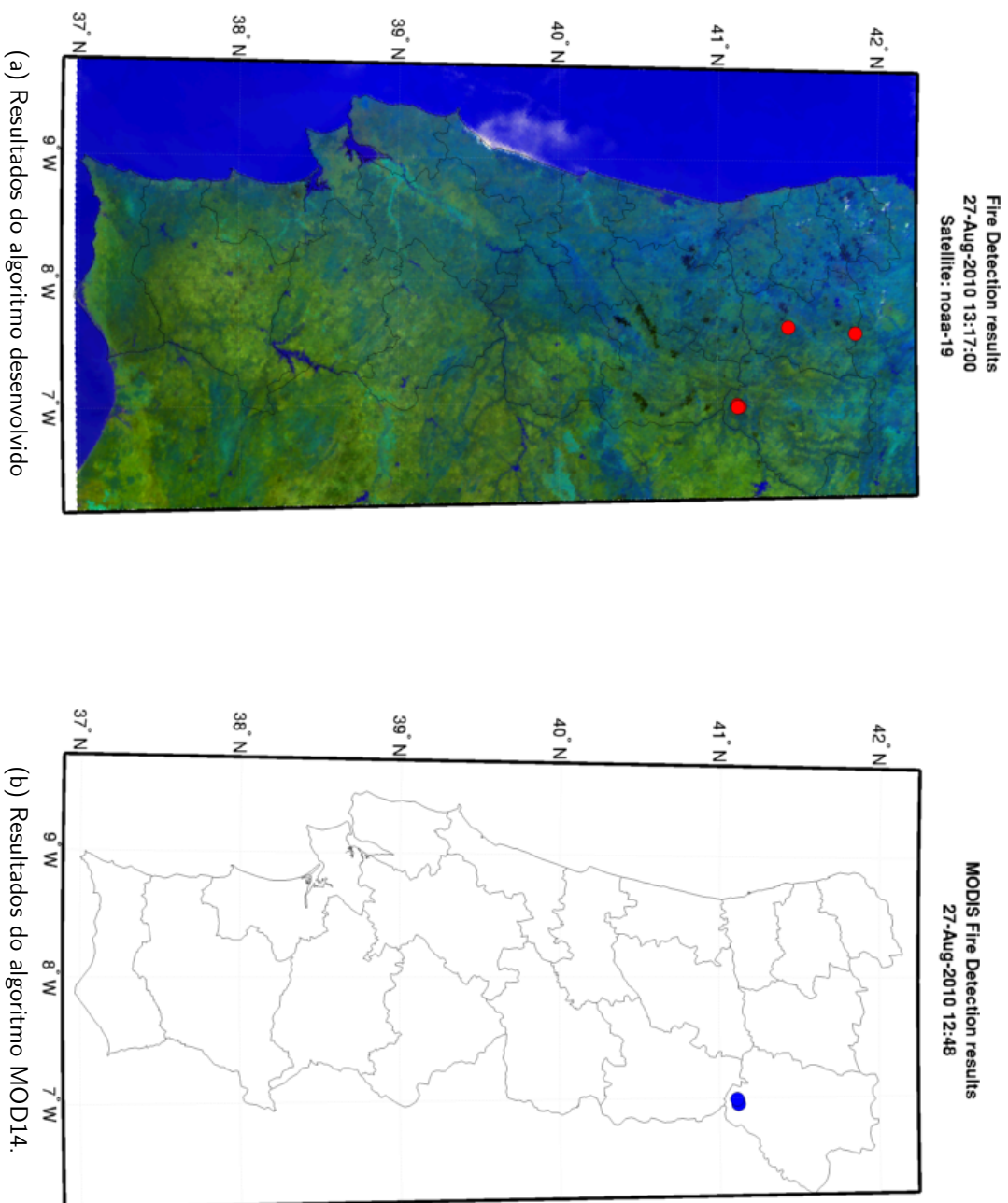


Figura 6.20: Focos de incêndio detectados pelo algoritmo desenvolvido comparativamente às detecções MODIS, a 27 de Agosto de 2010.

validação constituído pelas doze imagens AVHRR das figuras 6.9 a 6.20.

A metodologia de validação empregue, similar à exposta no capítulo 5, baseou-se, para além dos acima mencionado requisitos, nas seguintes premissas: Sobre cada ponto identificado como fogo do produto MODIS foi criado um buffer circular de, aproximadamente, 2 km (correspondente, aproximadamente, a dois pixels MODIS). No caso de se verificar a clara sobreposição dos círculos assim traçados, considerou-se que estes delimitam um único evento de incêndio. De igual modo, para os resultados de detecção de focos de incêndio com recurso ao modelo proposto, foi delimitado cada ponto por um buffer circular, de raio igual a, aproximadamente, 2 km, nas mesmas condições do que se efectuou para os dados MODIS. Analogamente, foi considerada como uma única ocorrência de fogo o caso resultante da intersecção de dois ou mais buffers sobrepostos. Adicionalmente, no caso da não sobreposição imediata de um buffer MODIS com um buffer AVHRR, estabeleceu-se um limite de tolerância, inferior a 500 m, entre os limites de dois buffers, segundo o qual se considerou haver intersecção, conforme sistematiza a figura 6.21, onde se representa o que se considera como dez eventos correctamente detectados, três eventos MODIS não detectados e uma falsa detecção AVHRR. Apenas foram consideradas ocorrências sobre o território continental português. A avaliação da percentagem de eventos de fogo detectados (PA), dos erros de comissão (EC) e dos erros de omissão (EO), de forma análoga ao definido no capítulo 5, foi levada a cabo tendo em conta a intersecção dos buffers AVHRR com os buffers MODIS, constituindo, assim, verdadeiros positivos. Por outro lado, considerou-se que a não intersecção de buffers AVHRR com buffers MODIS representa verdadeiros negativos, e a identificação de buffers AVHRR não intersectados por buffers MODIS como falsos positivos.

A tabela 6.4 sistematiza a informação respeitante ao número de eventos de fogo detectados pelo MODIS e pelo AVHRR (codificados, na tabela 6.4, como MODIS sim/AVHRR sim), número de eventos de fogo detectados pelo MODIS mas não detectados pelo AVHRR (codificados, na tabela 6.4, como MODIS sim/AVHRR não), número de eventos de fogo não detectados pelo MODIS, mas detectados pelo AVHRR (codificados, na tabela 6.4, como MODIS não/AVHRR sim) e respectiva percentagem de eventos de fogo detectados (PA), erros de omissão (EO) e erros de comissão (EC), para os períodos em análise.

Do resultado da validação levada a cabo, podem ser tecidas algumas considerações. Assim, em primeiro lugar, verifica-se que, de um modo geral, o modelo de detecção desenvolvido apresenta uma boa concordância com os resultados do produto de detecção de incêndios MODIS, tendo-se verificado, para os períodos em análise e segundo a metodologia aplicada, uma percentagem de eventos de fogo correctamente identificados superior a 70%. Já as falsas detecções registadas podem ser explicadas, em parte, tendo em conta a contribuição da radiação solar reflectida para o sinal do canal 3 do AVHRR, reconhecendo-

6.7 Validação dos resultados obtidos

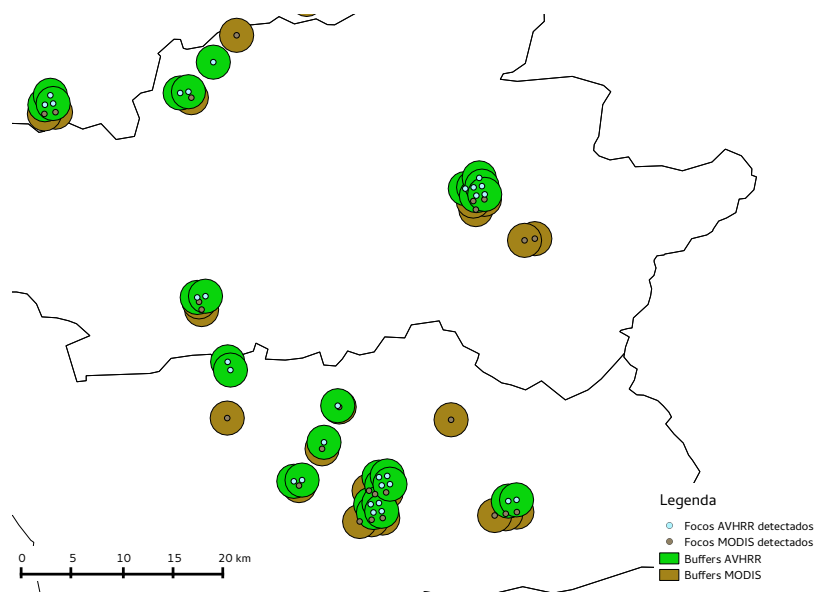


Figura 6.21: Exemplo ilustrativo da metodologia utilizada para a validação das detecções de incêndio com o algoritmo proposto, comparativamente às detecções de incêndio MODIS.

se, igualmente, as diferenças entre os dois sensores. Não obstante, tendo em conta os resultados previamente ilustrados nas figuras 6.9 a 6.20, o algoritmo desenvolvido consegue reproduzir, com bastante semelhança, os padrões de ocorrências de incêndio detectados pelo radiómetro MODIS, o que constitui, numa análise de cariz qualitativo, um indicador de bom desempenho do algoritmo desenvolvido.

Data	Hora AVHRR	Hora MODIS	MODIS sim/AVHRR sim	MODIS sim/AVHRR não	MODIS não/AVHRR sim	PA	EO	EC
25/7/2010	13:58:00	13:43:00	1	6	1	14,29%	85,71%	50,00%
26/7/2010	13:47:00	14:25:00	9	2	12	81,82%	18,18%	57,14%
27/7/2010	13:37:00	13:30:00	27	9	4	75,00%	25,00%	12,90%
28/7/2010	13:27:00	14:13:00	6	2	8	75,00%	25,00%	57,14%
29/7/2010	13:16:00	13:18:00	8	2	0	80,00%	20,00%	0,00%
4/8/2010	13:55:00	14:19:00	4	2	7	66,67%	33,33%	63,64%
5/8/2010	13:44:00	13:24:00	14	5	1	73,68%	26,32%	6,67%
6/8/2010	13:34:00	14:07:00	14	4	9	77,78%	22,22%	39,13%
7/8/2010	13:23:00	13:12:00	17	2	10	89,47%	10,53%	37,04%
13/8/2010	14:02:00	14:13:00	13	9	0	59,09%	40,91%	0,00%
14/8/2010	13:52:00	13:18:00	12	10	3	54,55%	45,45%	20,00%
27/8/2010	13:18:00	12:48:00	1	0	1	100,00%	0,00%	50,00%
Total:			126	53	56	70,39%	29,61%	30,77%

Tabela 6.4: Resultados da validação do modelo de detecção de incêndios implementado.

Capítulo 7

Implementação do sistema FWI canadiano com base em previsões WRF de alta resolução

No decurso deste capítulo é apresentado o resultado do acoplamento ad hoc do modelo FWI canadiano às previsões obtidas por intermédio do modelo WRF. Assim, em primeiro lugar, é feita uma alusão ao sistema IDD/LDM como fonte preferencial de obtenção de dados de inicialização do modelo WRF. Posteriormente, aborda-se a configuração do modelo de previsão, tanto no que toca à configuração dos domínios, como no que à parametrização física, inicialização operacional e articulação com o modelo FWI diz respeito. São, igualmente, tecidas algumas considerações sobre a arquitectura de modelação computacional utilizada. O capítulo termina com a análise e discussão do resultado da obtenção dos índices do sistema canadiano FWI a partir de previsões WRF de alta resolução, para as épocas de incêndios de 2009 e 2010.

7.1 Dados Meteorológicos

A obtenção de dados de inicialização para os modelos numéricos de previsão de tempo de forma expedita, ininterrupta e no menor intervalo de tempo possível decorrente entre a sua disponibilização e a sua possibilidade de utilização, consubstancia um desafio para o processo de previsão de tempo em regime operacional. Apesar de existirem fontes de dados de inicialização de modelos de previsão numérica de tempo disponíveis na internet, o processo de transferência dos dados, com o recorrente constrangimento na largura de banda das ligações à internet, podem conduzir a atrasos, por vezes significativos, no início do processo de execução dos modelos de previsão. Neste sentido, e tendo também a agilização das operações em vista, em meados de 2004 a Universidade de Aveiro foi incluída na comunidade

UNIDATA como participante do projecto IDD, obtendo, pois, a capacidade de aceder, de forma expedita, a toda a panóplia de dados ambientais disponíveis, bem como colaborar activamente na comunidade IDD sob o ponto de vista da partilha de conhecimentos e experiência (Chagas et al., 2007; Chagas e Carvalheiro, 2010).

7.1.1 *Internet Data Distribution/Local Data Manager*

O projecto *Internet Data Distribution* (IDD), do Programa Unidata da *University Corporation of Atmospheric Research* (UCAR), foi desenvolvido no início da década de 90 do século XX, tendo como principais objectivos:

- Constituição de uma rede de distribuição de dados ambientais, em tempo quase-real, através da internet;
- Provisão de ferramentas de acesso e análise de dados, incluindo diversificadas formas de suporte ao utilizador;
- Suporte e promoção do uso de dados ambientais em tempo quase-real para fins educacionais, para além das aplicações de cariz investigativo.

Tendo iniciado as suas actividades como uma rede modesta de facilitação local da distribuição de dados meteorológicos nos Estados Unidos da América, o IDD afirma-se actualmente como a mais avançada aplicação da internet, congregando aproximadamente 500 sistemas em 250 localizações que reportam estatísticas em tempo real, para além de outras organizações/projectos participantes no IDD, que não reportam estatísticas à UNIDATA, como é o caso da NOAA, NASA, USGS, USACE, governos da Espanha, Coreia e entidades privadas, entre outros. A figura 7.1 pretende ilustrar a topologia do IDD, em 2010, exibindo as conexões activas entre os diversos participantes do projecto.

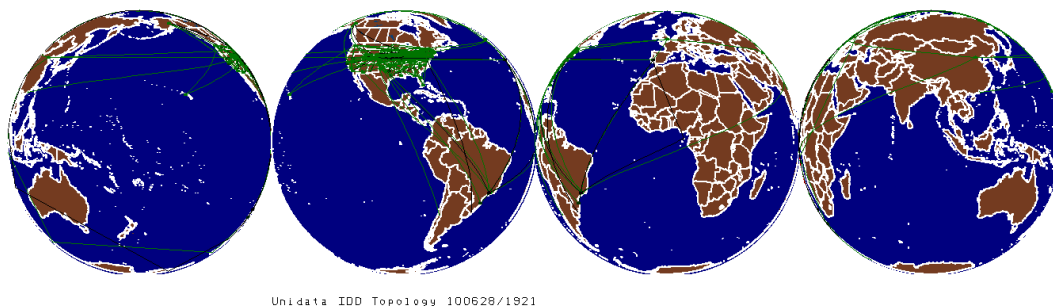


Figura 7.1: Topologia do IDD, a 28 de Junho de 2010.

A espinha vertebral do IDD é o *software Local Data Manager* (LDM), que se destina à selecção, captura, processamento e distribuição de conjuntos de dados, fazendo uso de um conjunto de programas cliente/servidor e seus respectivos protocolos.

O princípio básico de funcionamento do IDD/LDM assenta no estado da arte das tecnologias de informação e comunicação, como as redes de internet de alta velocidade e comunicação TCP/IP em redes *peer-to-peer* (com todo o sucesso que estas granjearam, já que eliminam a necessidade de servidores centralizados, permitindo a partilha de recursos de forma distribuída).

Desta forma, no IDD, os dados ambientais são inseridos num nó fonte *source* e enviados pela internet, com recurso ao LDM, para os outros nós do sistema. Assim, cada um dos nós receptores pode aceder aos dados localmente e reenviá-los para outros nós, por forma a que toda a comunidade obtenha acesso à informação, em tempo quase-real, sem sobrecarga para as redes. Ressalta, daqui, a mais-valia constituída pelo IDD/LDM:

- a não necessidade de manutenção e suporte, por parte dos fornecedores de dados, de um sistema capaz de satisfazer todos os utilizadores em simultâneo;
- a possibilidade de redundância quer na distribuição quer na inserção de dados;
- a conseqüente diminuição da falibilidade do sistema.

Os dados disponíveis via IDD/LDM incluem *outputs* de modelos (globais e/ou de área limitada), dados e produtos de detecção remota (como imagens de satélite, de radar, entre outros), dados de observações pontuais (como dados de relâmpagos da rede americana de detecção de raios, dados de perfis atmosféricos, dados de comunicação aeronáutica, etc.), bem como uma miríade de dados textuais como, por exemplo, os dados *Meteorological Aviation Reports* (METAR), entre outros. Estas diversas classes de dados são posteriormente agrupadas, no IDD/LDM, de acordo com a fonte comum da sua proveniência, surgindo assim os diversos *feedtypes*.

De particular interesse para o desenvolvimento deste trabalho, destaca-se o *feed CONDUIT* (*Cooperative Opportunity for NCEP Data Using IDD Technology*), de onde são obtidos, diariamente, os resultados das 4 execuções (00:00, 06:00, 12:00 e 18:00 UTC) do modelo global GFS, no formato GRIB2, num volume diário de dados de cerca de 12 GB.

7.2 Configuração do Modelo WRF

Tendo em vista o cálculo dos componentes do sistema FWI canadiano numa base rotineira e operacional, foi utilizada a versão 3.1 do modelo WRF, com o núcleo dinâmico ARW, para obter previsões dos campos de temperatura, intensidade do vento e humidade

7.2 Configuração do Modelo WRF

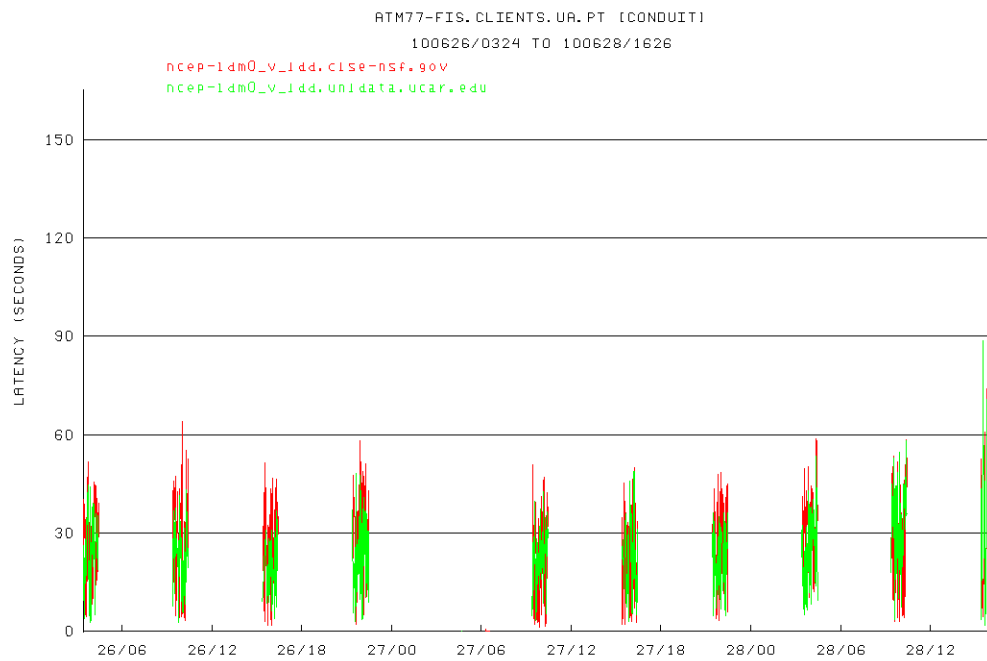


Figura 7.2: Latências na recepção dos dados do *feed* CONDUIT.

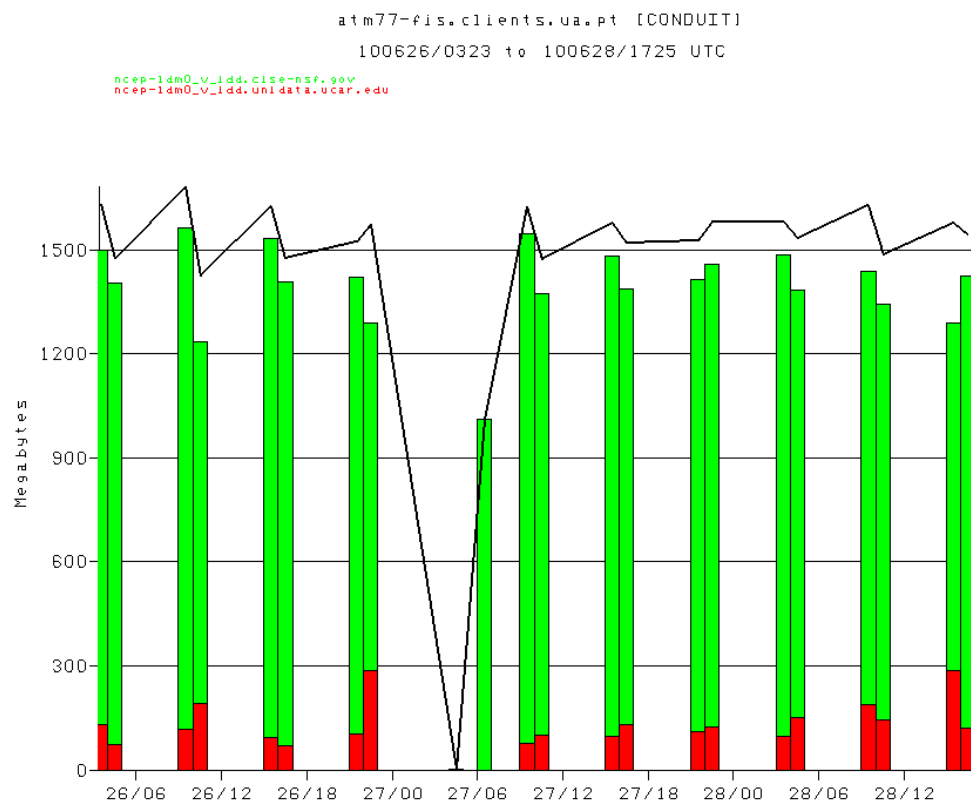


Figura 7.3: Volume diário de dados recepcionados, de 26 a 28 de Junho de 2010.

relativa à superfície, bem como de precipitação acumulada em 24 horas, para 24 e 48 horas. Estes resultados constituem, posteriormente, dados de entrada para o cálculo dos componentes do sistema FWI canadiano, para cada ponto de grelha de um domínio de alta resolução configurado sobre o território continental português. Nas subsecções seguintes detalha-se sobre a configuração espacial dos domínios de simulação, assim como sobre a parametrização física do modelo.

7.2.1 Configuração dos domínios

O desenho dos domínios de simulação do WRF foi efectuado tendo em conta um diverso conjunto de factores, inerentes, por um lado, às questões relativas à necessidade de obtenção de resultados em tempo útil, de forma a justificar a designação de operacional na implementação do modelo, sob o ponto de vista computacional; por outro, às nuances inerentes aos padrões de circulação atmosférica característicos do período de interesse no cálculo do FWI.

Deste modo, a configuração dos domínios de simulação do WRF foi levada a cabo conforme ilustrado na figura 7.4: utilizando o modelo de Projecção Cónica Conformal de Lambert, um domínio exterior, com espaçamento horizontal de 15 km, cobre a quase totalidade da Península Ibérica e, aninhado sobre este, encontra-se um domínio sobre Portugal Continental, à resolução de 3 km. Deve salientar-se que, na configuração proposta, ambos os domínios interagem reciprocamente, na técnica habitualmente designada por *two-way nesting*.

Na tabela 7.1 exibem-se os respectivos parâmetros de configuração de ambos os domínios, no que concerne à especificação da projecção de mapa utilizada e aos respectivos tamanhos da grelha computacional definida.

No que diz respeito aos comumente designados campos estáticos (topografia, ocupação e uso do solo, vegetação, albedo, entre outros), a configuração dos domínios ilustrada na figura 7.4 recorre a um Modelo Digital do Terreno que assenta na base de dados *Global 30 Arc-Second Elevation* (GTOPO30) do USGS em 30 segundos de arco (no domínio 2), sendo degradado para 2 minutos de arco, no domínio 1, segundo uma técnica de interpolação bilinear. Este modelo digital do terreno, utilizado por defeito no WRF, é constituído por um conjunto de informações em formatos *raster* e *vectorial* sujeitas a várias técnicas de pós-processamento no intuito de obter uma representação perfeitamente consistente do globo terrestre à resolução nominal de 1 km. Por outro lado, a informação-base utilizada para a representação do uso, tipo e cobertura do solo deriva do *Global Land Cover Characteristics* (GLCC), obtida através do AVHRR e classificada em 24 categorias para o uso e cobertura do solo e em 16 categorias (da WMO/FAO) no que respeita ao tipo de solo.

Deste modo, nas figuras 7.5 e 7.6 ilustra-se a representação de alguns dos anteriormente

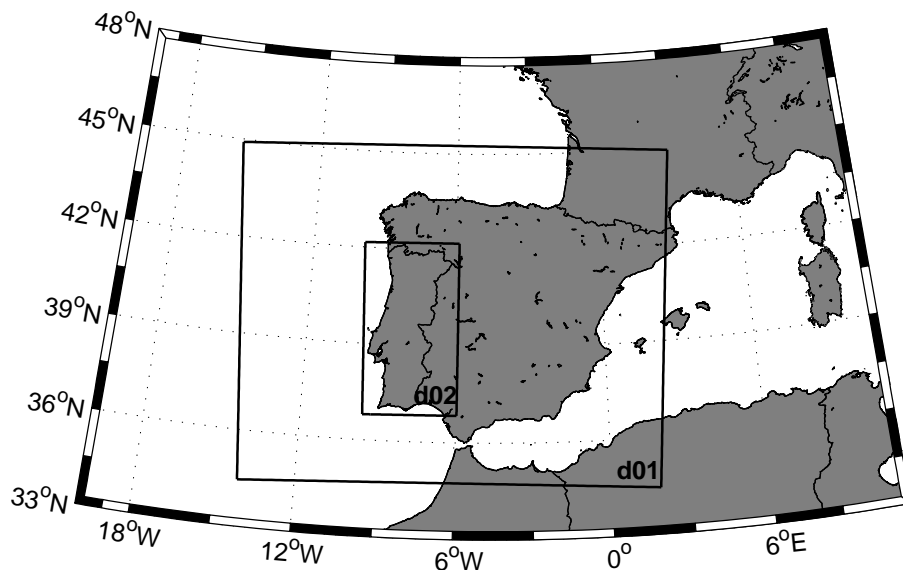


Figura 7.4: Representação gráfica dos domínios de simulação do modelo WRF.

Map Projection	
map_proj	lambert
truelat1	40
truelat2	40
stand_lon.	-6.151
ref_lon	-6.151
ref_lat	40

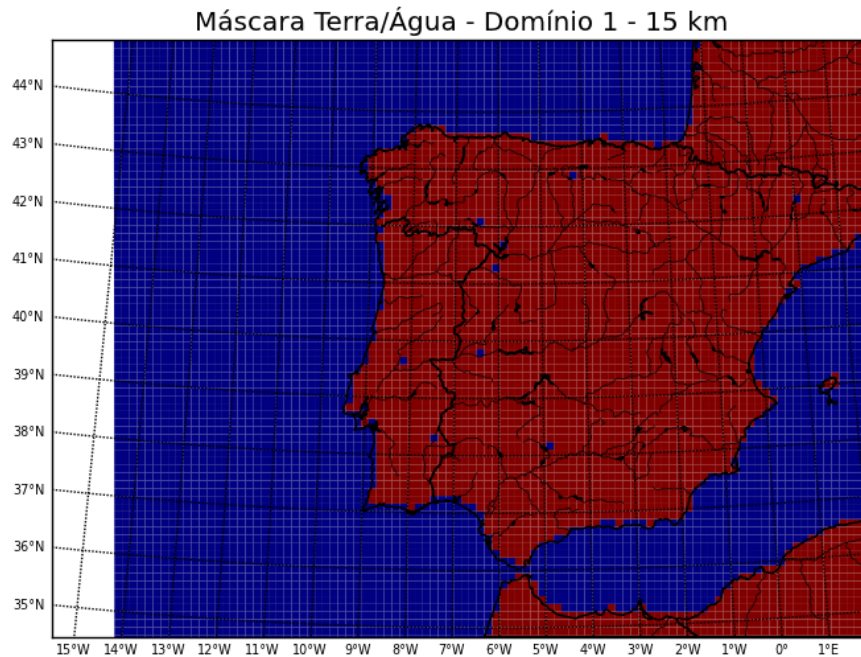
(a) Parâmetros relativos ao tipo de projecção do mapa

	Domínios	
	D1	D2
e_we	100	111
e_sn	80	201
e_vert	31	31
dx	15000	3000
dy	15000	3000
i_parent_start	1	30
j_parent_start	1	17
parent_grid_ratio	1	5
geog_data_res	2m	30s

(b) Parâmetros relativos à configuração dos domínios.

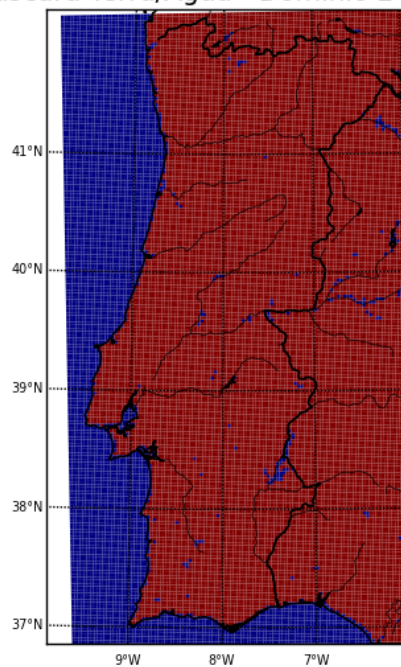
Tabela 7.1: Detalhes dos parâmetros relevantes para a construção dos domínios de simulação do WRF.

mencionados campos estáticos para ambos os domínios de simulação, destacando-se a máscara binária que pretende representar a separação dos pontos da grelha computacional sobre mar e sobre terra (figuras 7.5a e 7.5b), assim como a elevação acima do nível das águas do mar do terreno (figuras 7.6a e 7.6b).



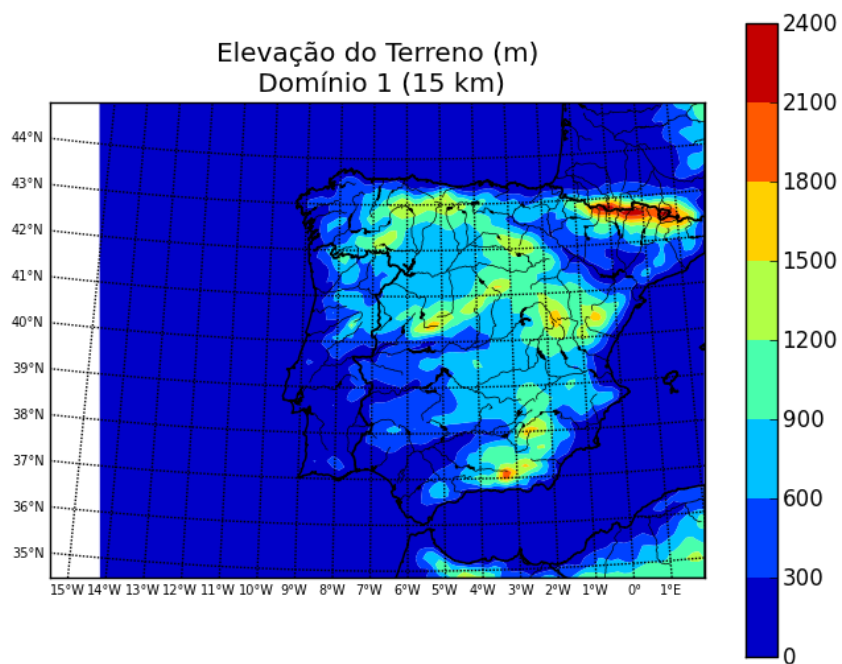
(a) *Landmask* para o domínio 1.

Máscara Terra/Água - Domínio 2 - 3 km

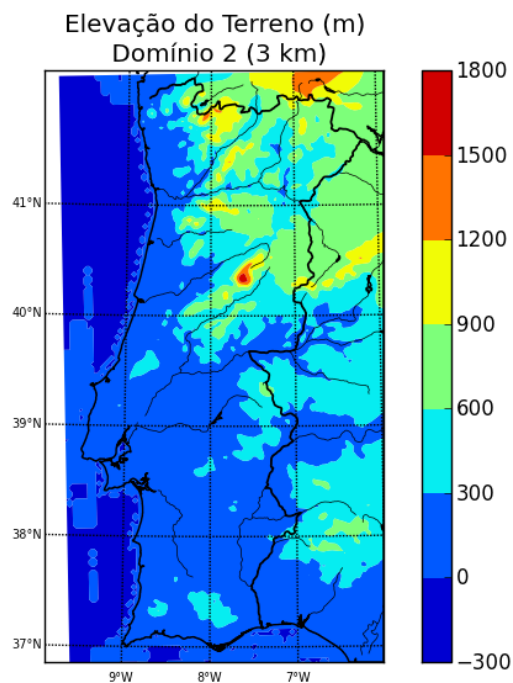


(b) *Landmask* para o domínio 2.

Figura 7.5: Representação da separação Terra/Água nos domínios de simulação do WRF.



(a) Representação da topografia para o domínio 1.



(b) Representação da topografia para o domínio 2.

Figura 7.6: Representação da topografia nos domínios de simulação do WRF.

Relativamente à estrutura vertical dos domínios de simulação, pode verificar-se na tabela 7.1 a existência de trinta níveis verticais. A sua localização e distribuição ao longo da estrutura da atmosfera a simular, cujo topo se caracteriza por uma pressão constante de 50 hPa, representa-se na figura 7.7. O primeiro nível está situado a aproximadamente 20 m da superfície, sendo que a separação entre níveis aumenta ligeiramente ao longo da camada limite, mantém-se na fronteira entre a camada limite e a troposfera livre, aumentando consideravelmente a partir daí, para novamente diminuir quando se aproxima do topo.

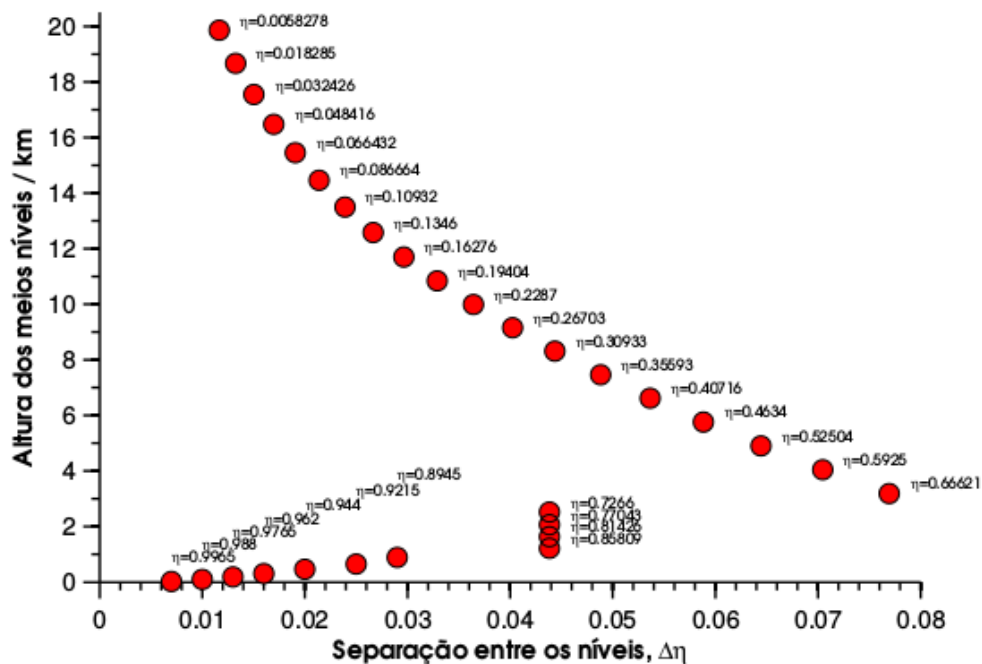


Figura 7.7: Representação gráfica dos domínios de simulação do modelo WRF.

7.2.2 Parametrização Física

O conjunto de opções de parametrização dos vários processos não resolvidos explicitamente pelo núcleo do WRF foi alvo de extensa experimentação e suporte bibliográfico, tendo-se optado pelo conjunto de escolhas para os diversos esquemas de parametrização que se encontra esquematizado na tabela 7.2.

A execução do esquema da camada limite é efectuada a cada passo de integração e, dada a configuração do modelo, a execução do esquema de radiação foi feita a cada 15 minutos. Outras opções utilizadas incluem a actualização da temperatura da superfície do mar, providenciada pelos dados GFS, ao longo do intervalo de duração da simulação, assim como a activação do modelo de camada de superfície urbano *Urban Canopy Model* (UCM).

Parametrização	Domínio 1	Domínio 2
Microfísica	WSM6	WSM6
Radiação longo c.d.o.	GFDL	GFDL
Radiação curto c.d.o.	Dudhia	Dudhia
Camada de Superfície	MM5 Monin-Obukhov	MM5 Monin-Obukhov
Modelo de Superfície de Solo	Noah LSM unificado	Noah LSM unificado
Camada Limite Planetária	YSU	YSU
Cumulus	Betts-Miller-Janjic	Sem parametrização (resolvido explicitamente)

Tabela 7.2: Parametrização física do WRF-ARW para as simulações levadas a cabo neste estudo.

7.2.3 Inicialização operacional e articulação com o modelo FWI

O acoplamento *ad hoc* do modelo FWI às previsões obtidas com recurso ao WRF foi efectuado segundo uma lógica de funcionamento em tempo real, sendo ilustrado nas figuras 7.8 e 7.9. De um modo geral, todas as simulações em regime operacional são efectuadas tendo como dados de inicialização o resultado da simulação produzida para as 12Z pelo modelo GFS, sendo o horizonte de previsão de 72 horas. A escolha da simulação das 12Z do GFS como fonte de dados de inicialização do modelo WRF deveu-se ao facto de esta simulação contar com mais dados observacionais no sistema de assimilação de dados, procurando-se, assim, uma maior fidelidade das previsões. Os dados do modelo global GFS utilizados são caracterizados por uma resolução espacial horizontal de aproximadamente 0,5° por 0,5°, sendo a sua estrutura vertical discretizada em 64 níveis verticais desigualmente espaçados, desde a superfície até uma superfície de pressão igual a 0,27 hPa. Nesta estrutura vertical, 15 níveis situam-se abaixo do nível de pressão de 800 hPa, ao passo que 24 níveis se situam acima dos 100 hPa (Environmental Modeling Center, 2003).

A humidade relativa, não sendo uma variável de saída por defeito no modelo WRF, é calculada recorrendo ao método numérico utilizado nas rotinas de pós-processamento disponibilizadas, fazendo uso da temperatura aos 2 metros (T_2), da razão de mistura aos 2 metros (Q_2) e da pressão à superfície ($PSFC$). Assim, a pressão de vapor de saturação, e_s , é inicialmente calculada recorrendo à expressão de Bolton,

$$e_s = e_s(T) = 6,112e^{\left(\frac{17,67T}{T+243,5}\right)} \quad (7.1)$$

Na equação 7.1, T é expresso em °C. Levando em consideração que a razão de mistura de saturação, w_s , se relaciona com a pressão de vapor de saturação, e_s , calculada em 7.1

através de:

$$w_s = \varepsilon \frac{e_s}{P - e_s} \quad , \quad \text{com} \quad \varepsilon = \frac{R_d}{R_v} = 0,622 \quad (7.2)$$

Obtém-se, pois, para o quociente entre a razão de mistura, w , e a razão de mistura de saturação, w_s , que representa a humidade relativa:

$$RH = 100 \times \frac{w}{w_s} \quad (7.3)$$

Tendo em vista o início do cálculo do índice FWI a partir do início da primavera, conforme aconselhado em Viegas et al. (2004), o processamento dos ficheiros de previsão WRF é iniciado por forma a atender a tal especificação. Desta forma, são extraídos, da previsão inicial de 72 horas, a temperatura e a intensidade do vento à superfície e a precipitação acumulada em 24 horas para as 24 horas após o início da previsão, sendo igualmente calculada a humidade relativa à superfície, fornecendo ao modelo FWI o valor das variáveis às 12 UTC. De seguida, estes dados de entrada são utilizados para o cálculo das componentes do sistema FWI, para cada ponto da grelha do modelo e para o dia seguinte à data de inicialização do WRF (conforme a adaptação do código do modelo FWI exposta no anexo B). O ciclo assim constituído dá origem a um ficheiro, no formato netcdf, que contém, para cada ponto da grelha computacional definida para o domínio 2 do WRF, os dados de temperatura, intensidade do vento e humidade à superfície às 12 UTC e precipitação acumulada em 24 horas, previstos pelo WRF a 24 horas, assim como os componentes FFMC, DMC, DC, ISI, BUI, FWI e DSR, calculados cumulativamente desde 21 de Março até 21 de Outubro.

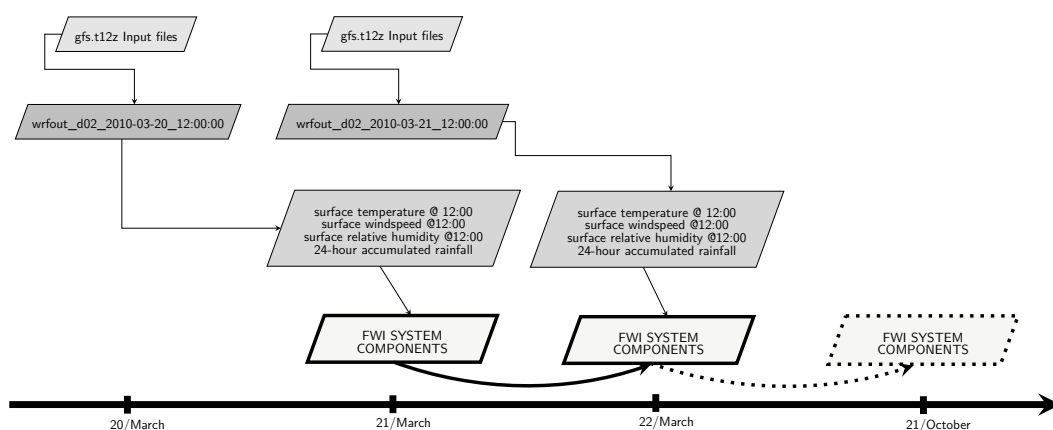


Figura 7.8: Esquematização dos procedimentos inerentes ao acoplamento *ad hoc* do modelo FWI canadiano com os resultados das previsões WRF, a 24 horas.

Para a obtenção do ficheiro com resultados do modelo FWI mediante previsões a 48 horas do WRF, o ciclo de processamento é muito similar ao da figura 7.8, muito embora

a rotina de processamento se inicie um dia mais cedo. Deste modo, ao invés de serem utilizados os dados de temperatura, humidade relativa e intensidade do vento à superfície e precipitação acumulada em 24 horas resultantes da previsão para as 24 horas seguintes, é feito uso das previsões para as 48 horas seguintes, conforme esquematizado na figura 7.9.

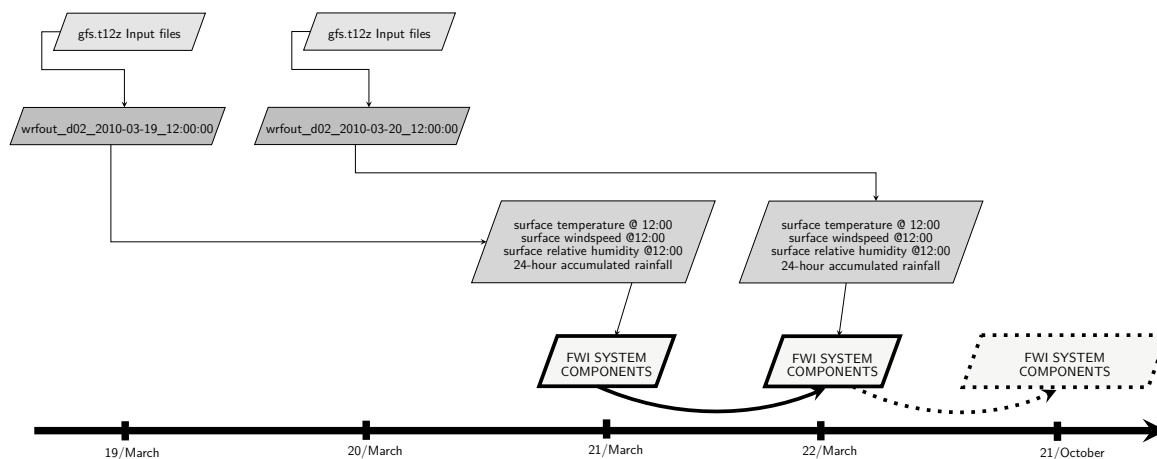


Figura 7.9: Esquematização dos procedimentos inerentes ao acoplamento *ad hoc* do modelo FWI canadiano com os resultados das previsões WRF, a 48 horas.

No que à apresentação de resultados diz respeito, o índice FWI é apresentado segundo as cinco classes de risco, para cada um dos dezoito distritos de Portugal Continental, conforme a calibração envidada por Viegas et al. (2004). Os resultados são posteriormente publicados na página web do grupo, conforme ilustra a figura 7.10, expondo, assim, a classe do índice FWI para cada ponto de grelha.

7.3 Sistema computacional de modelação numérica

As previsões WRF descritas nas subsecções anteriores foram efectuadas recorrendo a arsenal computacional relativamente comum. No início do plano de trabalhos foi desenvolvido, especificamente para as rotinas de previsão de tempo em regime operacional, um *cluster* de computadores, com um total de quatro nós (e oito *cores*) de processamento, interligados por *gigabit ethernet*, baseado na distribuição Linux Rocks. O *cluster* fazia uso de processadores Intel Pentium D, operando a uma velocidade de relógio de 2,80 GHz e com 2 GB de memória RAM por nó, oferecendo uma performance de 44,8 GFLOPS.

Por obsolescência do sistema, o processo de obtenção das previsões WRF em regime operacional foi migrado para um único computador, equipado com um processador Intel Core i7 920, a operar a uma velocidade de relógio de 2,66 GHz e com um total de 8 GB de memória RAM. O sistema operativo instalado foi a distribuição Debian GNU/Linux.

A versão 3.1 do modelo WRF foi, conforme já referido, utilizada, tendo sido configurada

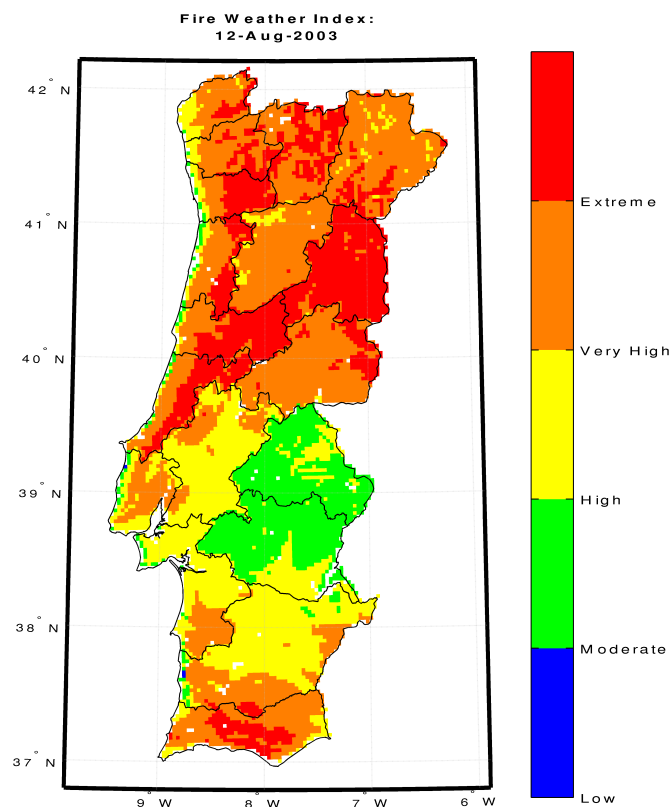


Figura 7.10: Exemplo da visualização dos resultados do modelo FWI segundo as previsões WRF.

para uso em memória distribuída, fazendo uso do protocolo MPI. Dada a configuração do sistema, a operacionalidade dos resultados foi garantida, sendo possível obter a visualização do índice de risco de incêndio para Portugal Continental para o dia em curso e para o dia seguinte na página *web* do grupo de investigação, no final da manhã de cada dia.

7.4 Resultados obtidos e sua discussão

O sistema de processamento descrito nas secções anteriores foi implementado para um estudo exploratório de parte da época de incêndios de 2003, conforme Carvalheiro et al. (2011), de onde ressalta a conveniência do uso do modelo WRF, a operar em alta resolução sobre o território continental português, constituindo-se, assim, como uma ferramenta de alerta e prevenção de extrema utilidade.

No decurso da época de incêndios de 2003 em Portugal, cerca de 500000 ha foram queimados nas primeiras semanas de Agosto, por fogos com início compreendido entre

1 e 5 de Agosto. A distribuição espacial do índice FWI sobre Portugal Continental e as ocorrências detectadas pelo produto de detecção de incêndios baseado no radiómetro MODIS, ambos para o dia 4 de Agosto de 2003, exibem uma boa concordância, conforme a análise às figuras 7.11 e 7.12 permite revelar.

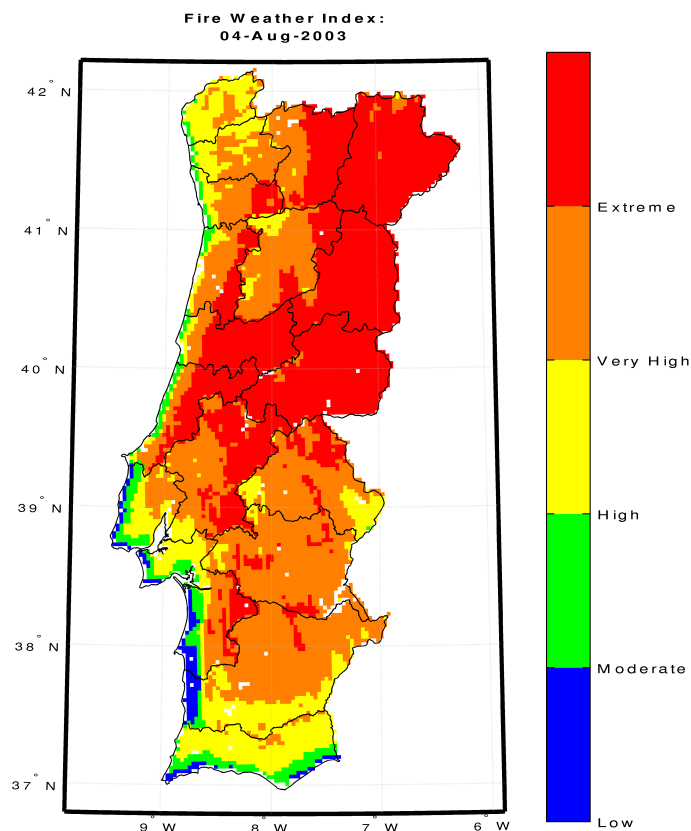


Figura 7.11: Representação espacial do índice FWI sobre Portugal Continental, para 4 de Agosto de 2003.

Incidindo sobre as épocas de incêndio de 2009 e 2010, as figuras 7.13a e 7.13b permitem apreciar a evolução da média diária, de 15 de Maio a 15 de Outubro de cada um dos anos, do índice FWI obtido de acordo com previsões WRF a 24 e 48 horas, ilustrando, assim, a coerência dos resultados entre si.

Uma primeira avaliação, de cariz qualitativo, dos resultados da determinação das componentes do sistema FWI canadiano com previsões WRF de alta resolução espacial pode apreciar-se nas figuras 7.14 e 7.15, onde se compara a representação espacial do índice FWI obtido mediante previsão WRF a 24 horas com os gráficos disponibilizados operacionalmente pelo IPMA (nomeadamente, a representação espacial de RCM e de FWI), para o caso particular dos dias 26 e 27 de Julho de 2010, bem como as detecções de focos de incêndio activos efectuadas pelo MODIS. Conforme se pode verificar, o nível de detalhe

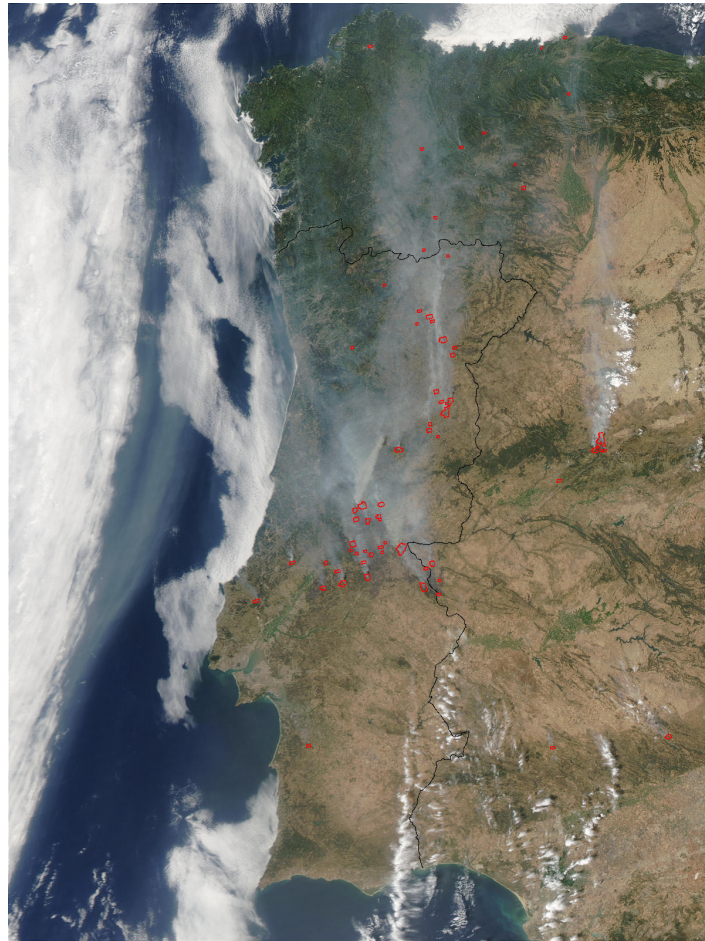
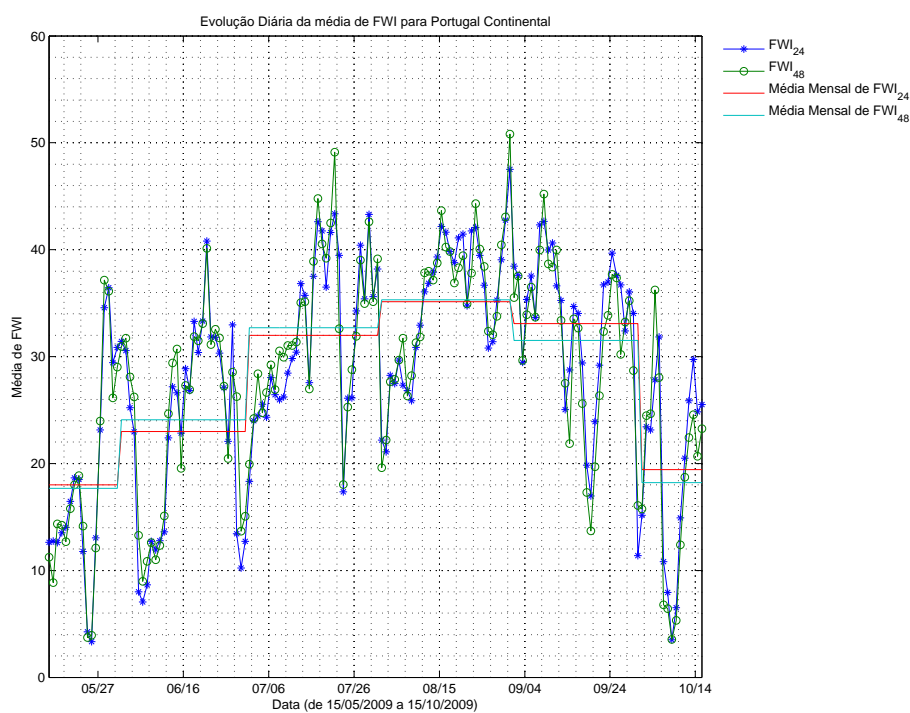


Figura 7.12: Resultado do produto de detecção de focos de incêndio activos segundo o radiómetro MODIS, para 4 de Agosto de 2003.

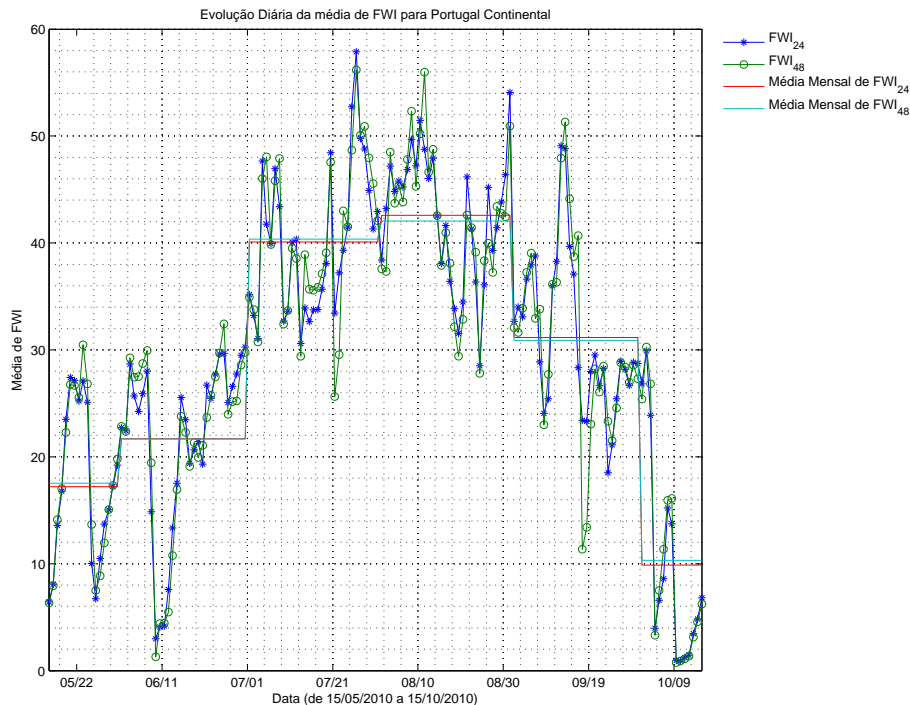
adicional providenciado pelo refinamento da malha sobre a qual as previsões meteorológicas são efectuadas e, posteriormente, as componentes do sistema FWI canadiano são determinadas, pode contribuir significativamente para uma melhor planificação de operações de prevenção e combate aos incêndios, comparativamente com informações sobre o risco de incêndio decorrentes de uma rede mais dispersa de estações e/ou uma malha de simulação mais grosseira.

No que diz respeito à severidade das épocas de incêndio de 2009 e 2010, podem igualmente ser feitas algumas comparações, tendo em conta os mapas de SSR produzidos, para o período compreendido entre 15 de Maio a 15 de Outubro de cada um dos anos, representados nas figuras 7.16a e 7.16b. A mais-valia decorrente da utilização das previsões WRF de alta resolução para determinação das componentes do sistema FWI canadiano é imediatamente perceptível ao contraporem-se as figuras 7.16a e 7.16b com as figuras congéneres constantes do relatório da época de incêndios de 2010, produzido pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (Instituto de Meteorologia, 2010a), que se reproduzem nas figuras

7.4 Resultados obtidos e sua discussão



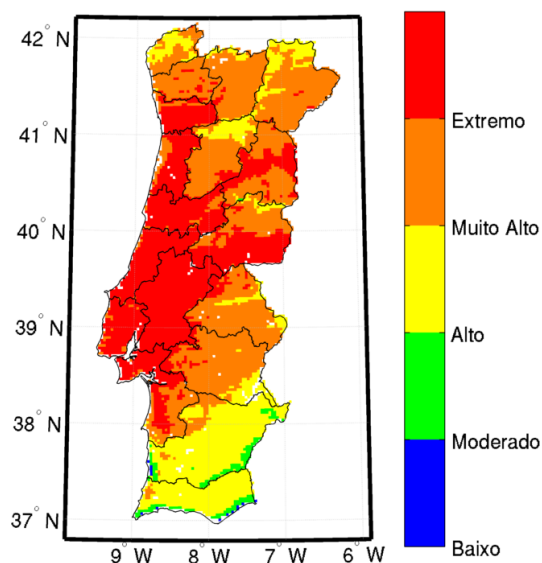
(a) Época de incêndio de 2009.



(b) Época de incêndio de 2010.

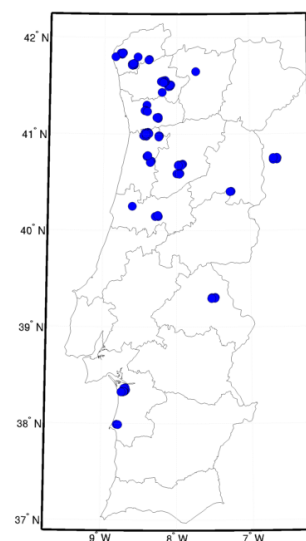
Figura 7.13: Séries temporais do índice FWI à escala nacional, mediante previsões WRF a 24 e 48 horas, para as épocas de incêndios de 2009 e 2010.

Índice Meteorológico de Perigo de incêndio
26-Jul-2010

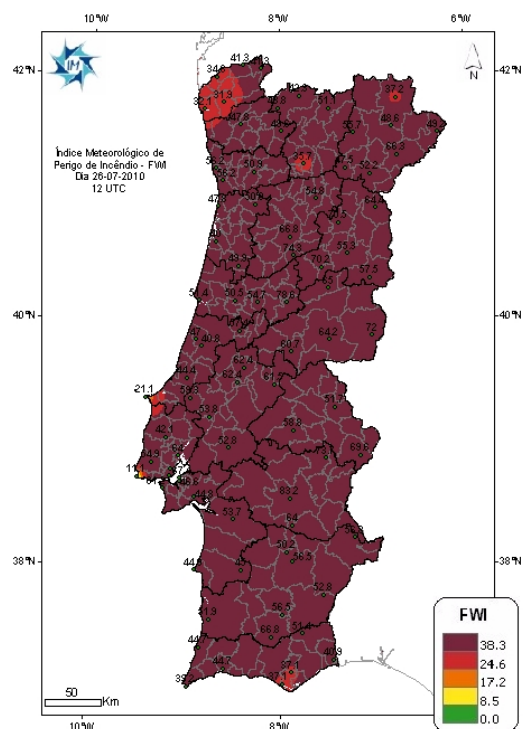


(a) Mapa de FWI para 26 de Julho de 2010 (WRF)

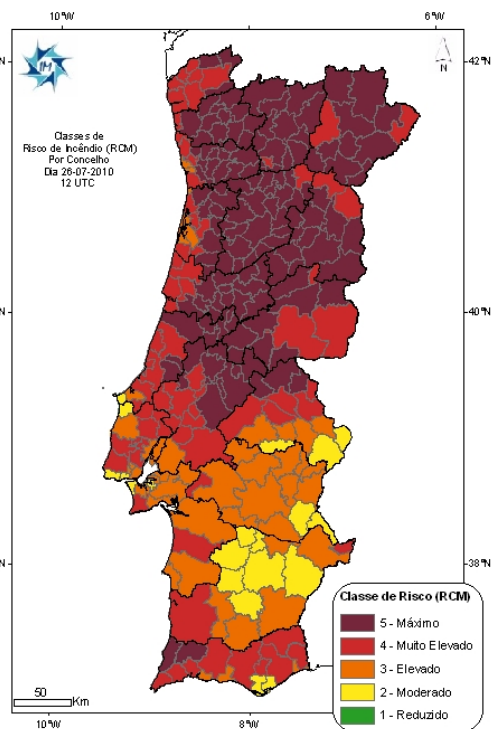
MODIS Fire Detection results
26-Jul-2010



(b) Focos de incêndio detectados pelo MODIS, a 26 de Julho de 2010



(c) Mapa de FWI para 26 de Julho de 2010 (IPMA)

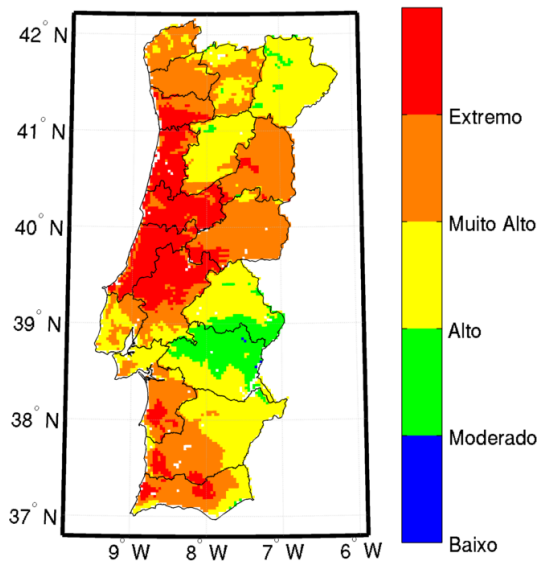


(d) RCM para 26 de Julho de 2010 (IPMA)

Figura 7.14: Comparação entre a distribuição espacial do índice FWI obtido mediante simulações WRF, a distribuição espacial de FWI e RCM do IPMA e detecções de incêndios MODIS, para 26 de Julho de 2010.

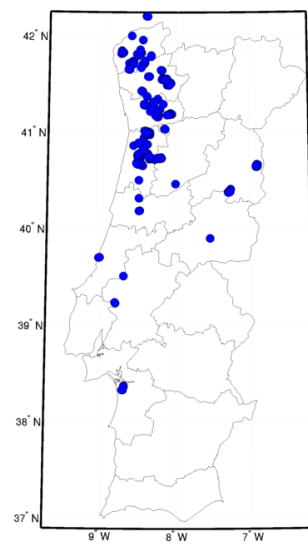
7.4 Resultados obtidos e sua discussão

Índice Meteorológico de Perigo de incêndio
27-Jul-2010

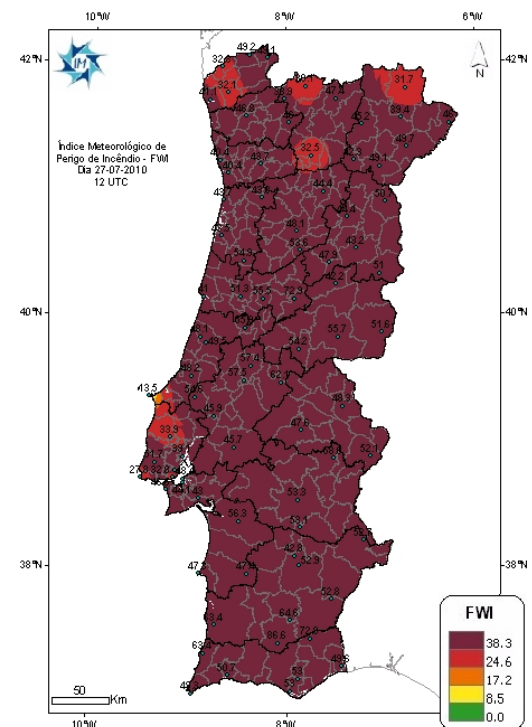


(a) Mapa de FWI para 27 de Julho de 2010 (WRF)

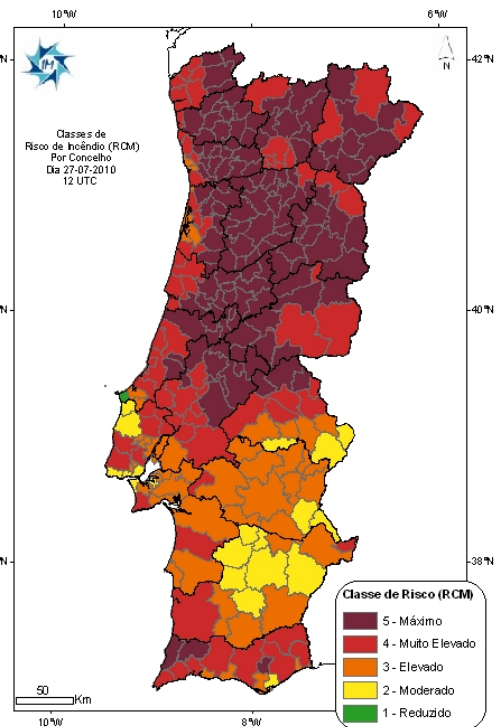
MODIS Fire Detection results
27-Jul-2010



(b) Focos de incêndio detectados pelo MODIS, a 27 de Julho de 2010



(c) Mapa de FWI para 27 de Julho de 2010 (IPMA)



(d) RCM para 27 de Julho de 2010 (IPMA)

Figura 7.15: Comparação entre a distribuição espacial do índice FWI obtido mediante simulações WRF, a distribuição espacial de FWI e RCM do IPMA e detecções de incêndios MODIS, para 27 de Julho de 2010.

7.16c e 7.16d e, sobretudo, comparando-as com os dados oficiais de área ardida, ilustrados nas figuras 7.17a e 7.17b.

Dada a necessidade de verificar o desempenho das simulações WRF levadas a cabo para as épocas de incêndio de 2009 e 2010, a subsecção seguinte dedica-se à exposição da metodologia de validação levada a cabo, sendo, pois, ilustrados os resultados decorrentes dessa análise.

7.4.1 Metodologia de validação das previsões WRF e respectivas medidas de erro

O processo de verificação, aqui entendido como um conjunto de métodos e técnicas utilizados para avaliar a qualidade dos resultados proporcionados por um sistema de previsão contra um conjunto de dados observados, permite o estabelecimento de inferências relativas ao desempenho dos modelos de previsão, em função dos dados observados usados, constituindo um conjunto de medidas simples e directas dos erros associados ao modelo, bem como uma ferramenta para eventuais correcções de erros sistemáticos.

As medidas de erro determinadas foram, respectivamente, o viés (*bias*), o erro absoluto médio (*MAE*) e a raiz quadrada do erro quadrático médio (*RMSE*), em concordância com Storch e Zwiers (1999) e Jolliffe e Stephenson (2003).

Assim, para cada dia, foi determinado o viés associado à previsão de cada variável meteorológica a partir da média espacial das diferenças entre os valores previstos (f_i) e observados (o_i) às 12 UTC em cada uma das N localizações, a partir de:

$$bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - o_i) \quad (7.4)$$

O viés indica, pois, a direcção do desvio médio dos resultados previstos face aos observados, não reflectindo, porém, a magnitude do erro. Um viés positivo indica que os valores previstos são, em média, superiores aos valores observados, ao passo que um viés negativo significa que, em média, o modelo subestimou a variável em questão, comparativamente com as observações. Apresenta várias limitações, que o tornam inadequado como única medida de verificação, nomeadamente tendo em conta o cancelamento de erros de diferentes sinais. Neste sentido, o erro absoluto médio (*MAE*) providencia uma forma expedita de visualizar a média da magnitude dos erros, muito embora a direcção do desvio seja descurada. Tal medida foi calculada como:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |f_i - o_i| \quad (7.5)$$

A raiz quadrada do erro quadrático médio (*RMSE*) constitui um complemento ao erro

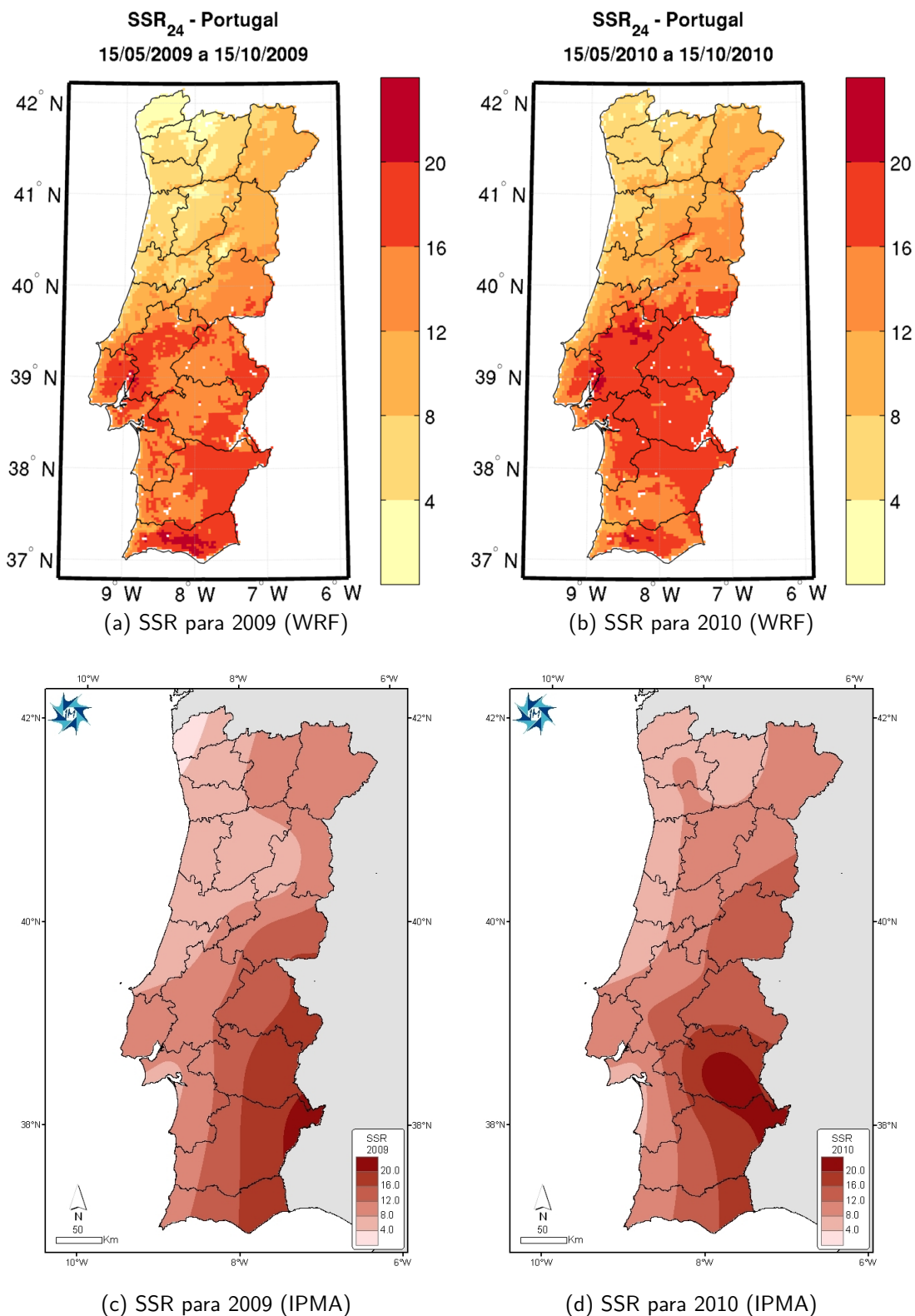
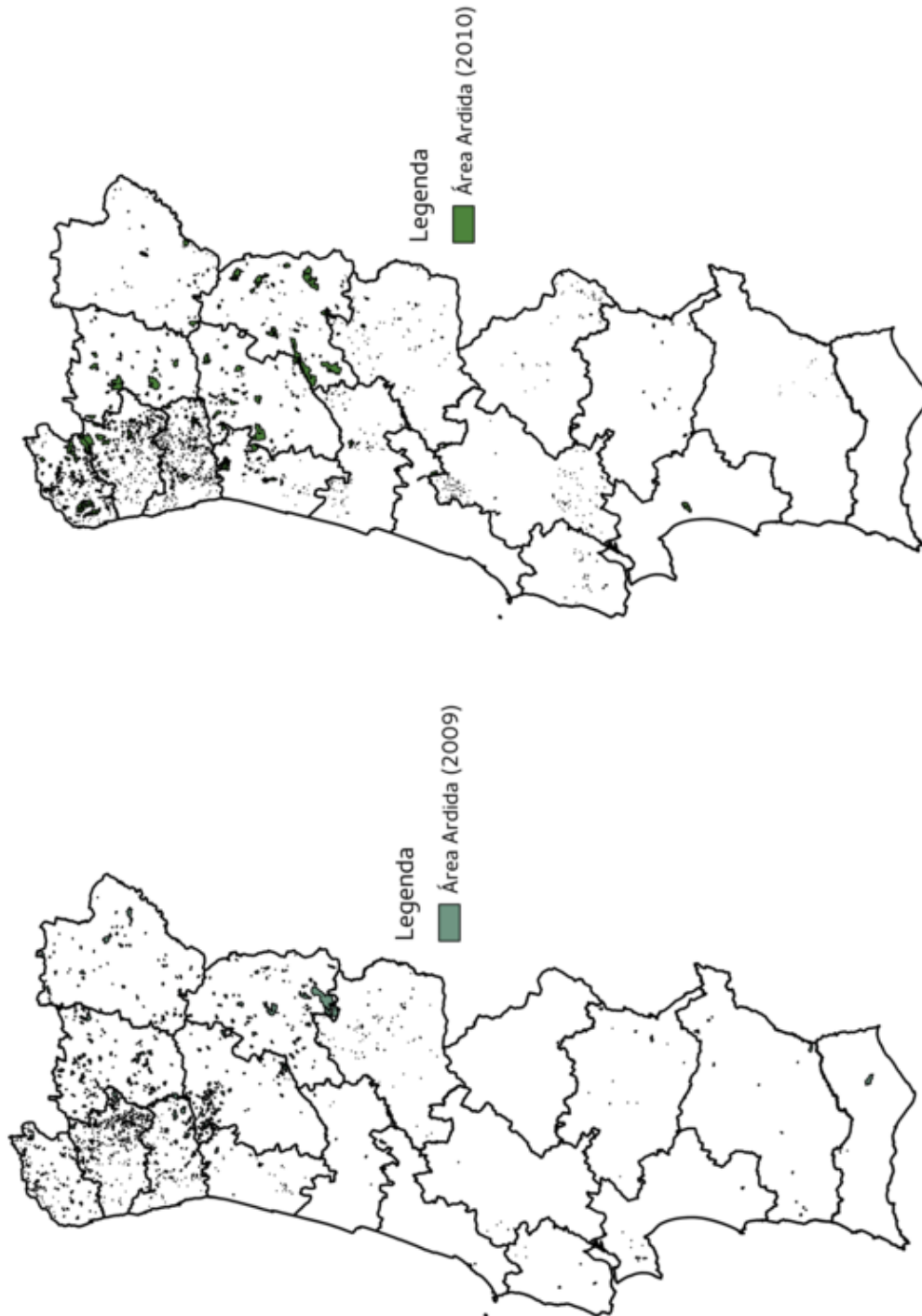


Figura 7.16: Comparação entre os mapas de SSR para as épocas de incêndio de 2009 e 2010, obtidos a partir de previsões WRF a 24 horas e os mesmos dados, segundo o relatório da época de incêndios de 2010, do Instituto Português do Mar e da Atmosfera.



(a) Área ardida em 2009.

(b) Área ardida em 2010.

Figura 7.17: Áreas ardidas para os anos de 2009 e 2010, segundo dados oficiais do ICNF.

absoluto médio, na medida em que, apesar de não determinar a direcção dos desvios dos resultados previstos face às observações efectuadas, atribui maior peso a erros de maior magnitude do que a de menor, em média. A determinação desta medida foi feita através de:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - o_i)^2} \quad (7.6)$$

7.4.1.1 Validação das previsões obtidas para 2009

Os dados de temperatura à superfície, intensidade do vento aos 10 m e humidade relativa às 12 UTC obtidos mediante previsão, quer para 24 quer para 48 horas após o início das simulações WRF, foram confrontados com dados observacionais das estações meteorológicas automáticas do IPMA, gentilmente cedidos ao abrigo de protocolos de cooperação. Deste modo, as medidas estatísticas de erro, para as 12 UTC de cada dia foram calculadas, no período compreendido entre 21 de Março e 21 de Outubro do ano de 2009, fazendo uso dos dados das estações meteorológicas automáticas ilustradas na figura 7.18, com as características que se expõem na tabela 7.3. Muito embora se tenha feito uma selecção criteriosa das estações a utilizar, nomeadamente no que diz respeito à disponibilidade de dados para os períodos em análise, foi inevitável encontrar períodos com falha de dados. Por decisão metodológica optou-se, nessas circunstâncias, por não implementar técnicas de interpolação para preenchimento de falhas, sendo a estação com dados em falta descartada no cálculo, para os instantes em que se verificou falha de dados, das medidas estatísticas anteriormente mencionadas.

Os resultados obtidos para a validação das previsões para 24 horas de temperatura, intensidade do vento e humidade relativa à superfície, bem como de precipitação acumulada em 24 horas, para o ano de 2009, exibem-se nas figuras 7.19 a 7.22, sendo as respectivas representações gráficas dos dados observacionais e simulados, para cada ponto de validação, expostos no anexo E.

Por análise das figuras, é possível reconhecer, de forma quase imediata, que, de um modo geral, os resultados previstos para cada uma das variáveis em verificação apresentam erros cuja magnitude é variável ao longo do tempo, conforme seria expectável. Pode igualmente apreciar-se uma aparente dependência do desempenho do modelo com factores relativos à sazonalidade, dado que as simulações com vista à obtenção do FWI abarcam três estações do ano (Primavera, Verão e Outono).

De forma inteiramente análoga, as figuras 7.23 a 7.26 pretendem ilustrar os resultados

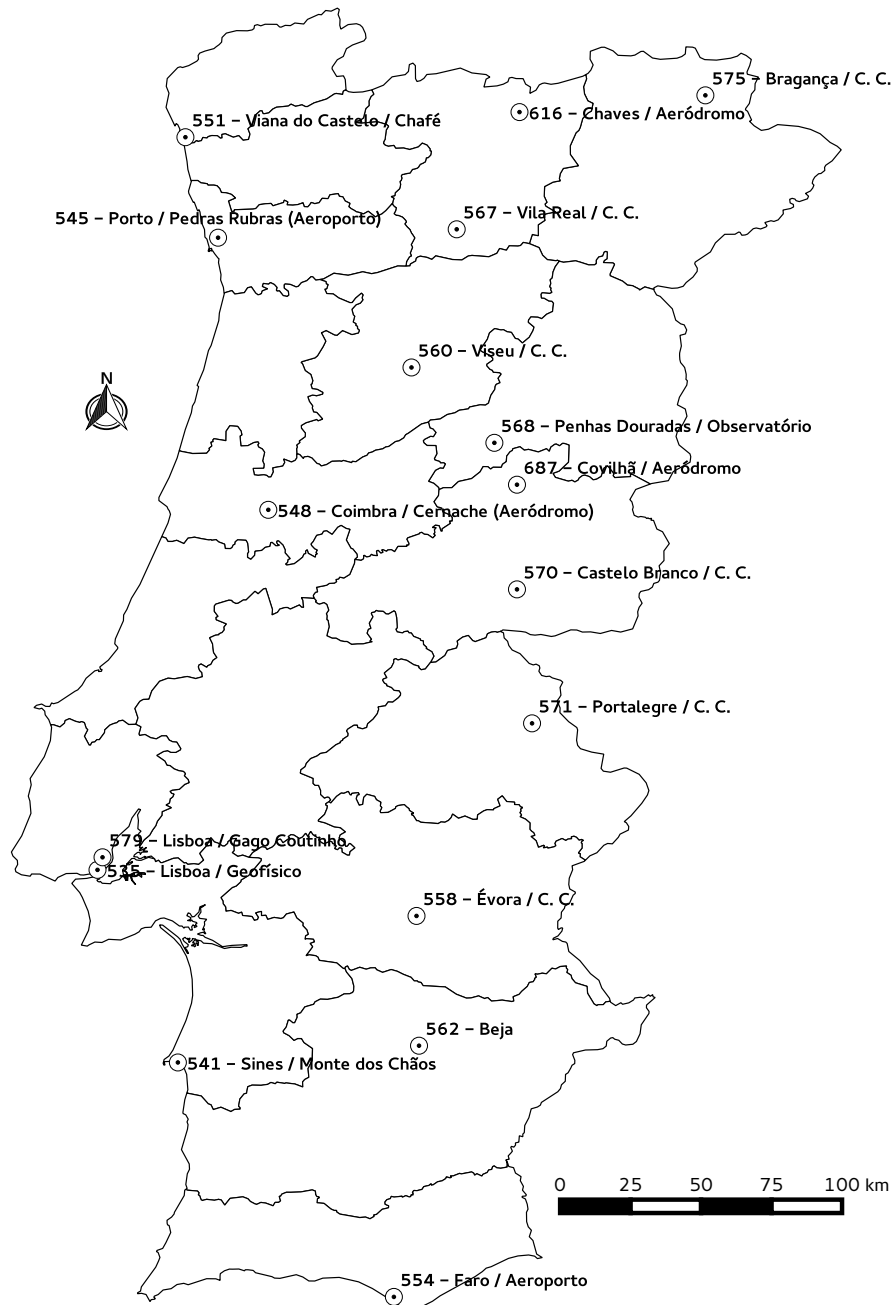


Figura 7.18: Distribuição espacial das estações meteorológicas automáticas utilizadas para validação.

Nº Estação	Localização	Altitude / m	Latitude	Longitude	Y ² (WRF)	X (WRF)	Latitude (Y,X)	Longitude (Y,X)
535	Lisboa / Geofísico	77	38.7167	-9.15	72	16	38.7192	-9.1597
541	Sines / Monte dos Chãos	96	37.9500	-8.83	44	25	37.9721	-8.8197
545	Porto / Pedras Rubras (Aeroporto)	63	41.2333	-8.67	165	33	41.2415	-8.6628
548	Coimbra / Cernache (Aeródromo)	170	40.1500	-8.47	125	38	40.1663	-8.4465
551	Viana do Castelo / Chafé	48	41.6333	-8.80	180	30	41.6437	-8.7862
554	Faro / Aeroporto	8	37.0167	-7.97	8	49	37.0182	-7.9737
558	Évora / C. C.	246	38.5333	-7.88	65	53	38.5570	-7.8759
560	Viseu / C. C.	636	40.7167	-7.90	145	54	40.7156	-7.8954
562	Beja	246	38.0167	-7.87	45	53	38.0176	-7.8626
567	Vila Real / C. C.	555	41.2667	-7.72	166	60	41.2851	-7.6948
568	Penhas Douradas / Observatório	1380	40.4167	-7.57	133	63	40.3962	-7.5683
570	Castelo Branco / C. C.	386	39.8333	-7.48	112	65	39.8304	-7.4863
571	Portalegre / C. C.	597	39.3000	-7.42	93	67	39.3186	-7.4066
575	Bragança / C. C.	690	41.8000	-6.73	185	87	41.8062	-6.7299
579	Lisboa / Gago Coutinho	104	38.7667	-9.13	74	17	38.7741	-9.1275
616	Chaves / Aeródromo	360	41.7333	-7.47	183	67	41.7466	-7.4524
687	Covilhã / Aeródromo	482	40.2500	-7.48	128	66	40.2625	-7.4594

Tabela 7.3: Características das estações meteorológicas automáticas utilizadas para a validação das simulações WRF.

^aY e X referem-se aos índices da grelha do WRF para o domínio 2, mais próximos da latitude e longitude das estações meteorológicas automáticas

das medidas de avaliação do erro ao longo do mesmo período, desta feita para as previsões de 48 horas de temperatura, intensidade do vento e humidade relativa à superfície, bem como de precipitação acumulada em 24 horas. Os resultados evidenciam, conforme seria de esperar, a degradação da previsão para o segundo dia, não sendo, todavia, díspares dos resultados da previsão a 24 horas.

A tabela 7.4 ilustra, de forma sumária, os resultados da validação envidada. É possível verificar, de antemão, que os resultados do modelo são adequados às necessidades para os objectivos do trabalho. Como seria expectável, as medidas de erro das previsões a 48 horas são superiores às obtidas para as simulações a 24 horas, muito embora ambas sejam muito satisfatórias. Em ambos os casos há que assinalar as discrepâncias entre a precipitação acumulada e simulada que podem, por um lado, ser explicadas tendo em conta a forte variabilidade espacial da precipitação, e, por outro, levando em consideração as premissas assumidas, nomeadamente no que diz respeito à interpolação horizontal dos resultados do WRF para a localização espacial das estações de validação. Uma eventual justificação adicional prende-se com uma possível má resolução da convecção por parte do modelo WRF, mas, no âmbito a que as previsões se destinam, a precipitação frontal, de maior escala, assume uma maior importância que a precipitação devida a processos de sub-grelha.

	Bias			MAE			RMSE		
	<i>min.</i>	<i>max.</i>	<i>média</i>	<i>min.</i>	<i>max.</i>	<i>média</i>	<i>min.</i>	<i>max.</i>	<i>média</i>
Previsões a 24 horas									
Temperatura / °C	-1,777	4,929	-0,219	0,625	5,353	1,496	0,727	5,894	1,836
Intensidade do vento / m s ⁻¹	-1,154	2,524	0,106	0,418	2,536	1,073	0,517	3,067	1,363
Humidade Relativa / %	-21,859	8,494	-1,588	3,029	22,882	8,015	4,599	27,635	10,079
Precipitação acumulada em 24 h. / mm	-4,741	8,350	0,028	0,000	15,138	0,852	0,000	20,202	1,422
Previsões a 48 horas									
Temperatura / °C	-2,418	4,688	-0,132	0,612	4,747	1,632	0,759	5,378	2,009
Intensidade do vento / m s ⁻¹	-1,578	2,924	0,098	0,439	3,036	1,185	0,586	3,500	1,513
Humidade Relativa / %	-20,982	10,924	-1,969	3,624	22,306	8,906	4,137	26,612	11,163
Precipitação acumulada em 24 h. / mm	-5,247	8,294	0,042	0,000	13,494	0,921	0,000	20,290	1,570

Tabela 7.4: Sistematização das medidas de erro nas previsões WRF a 24 e 48 horas, para 2009.

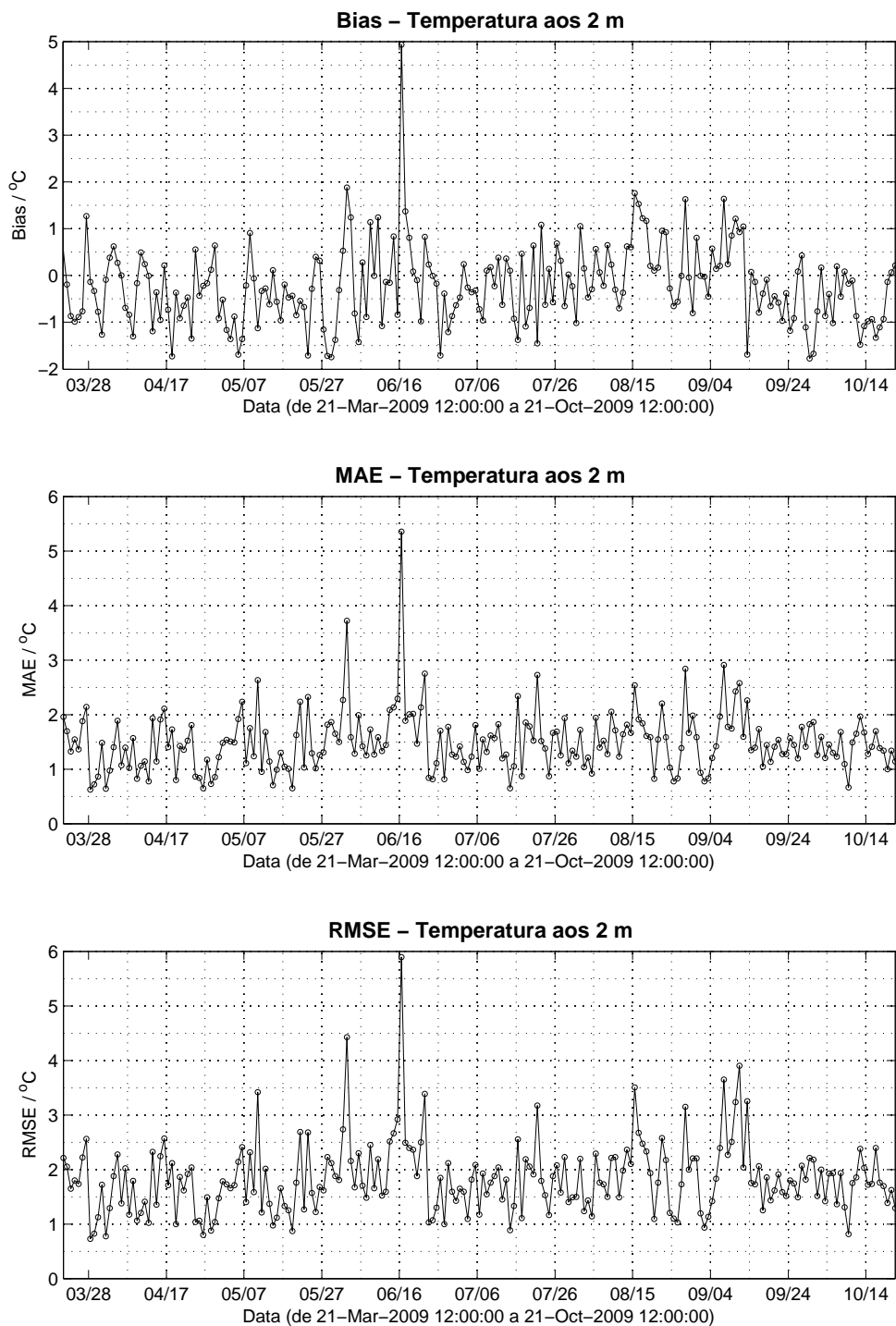


Figura 7.19: Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões de temperatura para as 24 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2009.

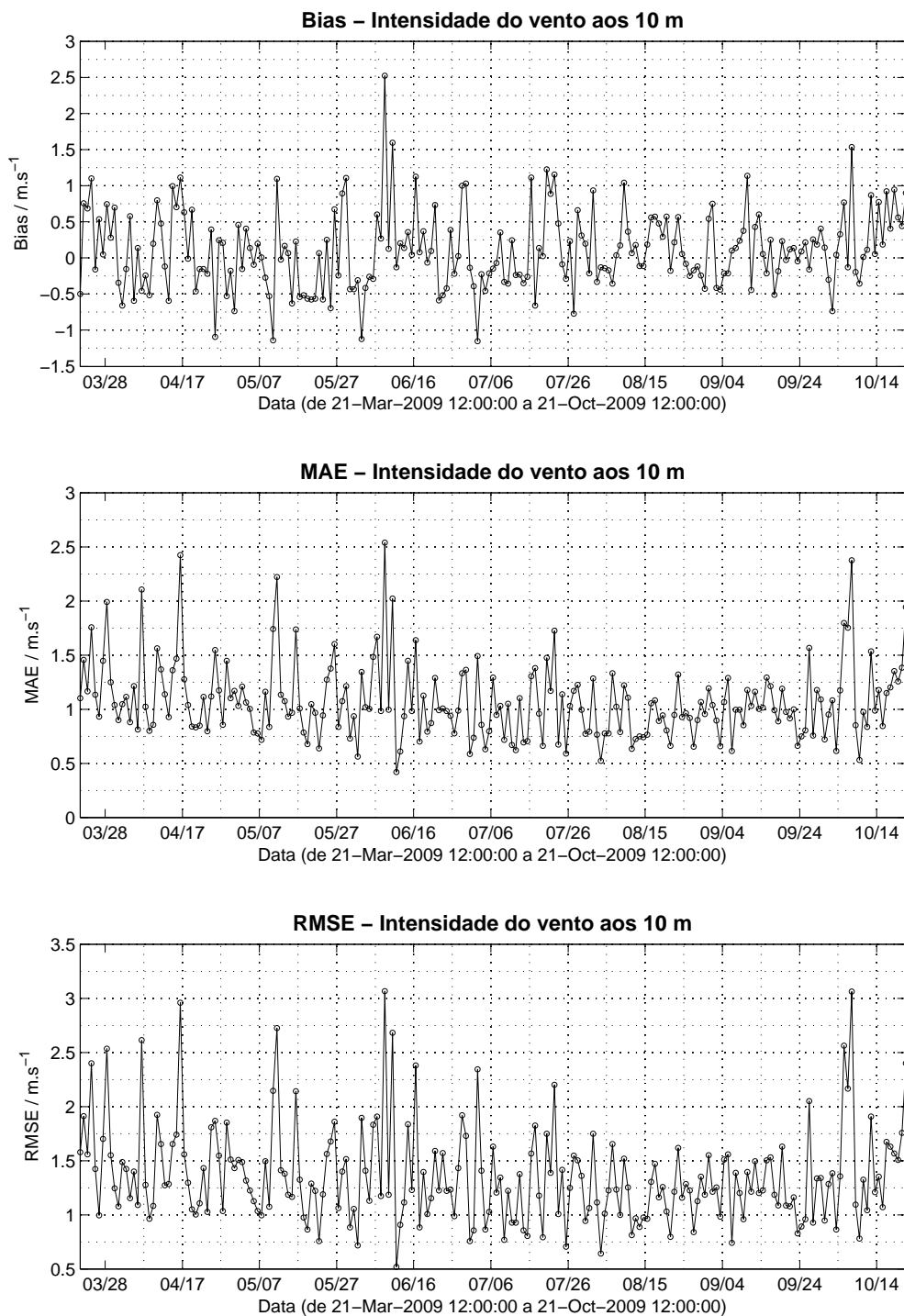


Figura 7.20: Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões da intensidade do vento para as 24 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2009.

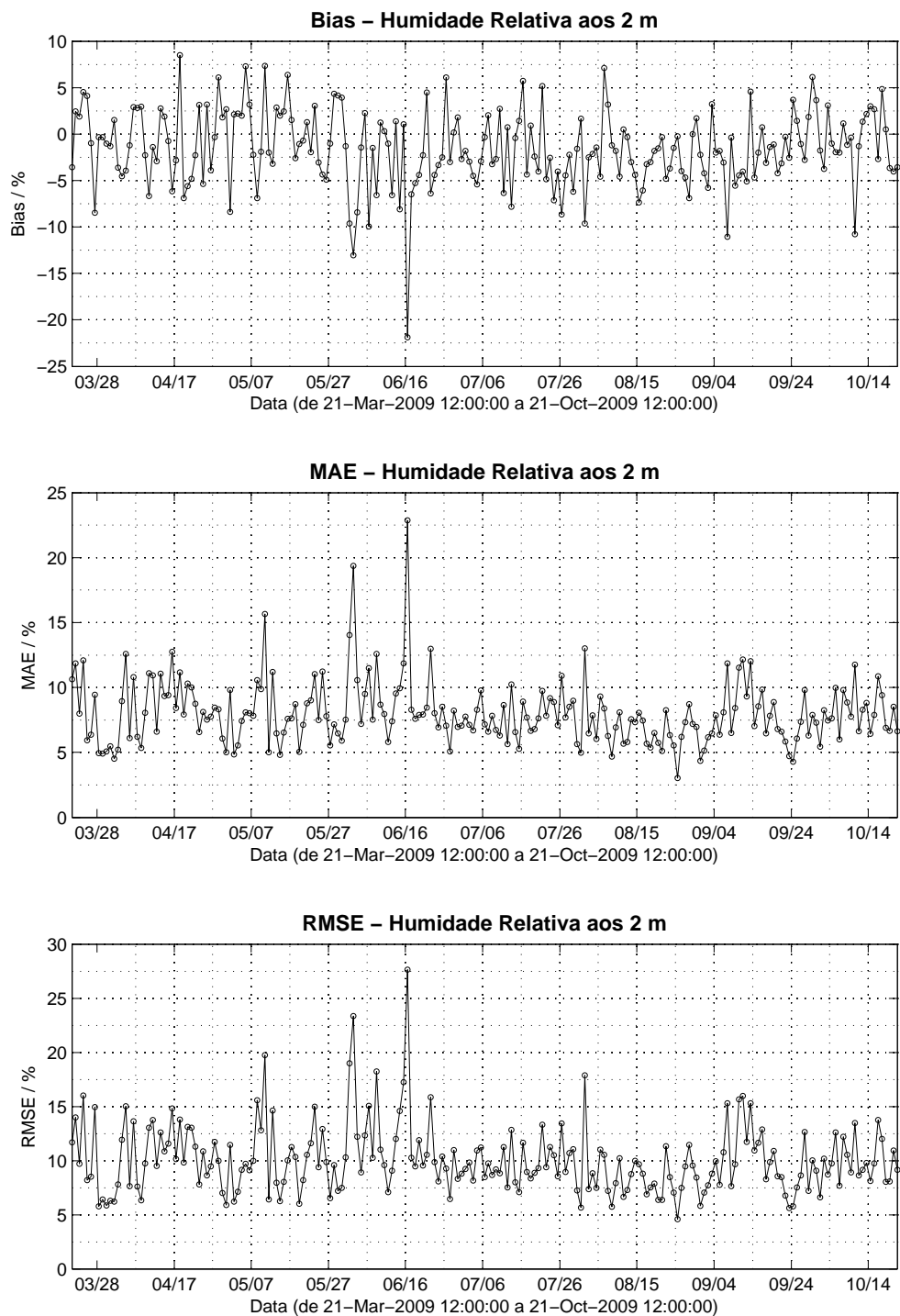


Figura 7.21: Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões de humidade relativa para as 24 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2009.

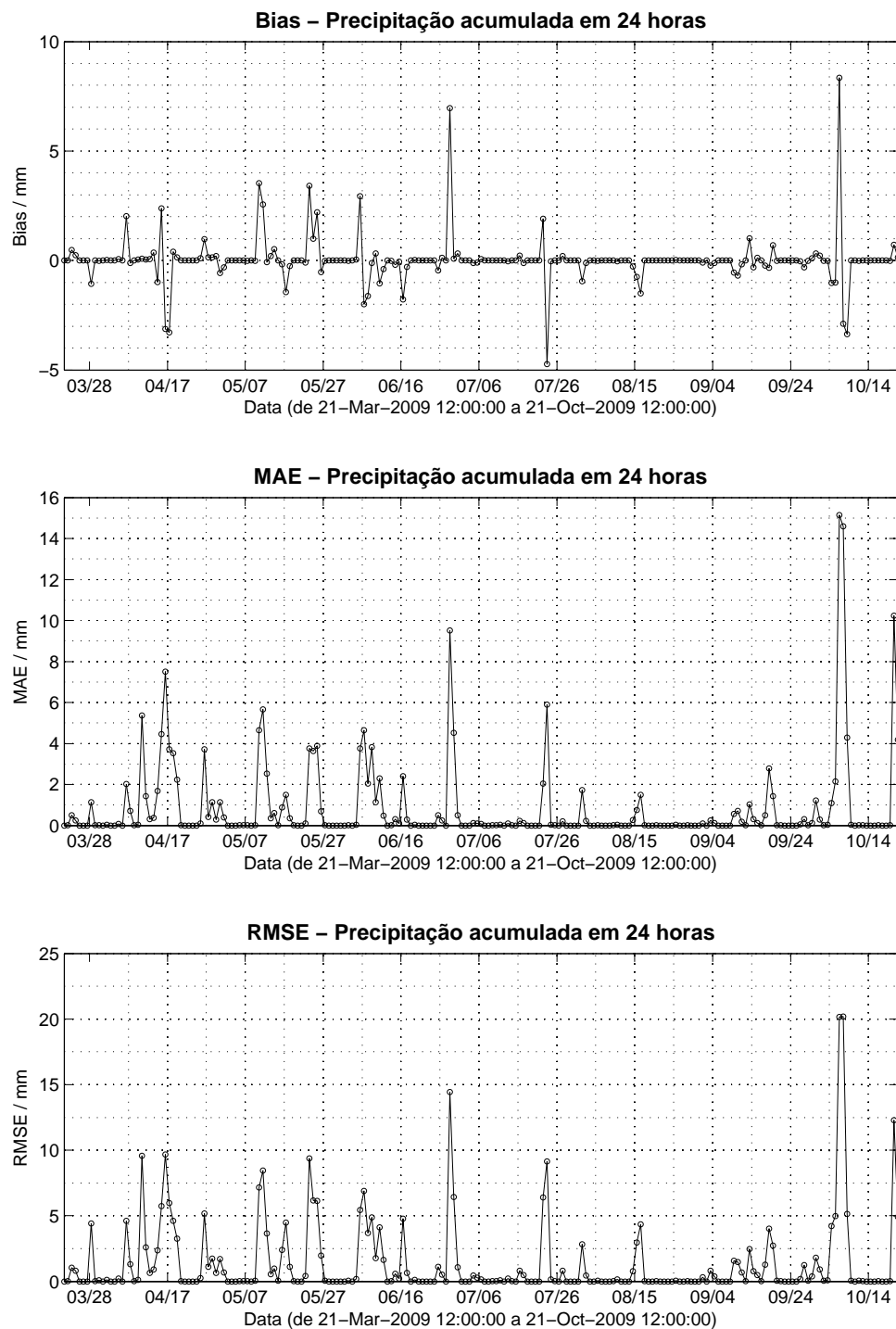


Figura 7.22: Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões, para as 24 horas seguintes, de precipitação acumulada em 24 horas, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2009.

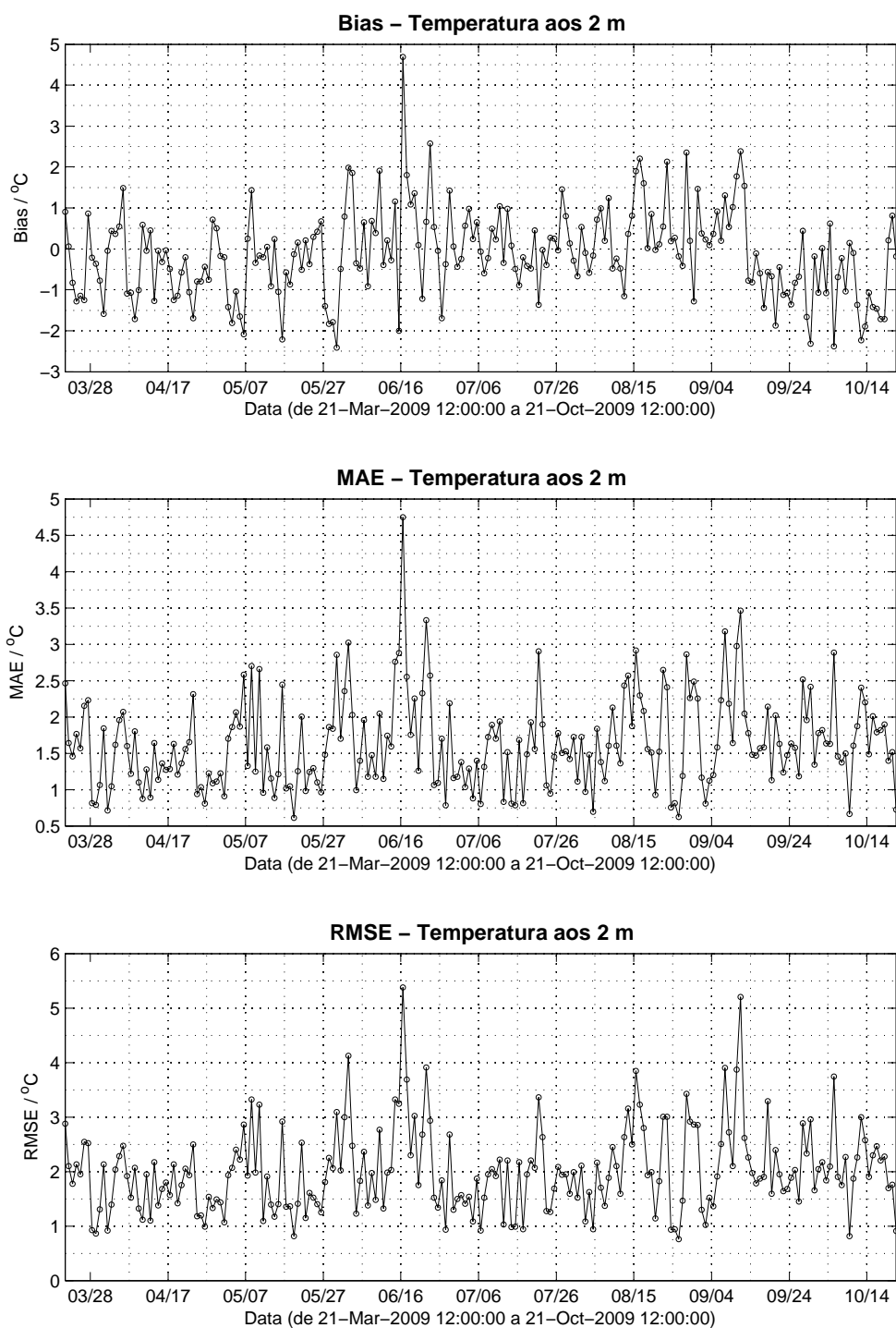


Figura 7.23: Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões de temperatura para as 48 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2009.

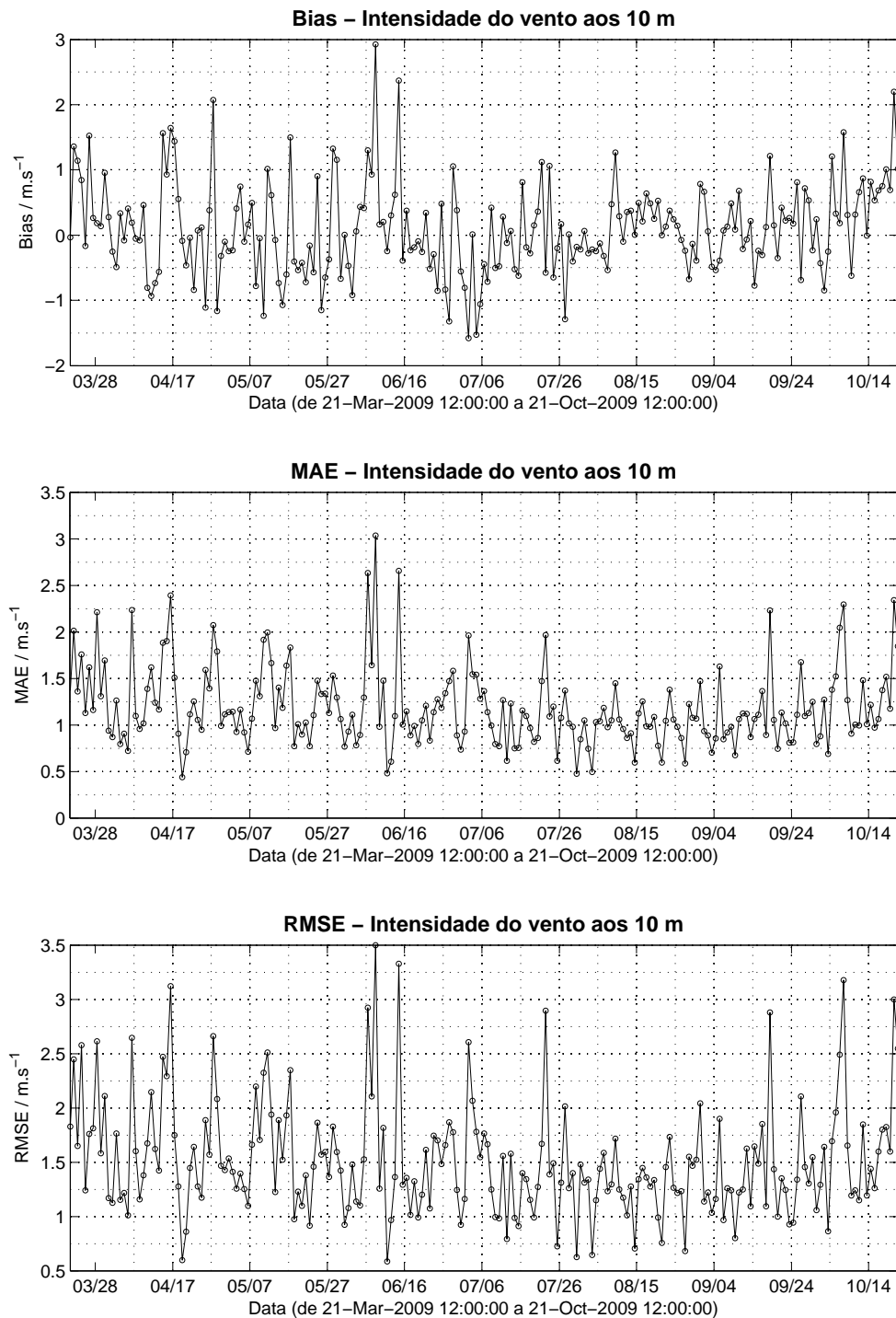


Figura 7.24: Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões da intensidade do vento para as 48 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2009.

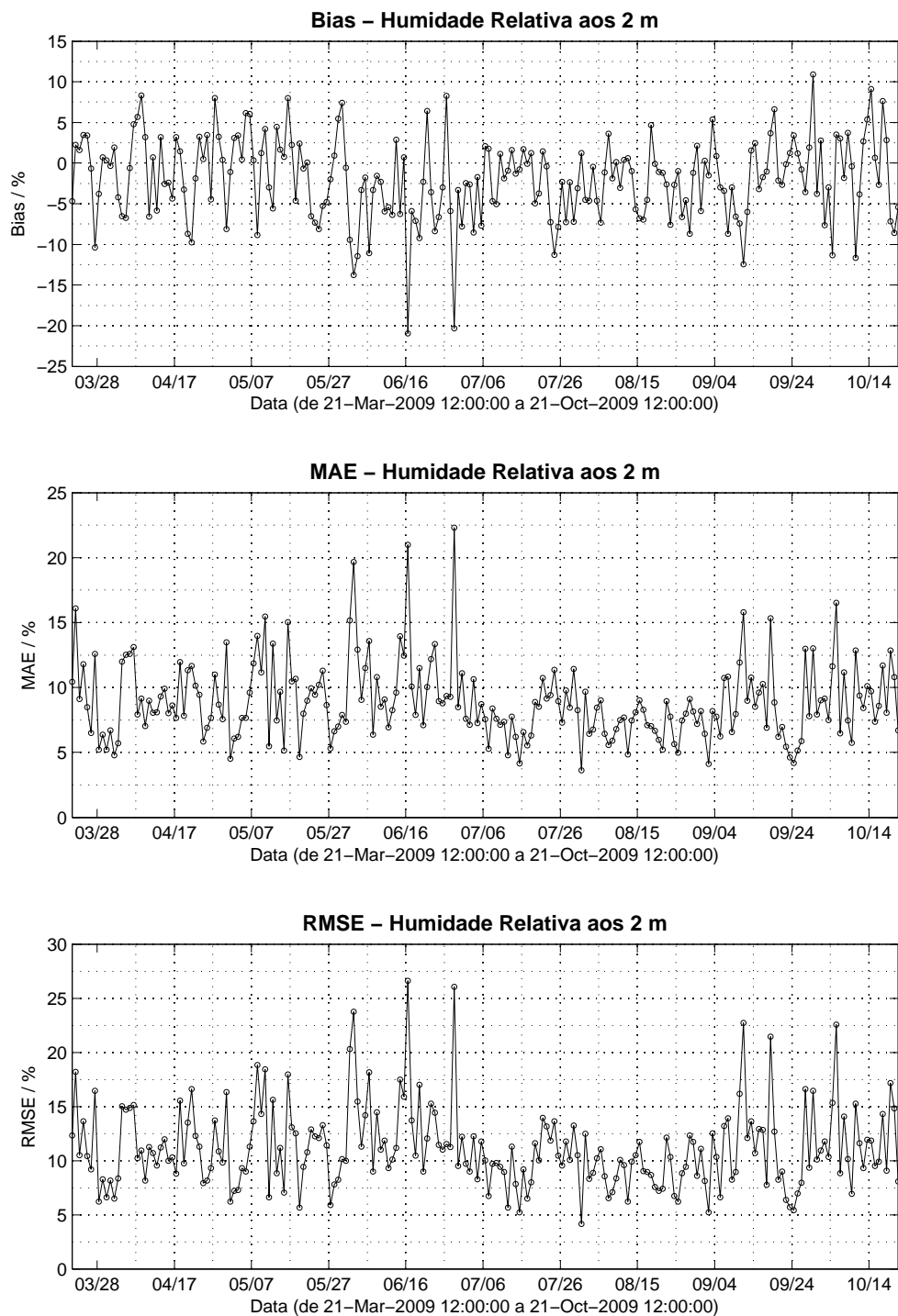


Figura 7.25: Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões de humidade relativa para as 48 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2009.

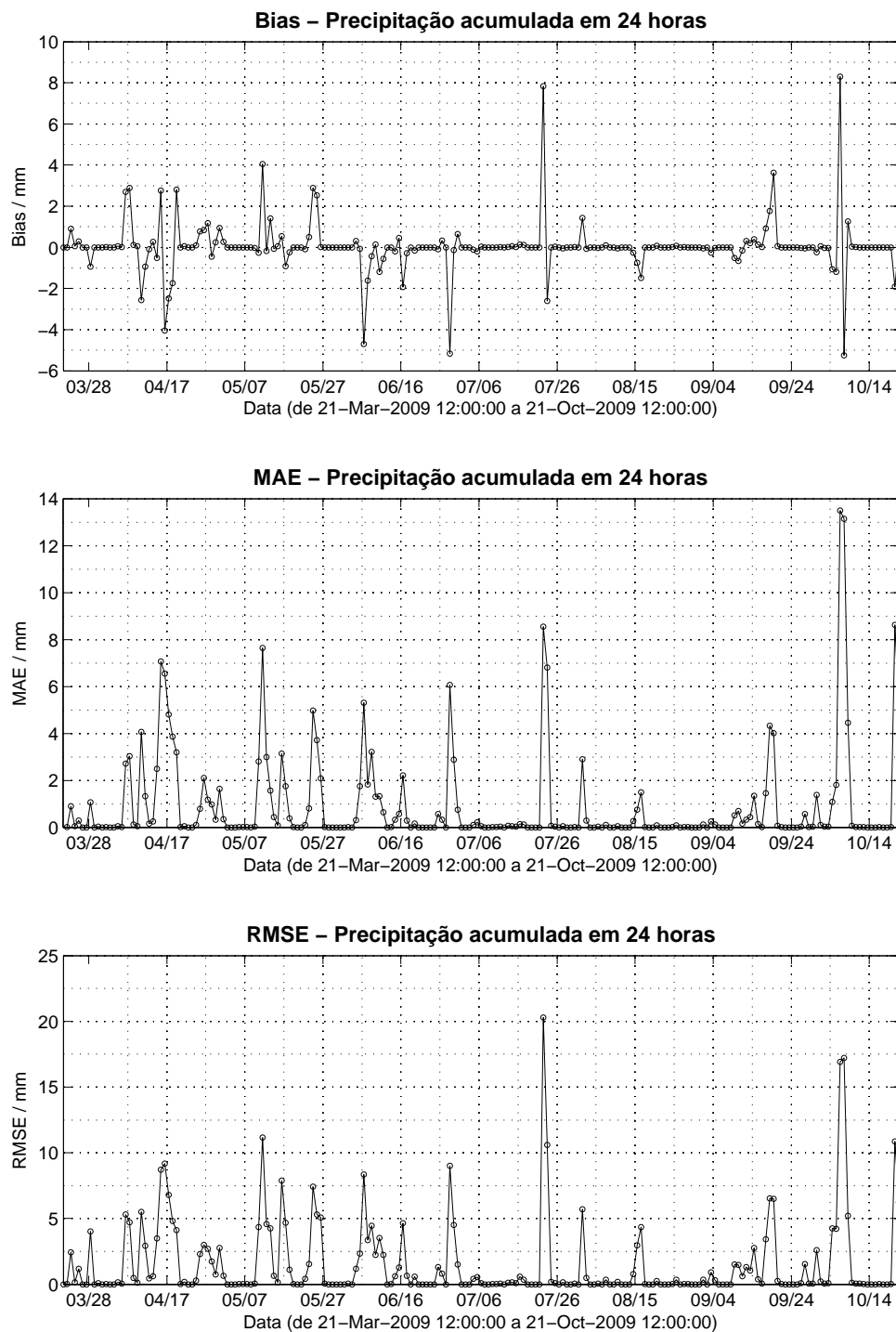


Figura 7.26: Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões, para as 48 horas seguintes, de precipitação acumulada em 24 horas, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2009.

7.4.1.2 Validação das previsões obtidas para 2010

Os dados das previsões WRF a 24 e 48 horas, para o período compreendido entre 21 de Março a 21 de Outubro de 2010, foram igualmente sujeitos a validação, tendo-se empregue a mesma metodologia descrita para a validação das previsões de 2009, possibilitando, assim, uma comparação entre as simulações obtidas para dois anos distintos. Muito embora se tenha procurado manter as estações de validação enunciadas na tabela 7.3, não foi possível contar com os dados da estação meteorológica de Faro (Aeroporto). Adicionalmente, os dados de temperatura e humidade relativa registados na estação meteorológica de Lisboa (Instituto Geofísico) revelaram uma quebra em períodos temporais assinaláveis, de 10 e 27 dias, respectivamente, conforme se pode apreciar na figura F.1.

Os resultados obtidos para a evolução temporal das medidas de erro das previsões para 24 horas de temperatura, intensidade do vento e humidade relativa à superfície, bem como de precipitação acumulada em 24 horas, para o ano de 2010, exibem-se nas figuras 7.27 a 7.30, sendo as respectivas representações gráficas dos dados observacionais e simulados, para cada ponto de validação, expostas no anexo F.

De igual modo, no que concerne às previsões obtidas para as 48 horas seguintes, as figuras 7.31 a 7.34 ilustram os resultados da evolução temporal das medidas de erro determinadas.

À semelhança do que se fez para a validação das previsões obtidas para 2009, a tabela 7.5 pretende sistematizar os resultados das medidas de erro calculadas.

	Bias			MAE			RMSE		
	min.	max.	média	min.	max.	média	min.	max.	média
Previsões a 24 horas									
Temperatura / °C	-2,913	3,538	-0,068	0,563	3,825	1,443	0,681	4,480	1,784
Intensidade do vento / m s^{-1}	-1,853	3,556	0,206	0,382	3,686	1,127	0,487	4,390	1,447
Humidade Relativa / %	-17,406	8,088	-3,024	3,119	18,006	7,771	4,153	20,782	9,746
Precipitação acumulada em 24 h. / mm	-8,613	4,907	-0,007	0,000	15,931	1,010	0,000	20,602	1,589
Previsões a 48 horas									
Temperatura / °C	-2,638	4,119	-0,013	0,656	4,425	1,667	0,812	5,184	2,035
Intensidade do vento / m s^{-1}	-1,922	3,591	0,193	0,546	3,697	1,210	0,714	4,255	1,536
Humidade Relativa / %	-25,000	19,550	-3,450	3,894	25,053	9,059	4,760	27,711	11,187
Precipitação acumulada em 24 h. / mm	-11,467	10,813	0,063	0,000	16,913	1,138	0,000	27,986	1,841

Tabela 7.5: Sistematização das medidas de erro nas previsões WRF a 24 e 48 horas, para 2010.

Comparativamente às previsões obtidas para 2009, as previsões a 24 horas de temperatura e humidade relativa à superfície caracterizam-se por menores valores médios de MAE e RMSE, ao passo que as previsões de intensidade do vento aos 10 m e precipitação acumulada em 24 horas se caracterizam por valores ligeiramente superiores de MAE e RMSE,

em termos médios, para as 215 simulações efectuadas. Já as previsões a 48 horas exibem, na globalidade das variáveis previstas, valores ligeiramente superiores das medidas de erro calculadas, comparativamente às simulações a 48 horas para 2009. Não obstante, tal como para o caso das simulações para 2009, consideram-se as previsões efectuadas adequadas para os propósitos da determinação, em regime operacional, das componentes do sistema FWI canadiano. Deve, igualmente, salientar-se que em ambos os anos a que as simulações se referem, se obtêm valores médios de RMSE superiores aos de MAE, bem como valores do quadrado de RMSE muito superiores aos valores do quadrado do viés, o que permite inferir da boa qualidade das previsões obtidas.

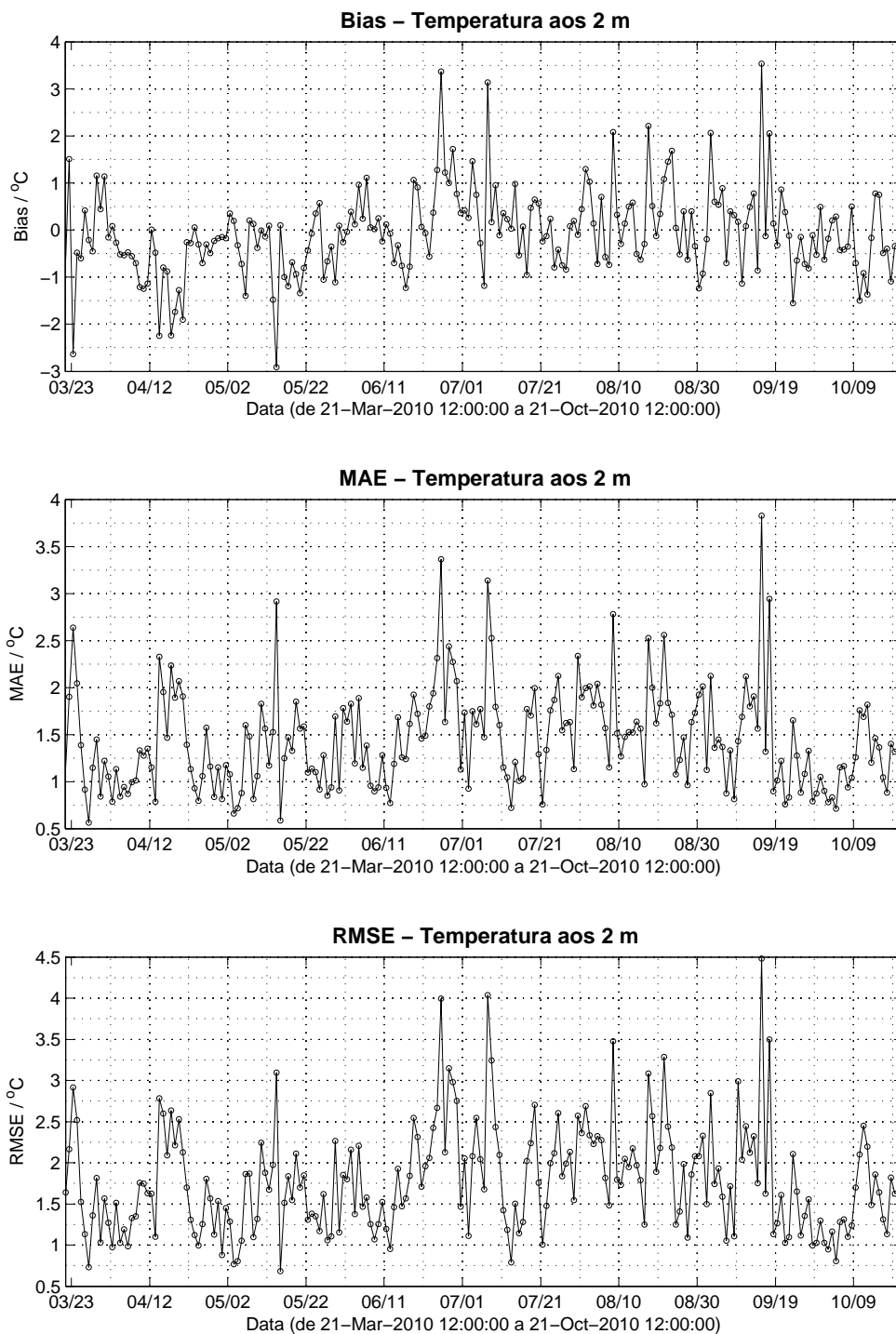


Figura 7.27: Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões de temperatura para as 24 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2010.

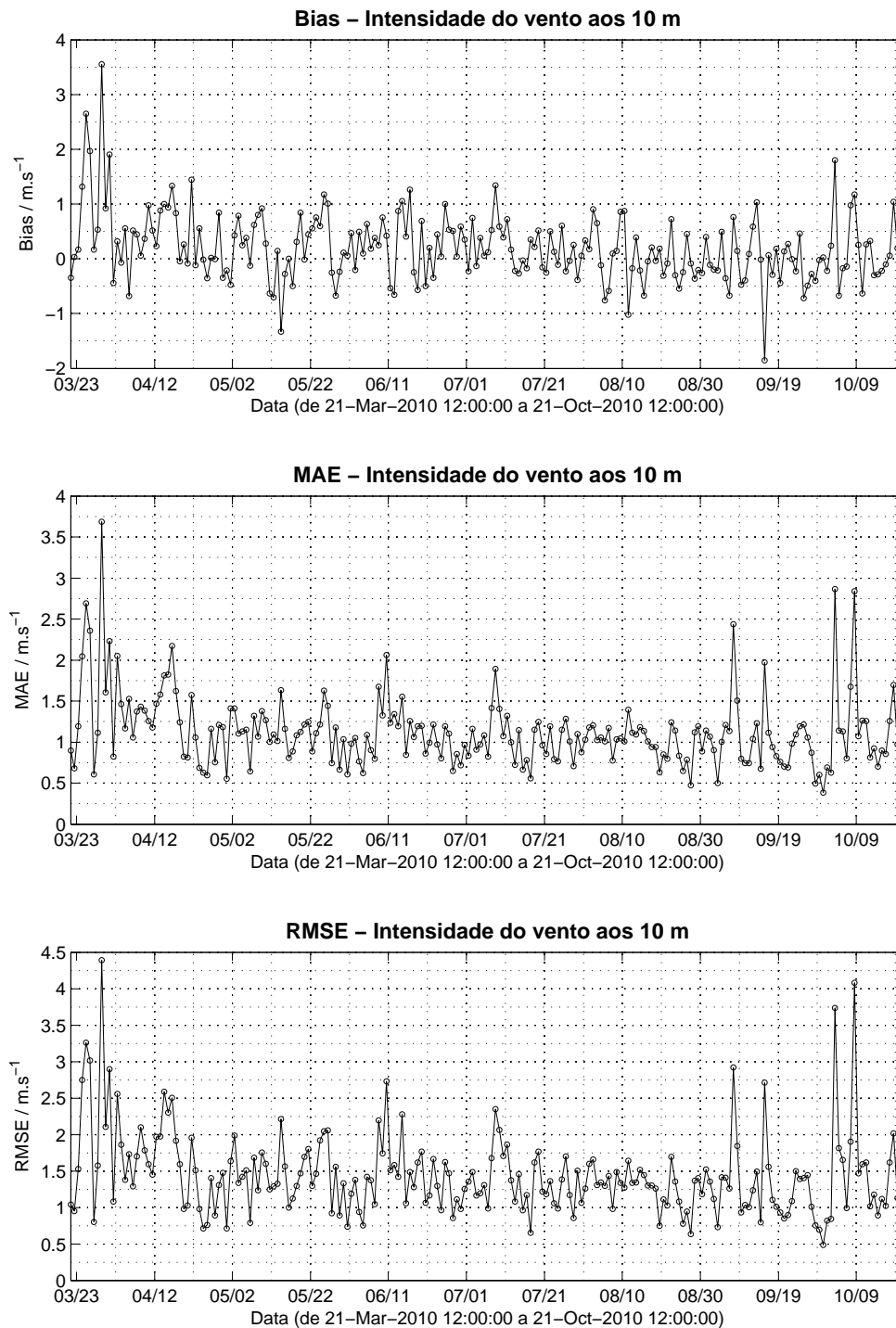


Figura 7.28: Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões da intensidade do vento para as 24 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2010.

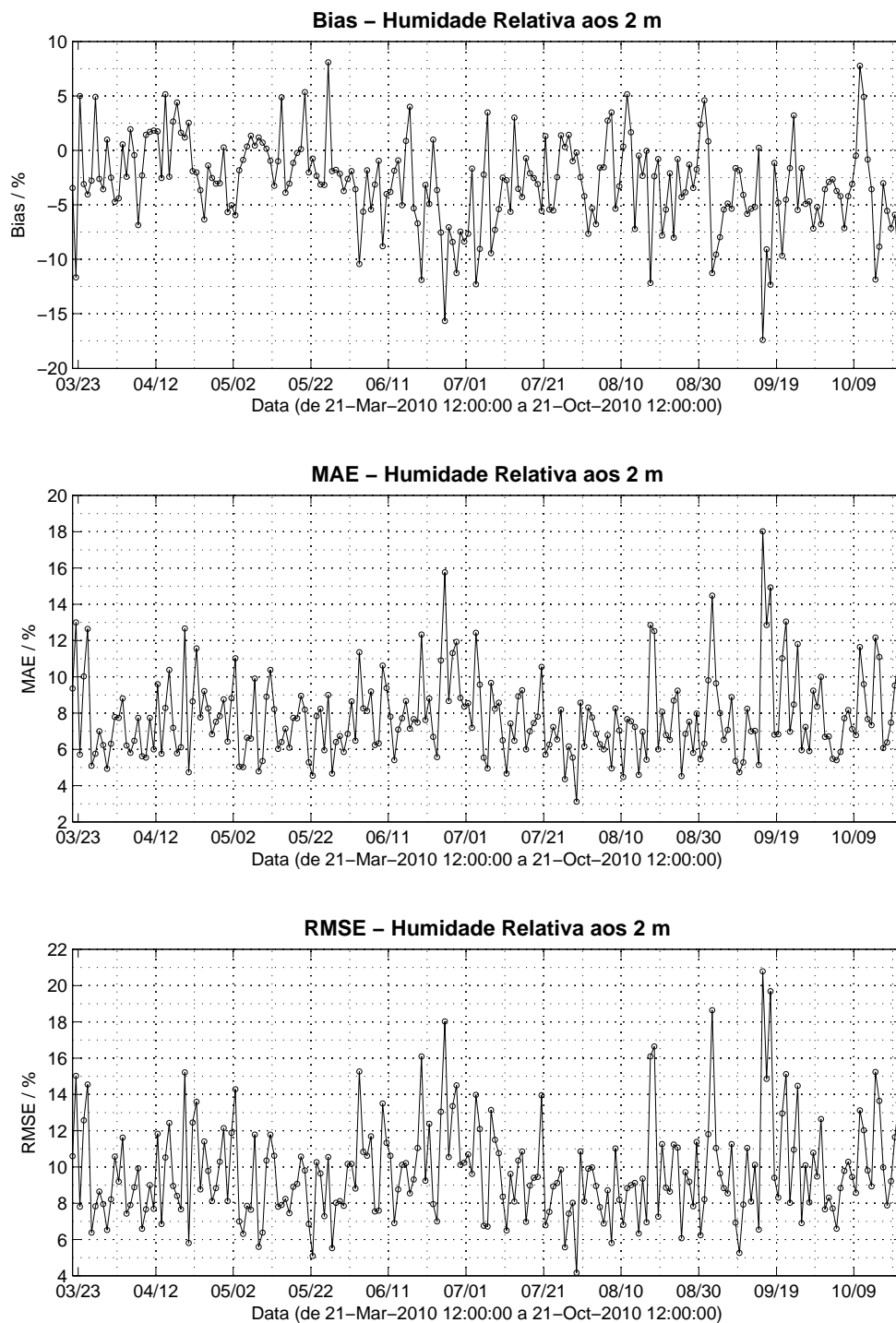


Figura 7.29: Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões de humidade relativa para as 24 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2010.

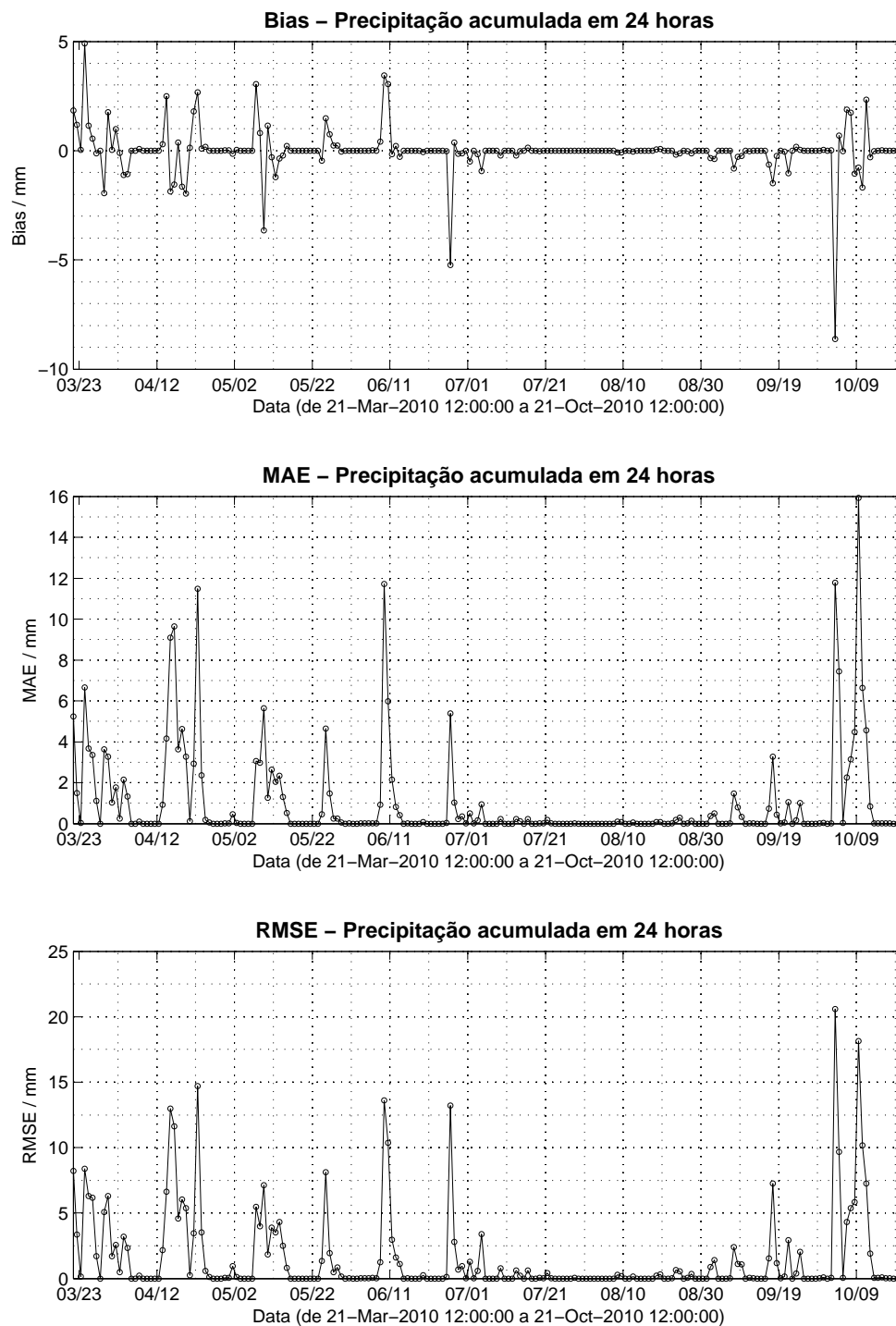


Figura 7.30: Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões, para as 24 horas seguintes, de precipitação acumulada em 24 horas, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2010.

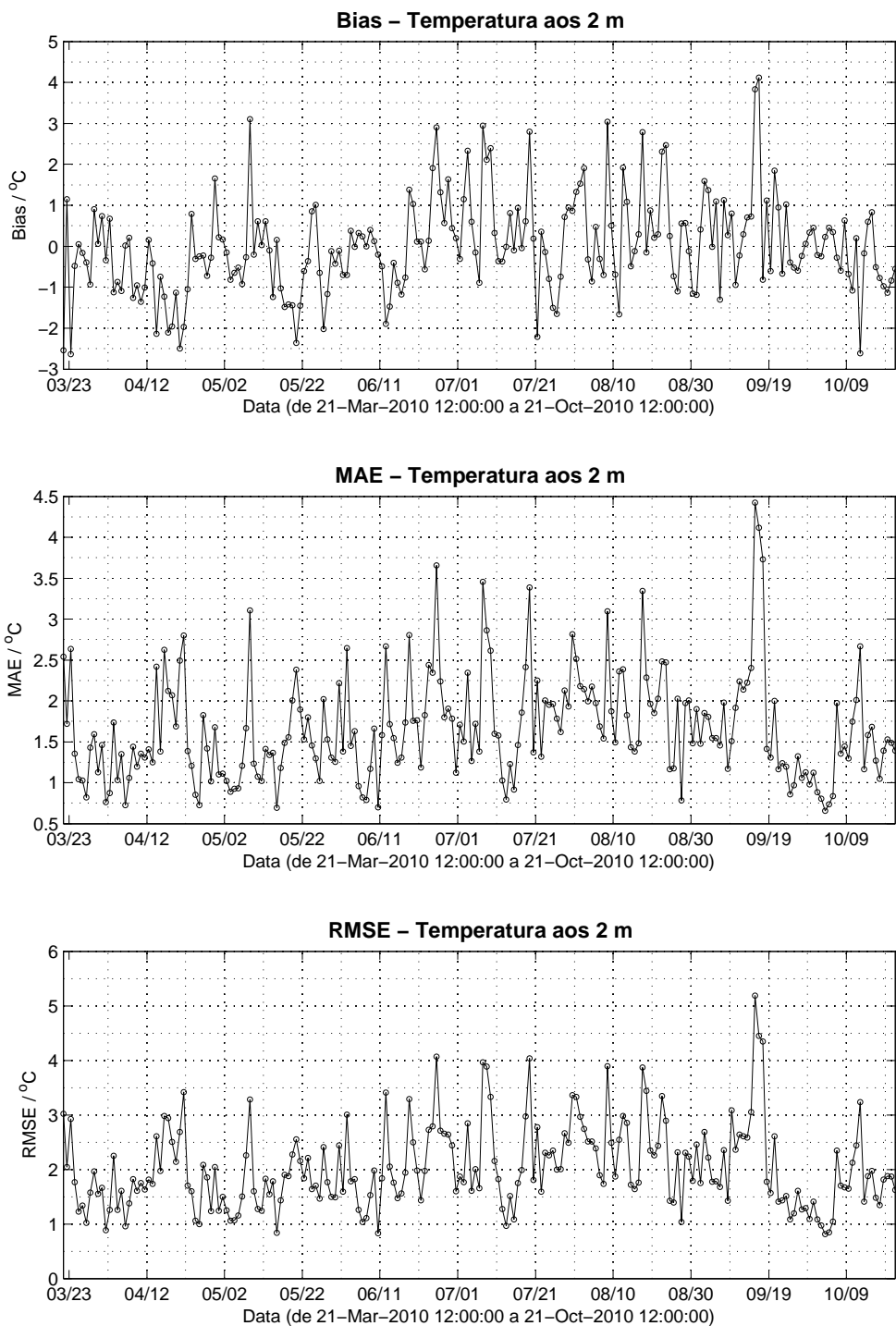


Figura 7.31: Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões de temperatura para as 48 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2010.

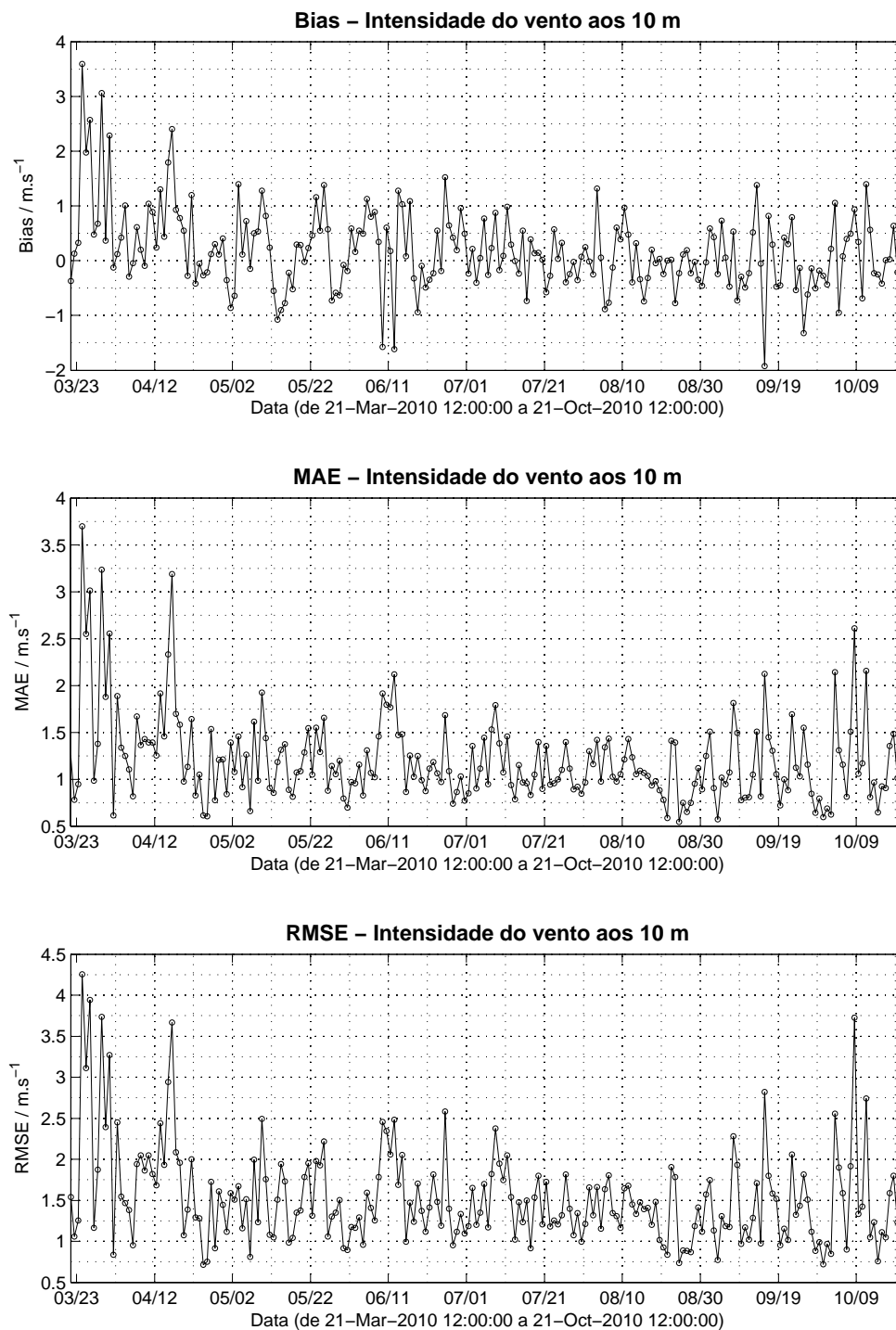


Figura 7.32: Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões da intensidade do vento para as 48 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2010.

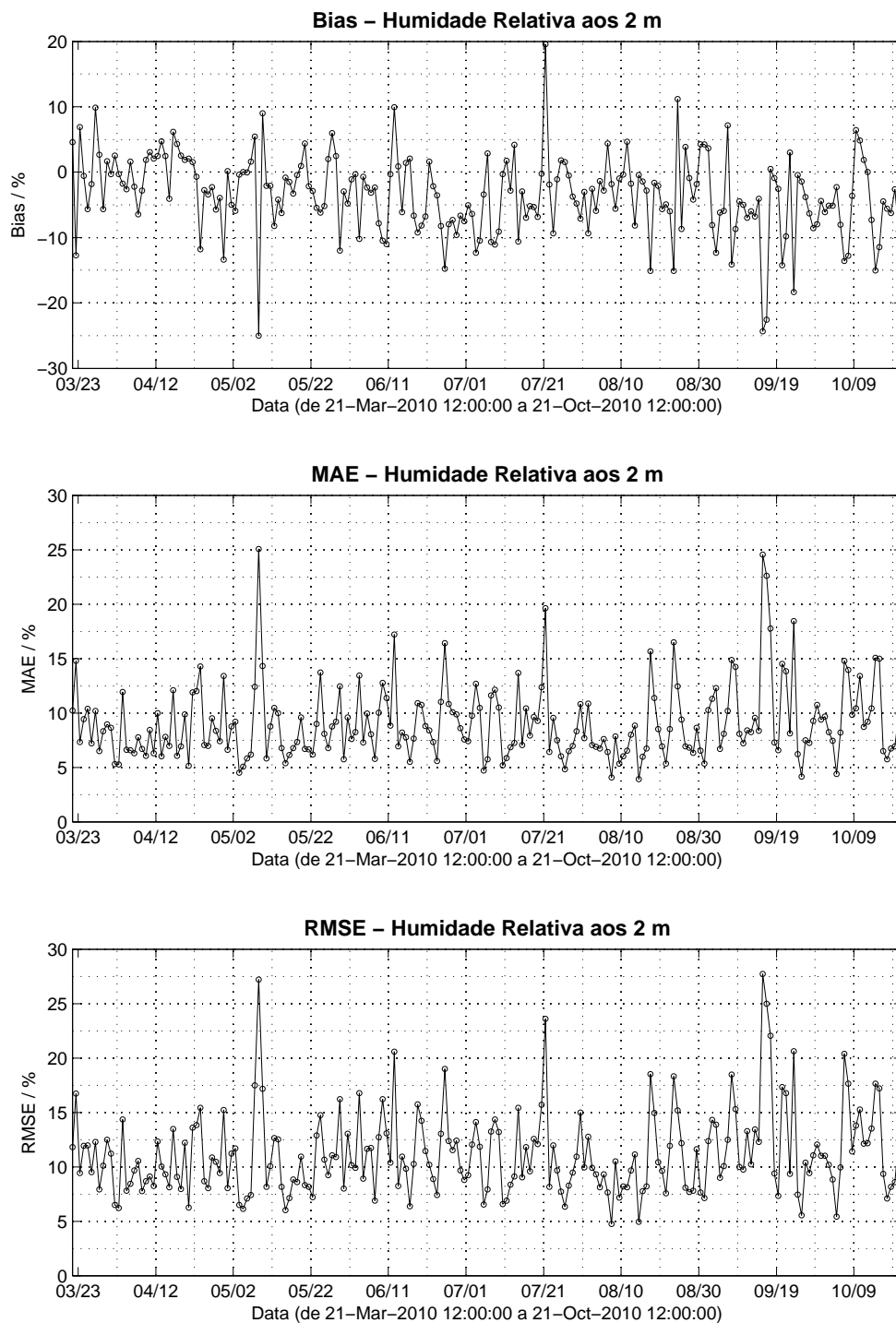


Figura 7.33: Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões de humidade relativa para as 48 horas seguintes, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2010.

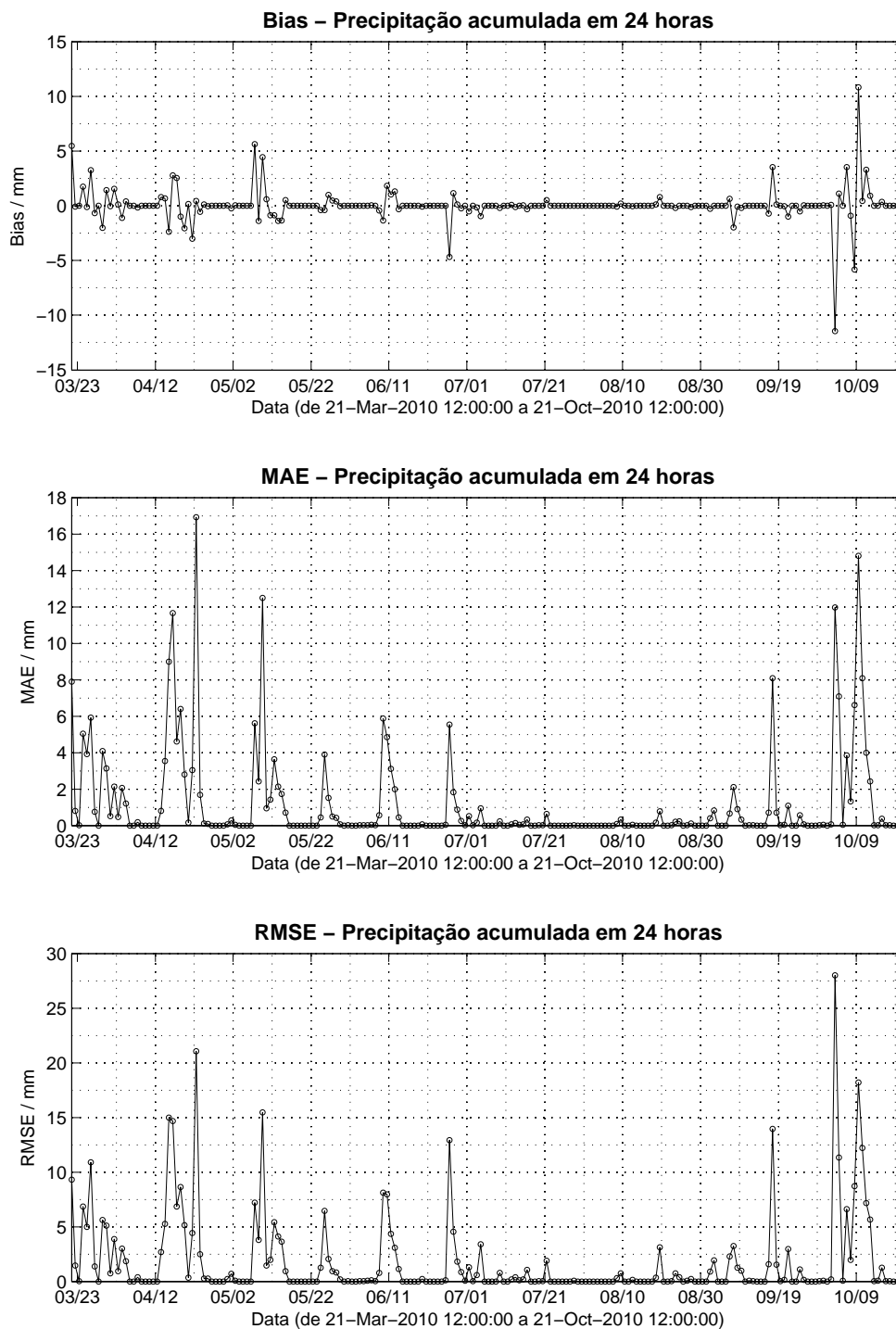


Figura 7.34: Viés, erro absoluto médio e raiz quadrada do erro quadrático médio para as previsões, para as 48 horas seguintes, de precipitação acumulada em 24 horas, no período de 21 de Março a 21 de Outubro de 2010.

7.4.2 Análise das componentes do sistema FWI canadiano para as épocas de incêndio de 2009 e de 2010

No sentido de proceder a uma análise cuidada dos resultados obtidos com a aplicação das previsões WRF à determinação das componentes do sistema canadiano de indexação do perigo de incêndio, para a época de incêndios de 2009 e 2010, foi constituído um processo de verificação em duas escalas: por um lado, a escala nacional, onde se compararam as médias mensais dos índices FWI e DSR com as estatísticas mensais de área ardida e número de ocorrências, e, posteriormente, a mesma análise foi repetida, para cada um dos dezoito distritos de Portugal Continental, conforme se detalha nas subsecções seguintes. Fazendo uso de técnicas de selecção automática das células da grelha computacional sobre terra (isto é, que não se localizassem sobre corpos de água) inseridas na área delimitada pelos contornos de uma *shapefile* de Portugal Continental, foi possível obter o conjunto de pontos mais ajustado à geometria do País e, *a posteriori*, à geometria de cada distrito. Muito embora se tenha procurado levar em consideração os tempos de resposta associados aos diferentes índices do sistema FWI canadiano, optou-se por iniciar o cálculo da média no mês de Maio, não contemplando os 52 dias de resposta do índice DC, tendo-se suspenso o cálculo no final do mês de Setembro. Obtiveram-se, pois, cinco conjuntos de médias mensais de DSR e FWI, primeiramente à escala nacional e, posteriormente, à escala distrital, abarcando, assim, o período onde habitualmente se verifica a maioria das ocorrências de incêndio. Os valores obtidos foram, seguidamente, relacionados com as estatísticas mensais de ocorrências e área ardida, para os anos de 2009 e 2010 (European Commission et al., 2010, 2011), patentes na tabela 2.1, sendo a análise estatística efectuada com recurso ao *software Gnu Regression, Econometrics and Time-series Library (Gretl)*.

7.4.2.1 Análise à escala nacional

7.4.2.1.1 Caso da época de incêndios de 2009

Os dados resultantes das médias mensais dos índices FWI e DSR, calculadas para o período de Maio a Setembro de 2009, sobre todos os pontos sobre terra da grelha computacional do domínio 2 do WRF, assentes em território continental português, sistematizam-se na tabela 7.6. Deve, porém, salientar-se que os dados de ocorrências e áreas ardidadas expostos na tabela 7.6 apresentam algumas disparidades face aos dados do relatório de áreas ardidadas e ocorrências da Autoridade Florestal Nacional, para 2009 (Direcção de Unidade de Defesa da Floresta, 2009). Dada a indefinição sobre qual das bases de dados representa o verdadeiro valor para o número de ocorrências e áreas ardidadas, e tendo em conta a participação da AFN para a elaboração do relatório sobre fogos florestais à escala Europeia,

foram considerados os dados da JRC como representativos dos dados de ocorrências e áreas ardidas em 2009.

Mês	Média de FWI_24h	Média de FWI_48h	Média de DSR_24h	Média de DSR_48h	Ocorrências	Área Ardida (ha)
Maio	16,6802	16,0282	5,3594	5,0382	1413	1717
Junho	23,0003	24,0977	8,8928	9,3464	1282	635
Julho	31,9911	32,6978	14,5165	14,8979	2152	3811
Agosto	35,1337	35,3093	16,2207	16,4241	5135	33173
Setembro	33,0984	31,5109	14,3880	13,5727	7774	25989

Tabela 7.6: Médias mensais, à escala nacional, dos índices FWI e DSR e respectivas ocorrências e áreas ardidas, de Maio a Setembro de 2009. Fonte dos dados de ocorrências e área ardida: European Commission et al. (2010).

Numa primeira análise exploratória dos dados referentes à obtenção dos componentes do sistema FWI canadiano para a **época de incêndios de 2009**, começou-se por traçar a evolução temporal da média mensal dos índices DSR e FWI, obtidos mediante o uso de previsões WRF a 24 e a 48 horas, confrontando-os directamente com a evolução da área total ardida, para os meses de Maio a Setembro, conforme ilustram as figuras 7.35 e 7.36.

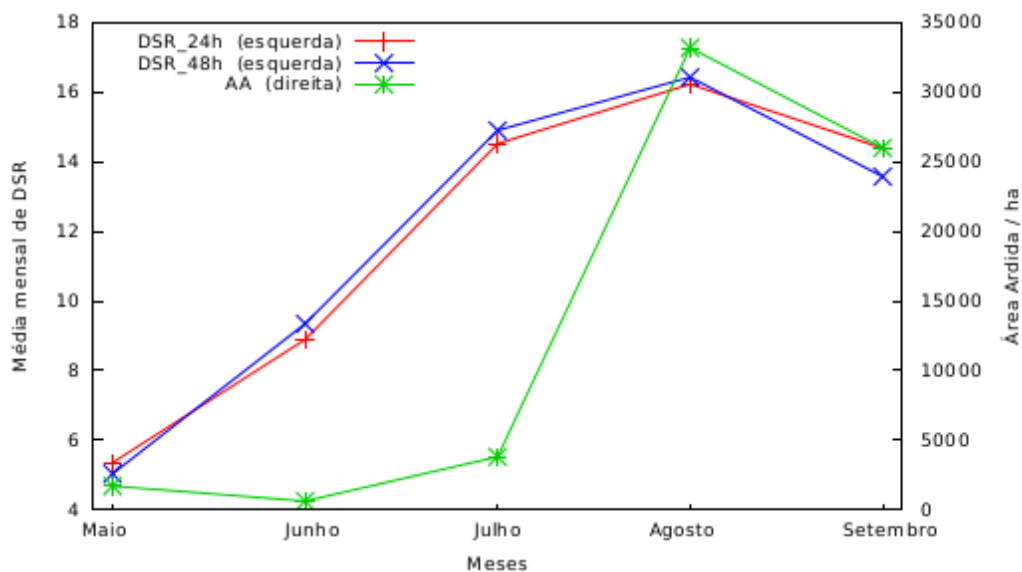


Figura 7.35: Média mensal, à escala nacional, do índice DSR, obtido mediante previsões do WRF a 24 e 48 horas, e respectiva área ardida mensal, para a época de incêndios de 2009.

De forma similar, no que concerne à evolução temporal do número de ocorrências à escala nacional e respectiva comparação com a evolução temporal da média mensal dos índices FWI e DSR, as figuras 7.37 e 7.38 exibem a potencial relação entre a expressividade dos incêndios e as condições meteorológicas.

Por análise das figuras 7.35 a 7.38 é possível constatar a coerência dos índices DSR e FWI obtidos mediante previsões WRF a 24 e a 48 horas. De igual modo, na figura 7.35 pode verificar-se a ocorrência de um máximo simultâneo para o mês de Agosto, quer no que

7.4 Resultados obtidos e sua discussão

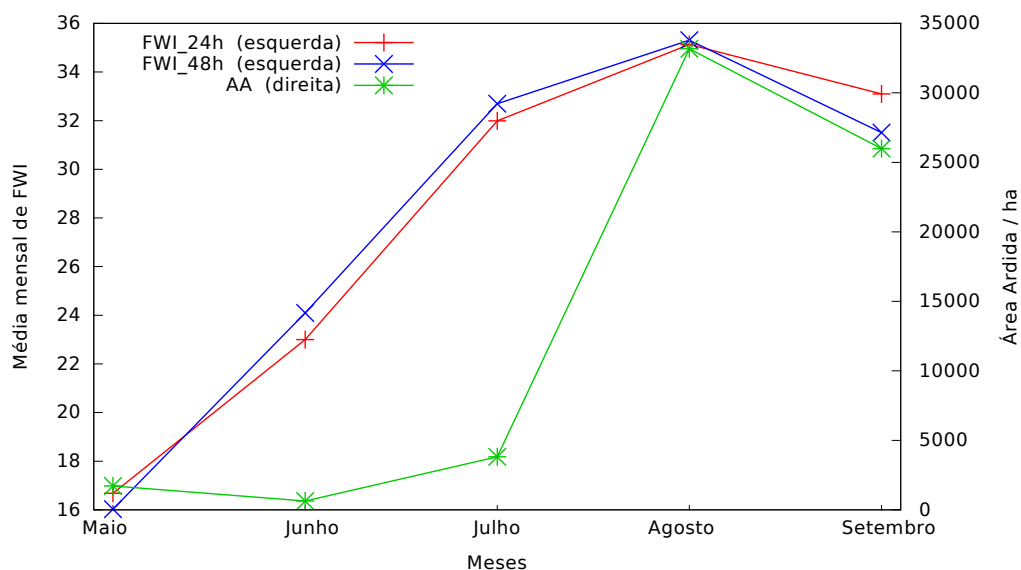


Figura 7.36: Média mensal, à escala nacional, do índice FWI, obtido mediante previsões do WRF a 24 e 48 horas, e respectiva área ardida mensal, para o ano de 2009.

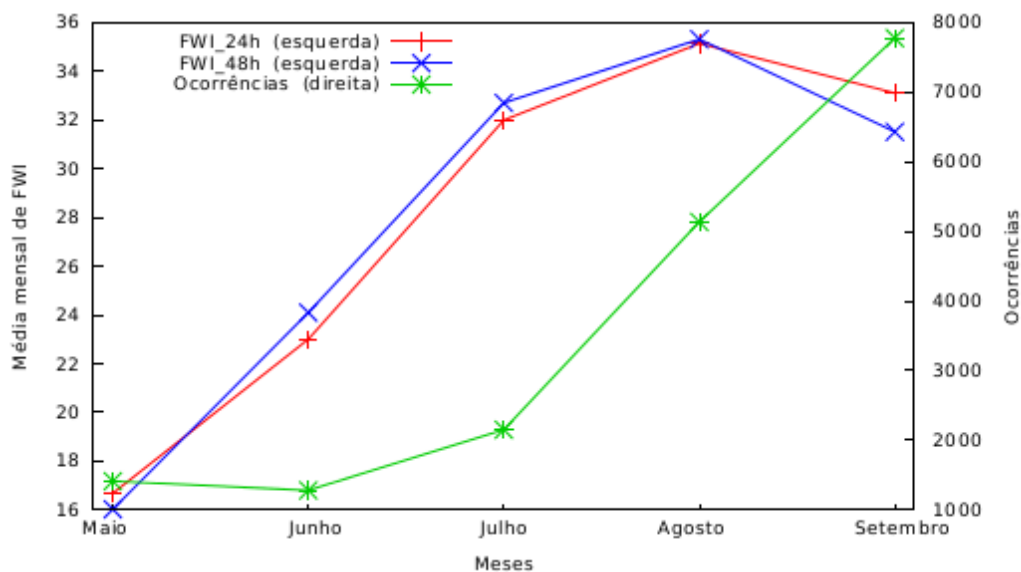


Figura 7.37: Média mensal, à escala nacional, do índice FWI, obtido mediante previsões do WRF a 24 e 48 horas e respectivo número mensal de ocorrências, para o ano de 2009.

respeita ao índice DSR, quer no que se refere à área ardida, ilustrando a maior severidade dos incêndios florestais, no que concerne às áreas ardidas, no mês de Agosto.

Alguns estudos (Carvalho et al., 2008; Pereira et al., 2013), de horizonte temporal mais alargado, têm vindo a demonstrar que a área ardida à escala nacional em Portugal pode ser modelada por uma distribuição lognormal, sendo o mesmo aplicável ao número de ocorrências. De forma a verificar se tal premissa pode ser estabelecida para os períodos do ano em estudo, foi analisada estatisticamente a área ardida nacional, no período de Maio a

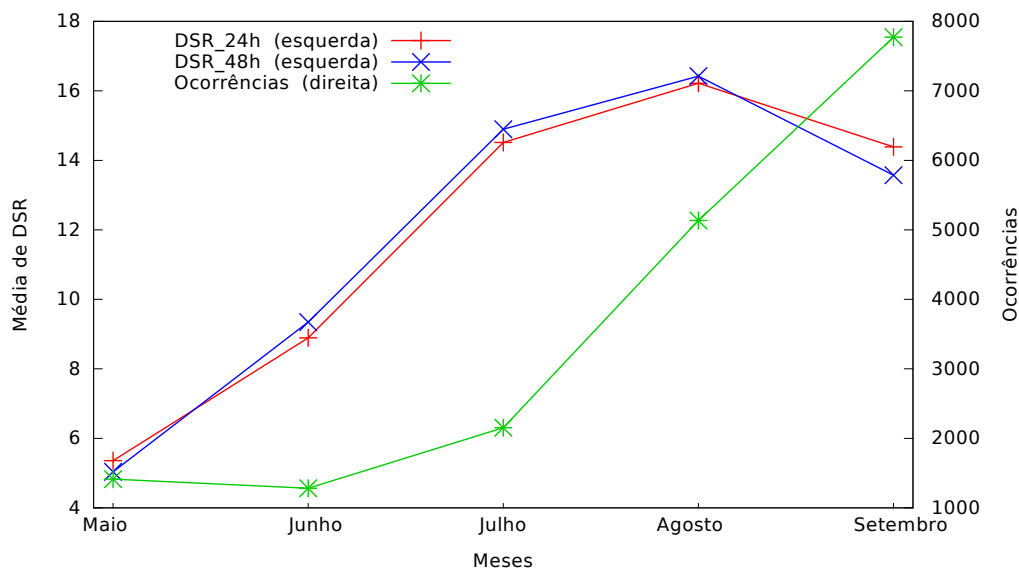


Figura 7.38: Média mensal, à escala nacional, do índice DSR, obtido mediante previsões do WRF a 24 e 48 horas e respectivo número mensal de ocorrências, para o ano de 2009.

Setembro de 2009, fazendo uso do teste de normalidade de Shapiro-Wilk, particularmente talhado para amostras de dimensão reduzida (Shapiro e Wilk, 1965), que determina um valor W , para testar a presunção da distribuição normal de uma amostra. Baixos valores de W (que varia entre 0 e 1) evidenciam um desvio da normalidade. Se o valor W for estatisticamente significativo ($p_{value} < 0,05$), a hipótese de que a respectiva distribuição é normal deve ser rejeitada. Caso contrário, pode presumir-se que os dados são normalmente distribuídos.

A tabela 7.7 sistematiza os resultados do teste de Shapiro-Wilk efectuado, respectivamente, sobre os dados de área ardida (AA2009) expostos na tabela 7.6 e sobre o logaritmo neperiano desses mesmos dados ($\ln(AA2009)$) e, analogamente, para os dados de ocorrências de incêndio (OCO2009) e respectivo logaritmo neperiano ($\ln(OCO2009)$). Tendo em conta os resultados, tanto a área ardida como o seu logaritmo podem ser considerados normalmente distribuídos, enfatizando-se, porém, o maior valor de W para o logaritmo da área ardida, bem como o valor de p_{value} , francamente superior ao nível de significância estatística assumido. A mesma constatação pode ser efectuada no que diz respeito aos dados relativos ao número mensal de ocorrências.

Com o intuito de explorar a eventual relação entre a área ardida mensal (e o seu logaritmo) e a média mensal, à escala nacional, do índice de severidade diário (DSR), as figuras 7.39a e 7.39b representam, respectivamente, o logaritmo natural da área mensal ardida em função do índice DSR obtido a partir de simulações WRF a 24 horas. De imediato, é possível inferir da existência de correlação, sendo, contudo, mais forte entre o logaritmo da área mensal ardida e o índice DSR obtido a partir das simulações WRF a 24

	W	p_{value}
AA2009	0,8034	0,08629
Ln(AA2009)	0,9170	0,5107
OCO2009	0,8488	0,1907
Ln(OCO2009)	0,8914	0,364

Tabela 7.7: Resultados dos testes de normalidade à área ardida e ao número de ocorrências, de Maio a Setembro de 2009, e respectivos logaritmos naturais.

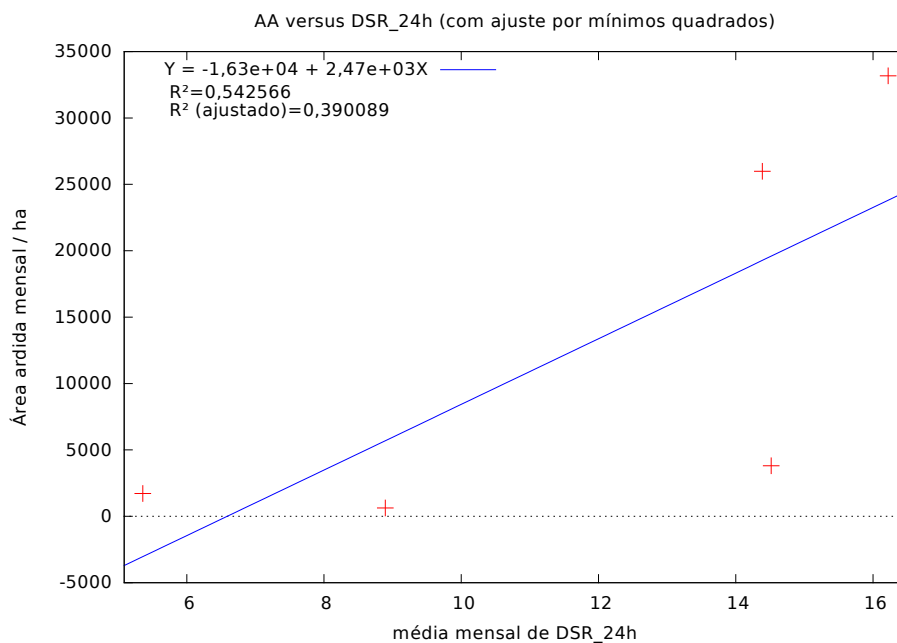
horas. De forma similar, as figuras 7.40a e 7.40b representam, respectivamente, o logaritmo natural da área mensal ardida em função do índice DSR obtido a partir de simulações WRF a 48 horas, permitindo a constatação de que, em concordância com a esperada degradação das previsões WRF para o segundo dia, as correlações sejam mais fracas.

Como forma de evidenciar a dependência das eventuais relações lineares entre as variáveis analisadas, a tabela 7.8 representa a matriz de correlação, onde se exibe o valor do coeficiente de correlação de Pearson para cada par de variáveis consideradas. Tendo em conta os resultados expostos nas figuras 7.39 e 7.40, pode, pois, inferir-se da existência de uma mais forte correlação entre o logaritmo da área ardida mensal e a média mensal do índice DSR, à escala nacional, sendo igualmente de destacar a mais forte correlação entre o logaritmo do número mensal de ocorrências e o índice FWI, obtido mediante previsões WRF a 24 horas.

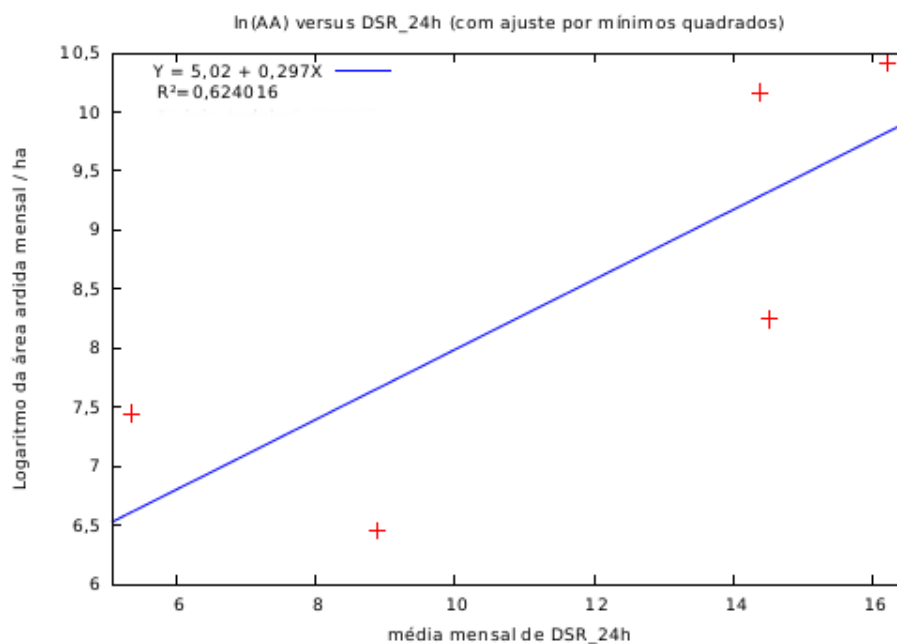
DSR_24h	DSR_48h	FWI_24h	FWI_48h	AA	I_AA	Ocorrências	I_Ocorrências	
1	0,9933	0,9979	0,9944	0,7366	0,7899	0,6671	0,7729	DSR_24h
	1	0,9855	0,9979	0,6844	0,7272	0,5817	0,6985	DSR_48h
		1	0,9905	0,7549	0,8037	0,7076	0,8028	FWI_24h
			1	0,6924	0,7281	0,6112	0,7178	FWI_48h
				1	0,9473	0,8751	0,9241	AA
					1	0,8915	0,9569	I_AA
						1	0,9812	Ocorrências
							1	I_Ocorrências

Tabela 7.8: Coeficientes de correlação, para os dados da época de incêndio de 2009.

A relação entre as condições meteorológicas e a incidência de fogos florestais, tanto no que diz respeito ao número de ocorrências como no que concerne às áreas ardidas, à escala nacional, pode ser explorada a partir de análise aos gráficos das figuras 7.41 e 7.42, onde se comparam, respectivamente, a área ardida à escala nacional e o número de ocorrências à escala nacional com classes de DSR, determinado a partir das previsões WRF a 24 horas.

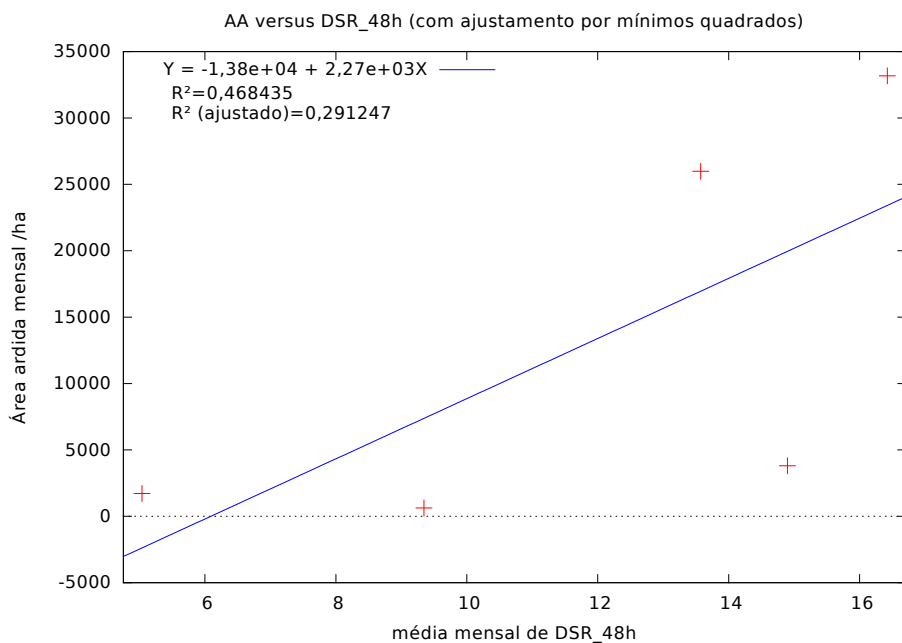


(a) Área Ardida mensal *versus* média mensal de DSR.

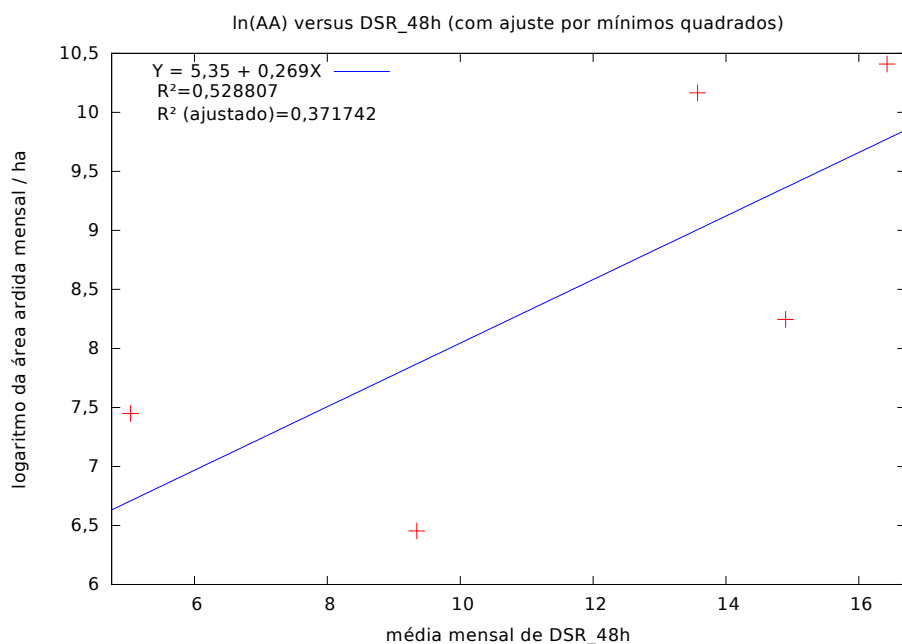


(b) Logaritmo da Área Ardida mensal *versus* média mensal de DSR.

Figura 7.39: Modelos de regressão linear aplicados à área ardida mensal em função da média mensal de DSR e ao logaritmo neperiano da área ardida mensal em função da média mensal de DSR, obtidos mediante previsões WRF a 24 horas, para o período de Maio a Setembro de 2009.



(a) Área Ardida mensal *versus* média mensal de DSR.



(b) Logaritmo da Área Ardida mensal *versus* média mensal de DSR.

Figura 7.40: Modelos de regressão linear aplicados à área ardida mensal em função da média mensal de DSR e ao logaritmo neperiano da área ardida mensal em função da média mensal de DSR, obtidos mediante previsões WRF a 48 horas, para o período de Maio a Setembro de 2009.

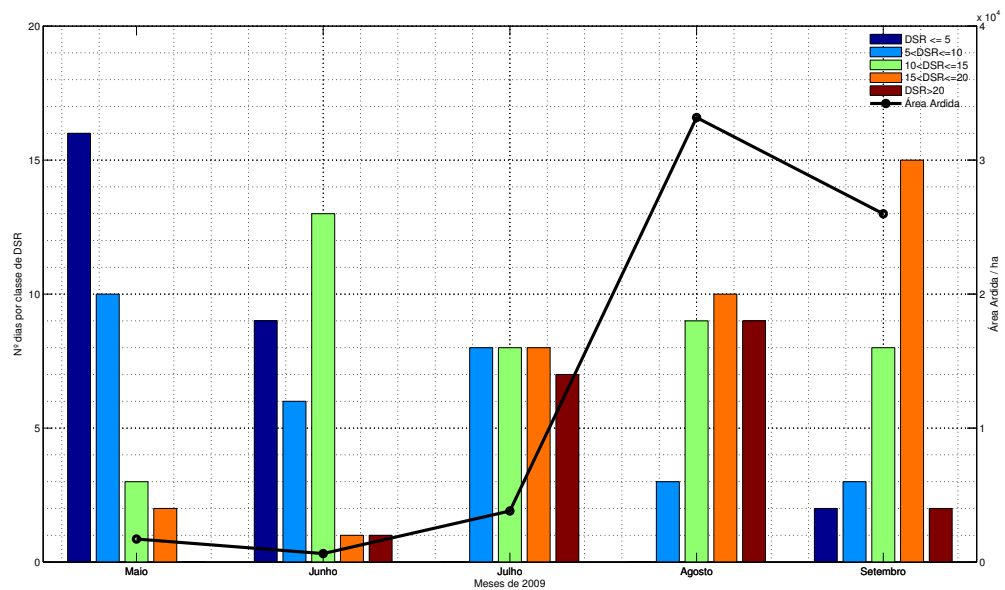


Figura 7.41: Distribuição, por número de dias, das classes de DSR à escala nacional e totais mensais de área aridada.

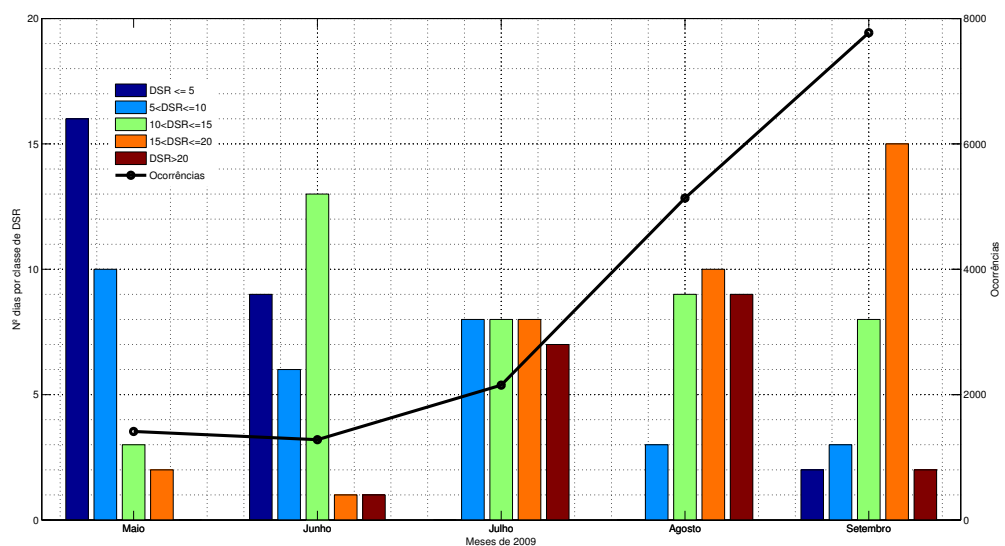


Figura 7.42: Distribuição, por número de dias, das classes de DSR à escala nacional e número total de ocorrências.

7.4.2.1.2 Caso da época de incêndios de 2010

Procedendo de forma inteiramente semelhante para a **época de incêndios de 2010**, a tabela 7.9 expõe os resultados das médias de FWI e DSR, calculadas mediante previsões WRF a 24 e a 48 horas, para o território de Portugal Continental, ao longo de Maio a Setembro de 2010.

Mês	Média de FWI_24h	Média de FWI_48h	Média de DSR_24h	Média de DSR_48h	Ocorrências	Área Ardida (ha)
Maio	13,1601	13,5232	3,7707	3,9701	799	1092
Junho	21,6805	21,672	7,7352	7,8217	1428	747
Julho	40,0808	40,3702	20,1625	20,492	5107	22143
Agosto	42,5737	42,0459	21,7444	21,3273	8949	99580
Setembro	31,1478	30,8854	12,9763	13,1485	2992	4136

Tabela 7.9: Médias mensais, à escala nacional, dos índices FWI e DSR e respectivas ocorrências e áreas ardidas, de Maio a Setembro de 2010. Fonte dos dados de ocorrências e área ardida: European Commission et al. (2011).

A figura 7.43 pretende ilustrar a evolução temporal da média mensal do índice DSR para todo o território de Portugal Continental e sua relação com a área ardida mensal. Por análise da figura, é possível verificar, em primeiro lugar, que tanto os resultados da média de DSR calculados com previsões WRF a 24 como a 48 h são muito similares, identificando-se claramente o período crítico, de Julho a Setembro, de expressividade dos incêndios florestais. Em segundo lugar, e tendo em conta os dados da tabela 2.2, os resultados apresentados permitem confirmar que as maiores áreas ardidas se verificam para ocorrências durante o mês de Agosto. Igual conclusão resulta da análise da figura 7.44, que ilustra o valor médio mensal do índice FWI para os meses de Maio a Setembro de 2010, à escala nacional.

No que concerne à eventual relação entre as médias mensais, à escala nacional, dos índices FWI e DSR calculados mediante as previsões WRF a 24 e 48 horas, e respectivo número de ocorrências, as figuras 7.45 e 7.46 ilustram, em consonância com as figuras 7.43 e 7.44 que o período crítico, de Julho a Setembro, caracterizado por valores mais elevados do índice FWI, pautou pelo maior número de ocorrências de incêndio.

Em consonância com o efectuado na secção anterior, averigou-se a normalidade das séries da média mensal de área ardida (AA_{2010}) e do respectivo logaritmo neperiano ($\ln(AA_{2010})$), bem como do número de ocorrências (OCO_{2010}) e respectivo logaritmo natural ($\ln(OCO_{2010})$), de acordo com o teste de Shapiro-Wilk. Dos resultados obtidos, ilustrados na tabela 7.10, torna-se possível concluir que os dados da área ardida mensal não são normalmente distribuídos, ao passo que os dados do logaritmo natural da área ardida mensal podem ser considerados normalmente distribuídos. Já no que concerne ao número de ocorrências, o teste de Shapiro-Wilk revela que ao nível de significância estatística considerado, tanto os dados de número de ocorrências como o seu logaritmo neperiano seguem

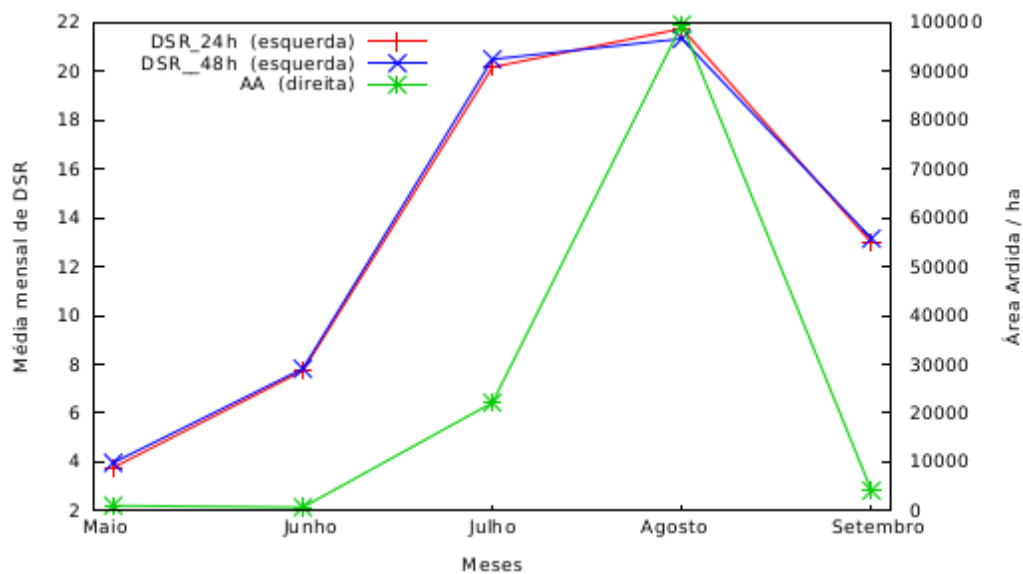


Figura 7.43: Média mensal, à escala nacional, do índice DSR, obtido mediante previsões do WRF a 24 e 48 horas, e respectiva área ardida mensal, para o ano de 2010.

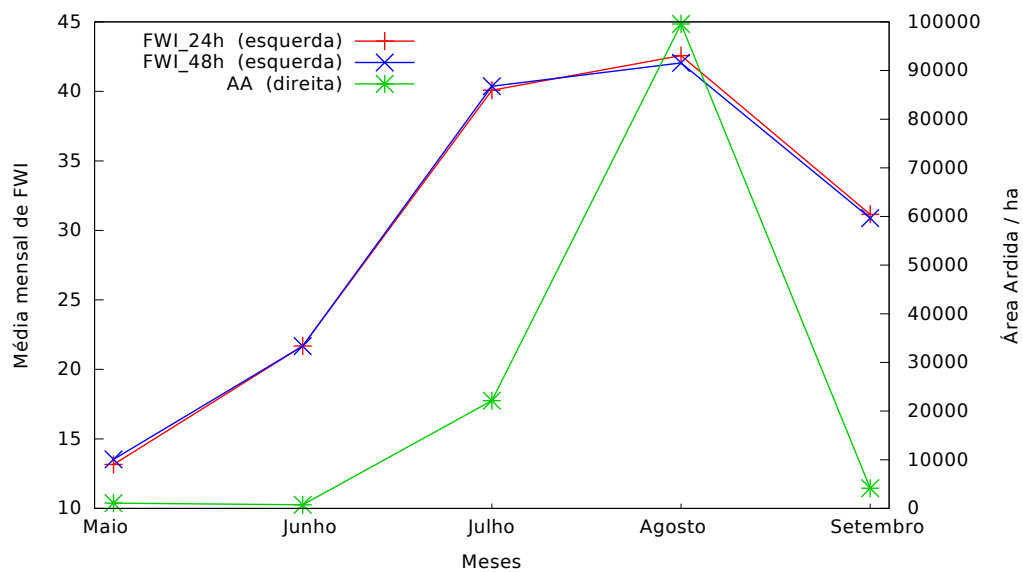


Figura 7.44: Média mensal, à escala nacional, do índice FWI, obtido mediante previsões do WRF a 24 e 48 horas, e respectiva área ardida mensal para o ano de 2010.

distribuições normais.

Assim, nas figuras 7.47 e 7.48 ilustra-se a relação entre o logaritmo da área ardida mensal e a média mensal do índice DSR. Tanto no que diz respeito ao DSR obtido mediante previsões WRF a 24 como a 48 horas, pode verificar-se a tendência de que baixos valores de DSR correspondem a baixos valores do logaritmo da área ardida, da mesma maneira que valores de DSR mais elevados tendem a corresponder a valores do logaritmo da área ardida superiores. A modelação dos dados segundo a hipótese de dependência linear do logaritmo

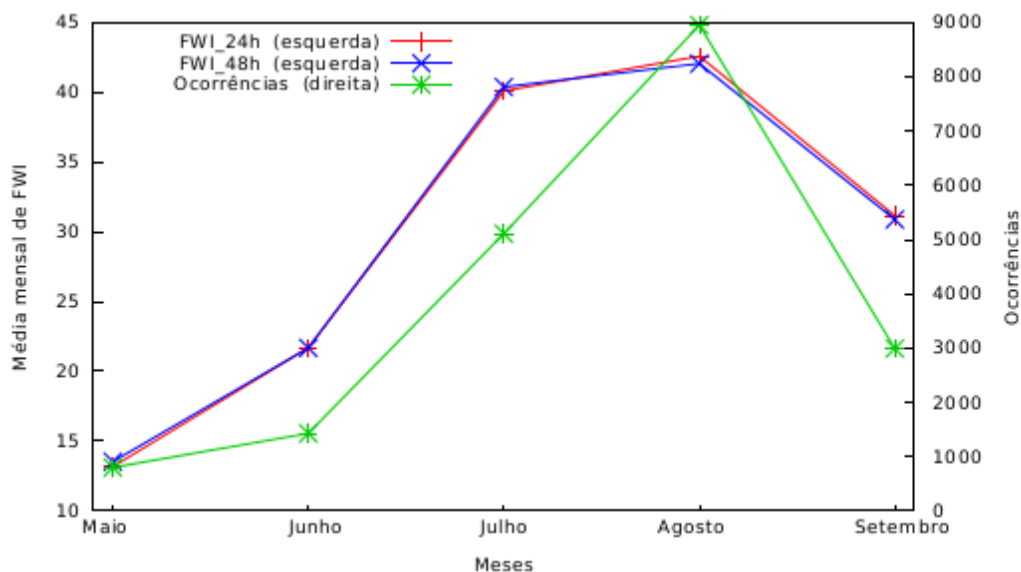


Figura 7.45: Média mensal, à escala nacional, do índice FWI, obtido mediante previsões do WRF a 24 e 48 horas e respectivo número mensal de ocorrências, para o ano de 2010.

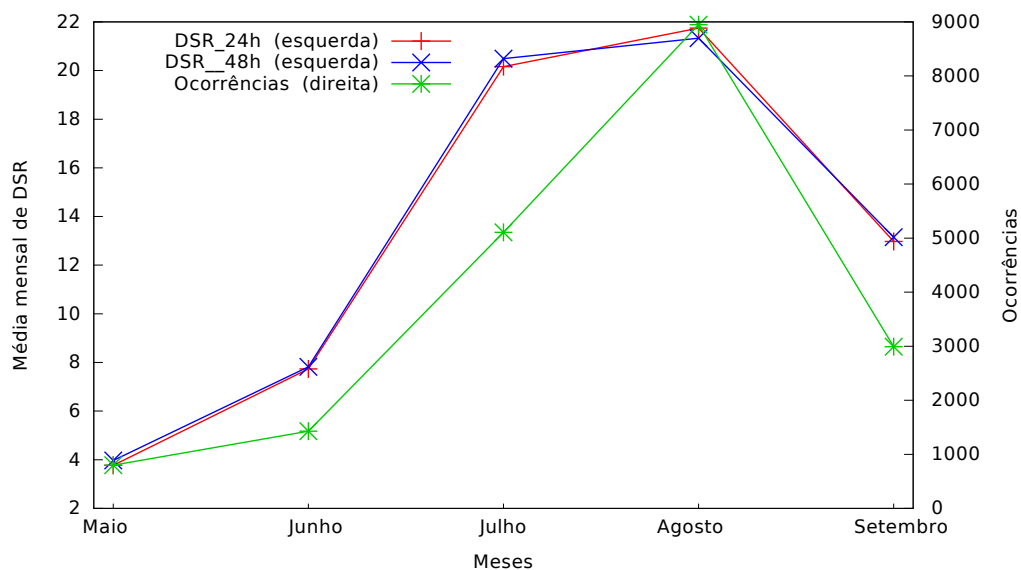


Figura 7.46: Média mensal, à escala nacional, do índice DSR, obtido mediante previsões do WRF a 24 e 48 horas e respectivo número mensal de ocorrências, para o ano de 2010.

da área total ardida e da média do índice DSR à escala nacional, para os meses de Maio a Setembro de 2010, permite obter as equações de recta exibidas nas figuras, bem como os respectivos valores de coeficiente de determinação, R^2 , denotando uma correlação mais forte, comparativamente aos dados da época de incêndios de 2009. Em conformidade com o que se verificou para o caso da época de incêndios de 2009, a degradação das previsões WRF a 48 horas tem impacto negativo sobre o índice DSR do sistema FWI canadiano.

Na tabela 7.11 é ilustrada a matriz de correlação das variáveis expostas nas figuras

	<i>W</i>	<i>Pvalue</i>
AA2010	0,6991	0,009369
Ln(AA2010)	0,9322	0,5107
OCO2010	0,914	0,492
Ln(OCO2010)	0,9789	0,9216

Tabela 7.10: Resultados dos testes de normalidade à área ardida e número de ocorrências, de Maio a Setembro de 2010, e respectivos logaritmos naturais.

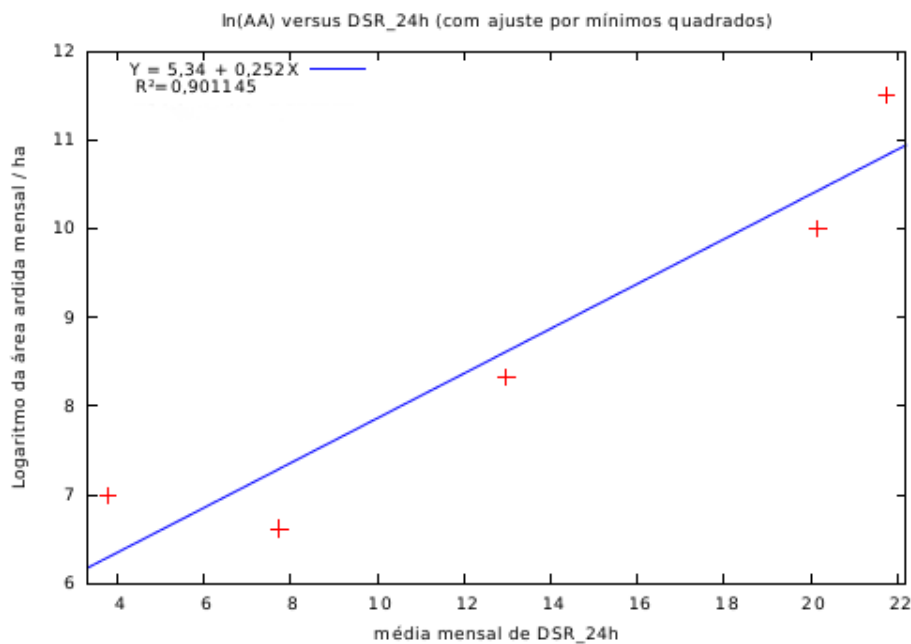


Figura 7.47: Logaritmo da Área Ardida mensal *versus* média mensal de DSR, obtido mediante previsões WRF a 24 horas, para o período de Maio a Setembro de 2010.

anteriores, resultantes da análise mensal à escala nacional, exibindo-se o coeficiente de correlação de Pearson para cada uma das relações estabelecidas. Assim, pode verificar-se a existência de fortes correlações entre os índices do sistema FWI canadiano, obtidos mediante previsão do WRF a 24 e 48 horas, e os dados dos respectivos logaritmos do número ocorrências e área ardida. Comparativamente à análise efectuada para o ano de 2009, destaca-se um maior valor dos coeficientes de correlação obtidos.

A relação entre as condições meteorológicas e a incidência de fogos florestais, tanto no que diz respeito ao número de ocorrências como no que concerne às áreas ardidadas, à escala nacional, pode ser explorada a partir da análise aos gráficos das figuras 7.49 e 7.50, onde se comparam, respectivamente, a área ardida à escala nacional e o número de ocorrências à escala nacional com a distribuição em classes de DSR, determinado a partir das previsões WRF a 24 horas. Tal como no caso de 2009, verifica-se uma tendência de aumento do

7.4 Resultados obtidos e sua discussão

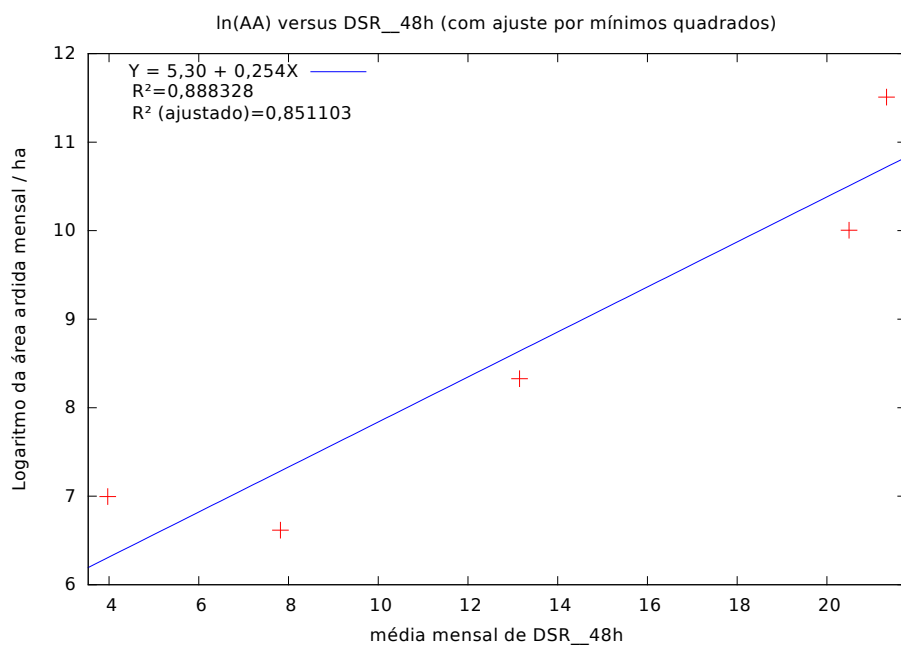


Figura 7.48: Logaritmo da Área Ardida mensal *versus* média mensal de DSR, obtido mediante previsões WRF a 48 horas, para o período de Maio a Setembro de 2010

DSR_24h	DSR_48h	FWI_24h	FWI_48h	AA	I_AA	Ocorrências	I_Ocorrências	
1	0,9994	0,9943	0,9952	0,7468	0,9493	0,9246	0,9878	DSR_24h
	1	0,9941	0,9958	0,7249	0,9425	0,9118	0,9831	DSR_48h
		1	0,9997	0,7108	0,9217	0,902	0,9904	FWI_24h
			1	0,7016	0,9208	0,897	0,9873	FWI_48h
				1	0,874	0,9428	0,7937	AA
					1	0,9763	0,9491	I_AA
						1	0,9473	Ocorrências
							1	I_Ocorrências

Tabela 7.11: Matriz de correlação, para os dados da época de incêndios de 2010.

número de ocorrências e áreas aridas quando o índice de severidade diário ultrapassa o valor de 15.

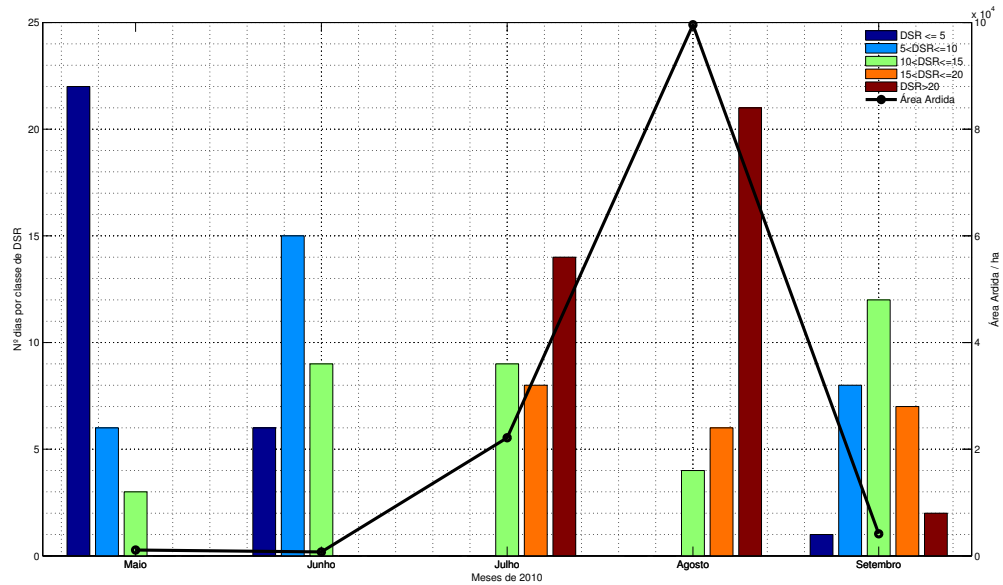


Figura 7.49: Distribuição, por número de dias, das classes de DSR à escala nacional e totais mensais de área arida.

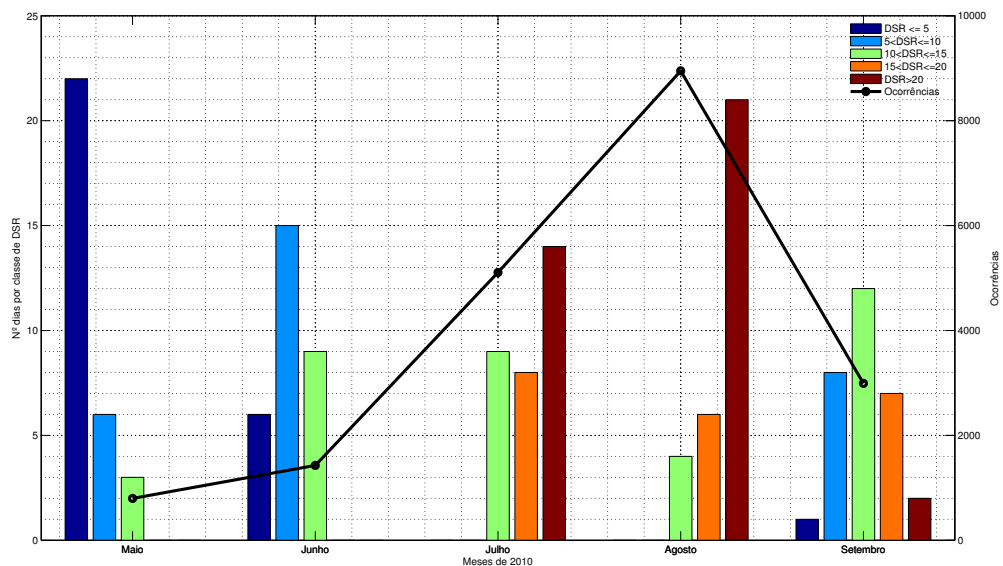


Figura 7.50: Distribuição, por número de dias, das classes de DSR à escala nacional e número total de ocorrências.

No sentido de analisar os resultados apresentados em mais detalhe espacial, exploram-se, de seguida, as possíveis relações existentes à escala distrital.

7.4.2.2 Análise à escala distrital

7.4.2.2.1 Caso da época de incêndios de 2009

A tabela 7.12 condensa a informação relativa à evolução temporal do número de ocorrências de incêndios e área total ardida em cada um dos dezoito distritos de Portugal Continental. Note-se, porém, que o número de ocorrências reportadas difere ligeiramente dos dados apresentados na tabela oficial da AFN para 2009. Dado que os dados foram sujeitos a revisão, crê-se que possa ser esta a justificação para esta pequena discrepância, alheia ao autor do estudo.

Segundo a metodologia empregue na secção anterior, investigou-se a normalidade das distribuições da área ardida mensal e respectivo logaritmo neperiano, bem como do número mensal de ocorrências e respectivo logaritmo neperiano, de acordo com o teste de Shapiro-Wilk, sendo os resultados sistematizados na tabela 7.13.

Por outro lado, a tabela 7.14 representa os valores médios dos índices FWI e DSR, ambos calculados segundo previsões WRF a 24 e a 48 horas, para cada um dos distritos enunciados na tabela 7.12. Note-se, porém, que os resultados são apresentados com aproximação até à quarta casa decimal; no entanto, no decurso dos cálculos efectuados, fez-se uso da plena precisão numérica dos valores apresentados.

Por forma a sistematizar as eventuais relações entre os índices FWI e DSR, calculados, respectivamente, mediante previsões WRF a 24 e a 48 horas, calculou-se, para cada distrito, a matriz de coeficientes de correlação de Pearson para cada uma das variáveis em estudo: FWI_{24h} , FWI_{48h} , DSR_{24h} , DSR_{48h} , ocorrências (OCO), área ardida (aa) e respectivo logaritmo natural, $\ln(aa)$. Os resultados desta análise são sistematizados na tabela 7.15. As mais fortes correlações, considerando simultaneamente os dados de área ardida (ou do seu logaritmo) e o índice DSR e os dados de número de ocorrências (ou do seu logaritmo) e o índice FWI registam-se nos distritos de Braga, Castelo Branco, Coimbra, Guarda, Leiria, Lisboa, Porto, Santarém, Viana do Castelo, Vila Real e Viseu. Infere-se, assim, que, tal como no que acontece à escala nacional, as componentes DSR e FWI, obtidas a partir de previsões WRF, são adequadas para a constituição, em tempo real, de alertas sobre o risco meteorológico de incêndio, à escala distrital.

Distrito	Maio		Junho		Julho		Agosto		Setembro	
	# Oc.	A.A. (ha)	# Oc.	A.A. (ha)	# Oc.	A.A. (ha)	# Oc.	A.A. (ha)	# Oc.	A.A. (ha)
Aveiro	184	200	124	33	196	495	319	57	587	159
Beja	10	5	13	106	14	679	10	77	10	9
Braga	121	106	81	48	142	51	506	2617	1047	4961
Bragança	62	340	19	6	62	79	166	3472	246	1139
Castelo Branco	37	29	40	71	99	127	111	104	77	140
Coimbra	34	9	56	28	60	7	155	73	131	184
Évora	10	1	9	10	11	23	6	3	6	2
Faro	57	15	108	29	146	31	106	1610	66	24
Guarda	56	146	29	45	95	611	233	14354	241	1103
Leiria	42	5	42	4	53	12	104	38	112	55
Lisboa	69	14	103	14	152	48	285	285	315	201
Portalegre	7	1	7	4	8	15	13	2	10	3
Porto	306	348	323	134	520	145	1578	4037	2493	2992
Santarém	52	16	46	10	81	31	106	38	57	34
Setúbal	114	82	98	8	120	170	140	38	96	34
Viana do Castelo	63	177	68	22	107	70	335	375	610	2371
Vila Real	73	31	53	42	95	59	394	2744	892	9940
Viseu	118	193	69	20	192	1157	568	3249	778	2636
TOTAL	1415	1717	1288	635	2153	3811	5135	33173	7774	25989

Tabela 7.12: Ocorrências e Área Árida, por distritos, no período de Maio a Setembro de 2009. Dados de área árida aproximados à unidade. Fonte dos dados: SIGIF/2013 por intermédio da GNR/SEPNA.

7.4 Resultados obtidos e sua discussão

		<i>W</i>	<i>p</i> value			<i>W</i>	<i>p</i> value
Aveiro	aa	0,6041	0,0005135	Leiria	aa	0,8456	0,1811
	ln(aa)	0,9528	0,7629		ln(aa)	0,8904	0,359
	OCO	0,8493	0,1924		OCO	0,7918	0,06933
	ln(OCO)	0,9523	0,7534		ln(OCO)	0,8072	0,09269
Beja	aa	0,6846	0,006565	Lisboa	aa	0,8311	0,1417
	ln(aa)	0,945	0,7011		ln(aa)	0,8648	0,2461
	OCO	0,7528	0,03157		OCO	0,8932	0,3737
	ln(OCO)	0,7464	0,02753		ln(OCO)	0,9291	0,59
Braga	aa	0,7809	0,0561	Portalegre	aa	0,7766	0,05149
	ln(aa)	0,8056	0,08992		ln(aa)	0,9912	0,9838
	OCO	0,8016	0,08346		OCO	0,8539	0,2073
	ln(OCO)	0,9006	0,4134		ln(OCO)	0,8772	0,297
Bragança	aa	0,7798	0,05486	Porto	aa	0,7865	0,06265
	ln(aa)	0,9681	0,863		ln(aa)	0,8312	0,142
	OCO	0,8972	0,3945		OCO	0,8285	0,1356
	ln(OCO)	0,9432	0,6884		ln(OCO)	0,8679	0,2581
Castelo Branco	aa	0,9455	0,7049	Santarém	aa	0,8873	0,347
	ln(aa)	0,8632	0,2398		ln(aa)	0,861	0,232
	OCO	0,8898	0,356		OCO	0,8885	0,3498
	ln(OCO)	0,8624	0,2369		ln(OCO)	0,9237	0,5542
Coimbra	aa	0,8038	0,08703	Setúbal	aa	0,8743	0,2845
	ln(aa)	0,9226	0,547		ln(aa)	0,9596	0,8464
	OCO	0,8777	0,2992		OCO	0,9247	0,5608
	ln(OCO)	0,9209	0,5354		ln(OCO)	0,9318	0,6086
Évora	aa	0,7916	0,06913	Viana do Castelo	aa	0,6714	0,004695
	ln(aa)	0,9078	0,4547		ln(aa)	0,9908	0,9825
	OCO	0,8676	0,2567		OCO	0,8161	0,1089
	ln(OCO)	0,841	0,1676		ln(OCO)	0,8754	0,2888
Faro	aa	0,5608	0,001761	Vila Real	aa	0,7129	0,013
	ln(aa)	0,6936	0,008194		ln(aa)	0,815	0,1069
	OCO	0,9299	0,5955		OCO	0,785	0,06078
	ln(OCO)	0,9255	0,5658		ln(OCO)	0,889	0,3522
Guarda	aa	0,6131	0,000932	Viseu	aa	0,8958	0,3872
	ln(aa)	0,9749	0,9055		ln(aa)	0,8844	0,3299
	OCO	0,8466	0,1839		OCO	0,8658	0,2498
	ln(OCO)	0,914	0,4921		ln(OCO)	0,9359	0,6371

Tabela 7.13: Resultados do teste de Shapiro-Wilk, por distritos, para os dados da época de incêndios de 2009.

7.4 Resultados obtidos e sua discussão

Distrito	ln(aa) vs. DSR24h	ln(aa) vs. DSR48h	aa vs. DSR24h	aa vs. DSR48h	OCO vs. FWI24h	OCO vs. FWI48h	ln(OCO) vs. FWI24h	ln(OCO) vs. FWI48h
Aveiro	0,0161	-0,0538	-0,1346	-0,1610	0,9167	0,8371	0,9168	0,8528
Beja	0,7852	0,7993	0,6440	0,5814	0,3836	0,4227	0,3736	0,4163
Braga	0,8772	0,9148	0,9818	0,9829	0,9887	0,9483	0,9552	0,9627
Bragança	0,5252	0,4304	0,5770	0,5403	0,7140	0,5701	0,6896	0,5586
Castelo Branco	0,8329	0,8379	0,7919	0,7902	0,9684	0,9567	0,9745	0,9606
Coimbra	0,8837	0,6898	0,8869	0,6323	0,9246	0,8547	0,9591	0,9203
Évora	0,4316	0,4295	0,4072	0,3757	-0,3600	-0,4024	-0,4034	-0,4412
Faro	0,5499	0,5961	0,4544	0,4966	0,7992	0,7742	0,8054	0,7959
Guarda	0,8294	0,7823	0,6279	0,6416	0,7997	0,6266	0,7956	0,6514
Leiria	0,9645	0,9326	0,9384	0,8627	0,9094	0,8373	0,9287	0,8664
Lisboa	0,9246	0,8960	0,8364	0,8001	0,8657	0,8342	0,9364	0,9156
Portalegre	0,6593	0,6499	0,5459	0,5286	0,6758	0,6871	0,7015	0,7161
Porto	0,8019	0,8075	0,7657	0,7978	0,9879	0,9669	0,9771	0,9783
Santarém	0,8279	0,8402	0,8907	0,9000	0,7948	0,7574	0,8078	0,7745
Setúbal	0,2506	0,1294	0,2287	0,1467	0,4317	0,4397	0,4047	0,4100
Viana do Castelo	0,8749	0,8422	0,9682	0,8619	0,9969	0,9481	0,9583	0,9892
Vila Real	0,9610	0,9240	0,8446	0,8007	0,8652	0,8210	0,9308	0,8844
Viseu	0,7569	0,8150	0,9112	0,9527	0,9577	0,8113	0,9354	0,8520

Tabela 7.15: Coeficientes de Correlação de Pearson, usando as observações 2009:05 - 2009:09.

7.4.2.2.2 Caso da época de incêndios de 2010

A tabela 7.16 sistematiza a informação de ocorrências de incêndios e respectivas áreas ardidadas, à escala distrital, no período compreendido entre Maio e Setembro de 2010.

Prosseguindo com a mesma estratégia levada a cabo para a época de incêndio de 2009, a tabela 7.17 evidencia o resultado dos testes de normalidade de Shapiro-Wilk às séries de área ardida e número de ocorrências mensais, e respectivos logaritmos neperianos.

Numa linha metodológica idêntica ao que se efectuou para a análise distrital da época de incêndios de 2009, a tabela 7.18 condensa a informação relativa às médias mensais dos índices FWI e DSR, obtidos mediante previsões WRF a 24 e 48 horas, para os distritos de Portugal Continental.

De igual modo à análise efectuada para a época de incêndios de 2009, sistematiza-se a informação resultante da determinação das matrizes de correlação para cada distrito na tabela 7.19, permitindo apreciar, em primeira análise, valores mais elevados do coeficiente de correlação de Pearson, comparativamente aos obtidos para 2009, subentendendo, assim, uma maior intensidade da associação linear entre as variáveis, já evidenciada aquando da análise à escala nacional. De um modo geral, e tendo os resultados da análise dos coeficientes de correlação determinados, pode inferir-se da existência de fortes correlações na maioria dos distritos de Portugal Continental, sendo, todavia, de destacar os distritos de Braga, Bragança, Castelo Branco, Coimbra, Évora, Faro, Guarda, Leiria, Lisboa, Porto, Santarém, Viana do Castelo, Vila Real e Viseu, onde os coeficientes de correlação entre a

Distrito	Maio		Junho		Julho		Agosto		Setembro	
	# Oc.	A.A. (ha)	# Oc.	A.A. (ha)	# Oc.	A.A. (ha)	# Oc.	A.A. (ha)	# Oc.	A.A. (ha)
Aveiro	130	86	207	57	612	4452	1161	3401	230	104
Beja	2	5	18	83	14	64	8	35	6	23
Braga	118	190	128	55	567	3172	961	10217	250	263
Bragança	15	4	22	12	62	243	178	3885	86	242
Castelo Branco	1	0	22	10	87	314	124	845	37	48
Coimbra	29	3	39	3	148	1062	204	341	68	29
Évora	3	2	14	20	26	230	19	176	6	21
Faro	17	2	38	5	100	51	86	17	47	11
Guarda	9	2	14	8	74	1480	200	22096	108	617
Leiria	11	5	13	2	77	50	144	1127	82	25
Lisboa	49	3	113	12	317	196	449	380	292	119
Portalegre	1	1	8	39	19	120	16	51	6	4
Porto	199	71	413	125	1542	2704	2634	5251	796	275
Santarém	23	5	23	3	98	172	105	995	48	13
Setúbal	51	7	103	24	204	2024	180	75	92	125
Viana do Castelo	49	620	122	125	563	3714	943	18608	229	496
Vila Real	42	57	52	82	205	613	614	16472	225	854
Viseu	50	29	79	83	392	1482	924	15609	384	868
TOTAL	799	1092	1428	748	5107	22143	8950	99580	2992	4136

Tabela 7.16: Ocorrências e Área Ardida, por distritos, no período de Maio a Setembro de 2010. Fonte dos dados: SIGIF/2013 por intermédio da GNR/SEPNA.

7.4 Resultados obtidos e sua discussão

		<i>W</i>	<i>p</i> value			<i>W</i>	<i>p</i> value
Aveiro				Leiria			
	aa	0,7571	0,03459		aa	0,5865	0,0004107
	ln(aa)	0,7793	0,05441		ln(aa)	0,9471	0,7165
	OCO	0,8285	0,1355		OCO	0,8977	0,3973
	ln(OCO)	0,9279	0,5818		ln(OCO)	0,843	0,1734
Beja				Lisboa			
	aa	0,9683	0,8643		aa	0,9029	0,4264
	ln(aa)	0,9006	0,413		ln(aa)	0,9083	0,4572
	OCO	0,9674	0,8584		OCO	0,947	0,7155
	ln(OCO)	0,9374	0,6475		ln(OCO)	0,9	0,4102
Braga				Portalegre			
	aa	0,7357	0,0218		aa	0,8812	0,3147
	ln(aa)	0,9309	0,6022		ln(aa)	0,9073	0,4515
	OCO	0,8561	0,2146		OCO	0,9482	0,7241
	ln(OCO)	0,9082	0,4566		ln(OCO)	0,8743	0,2841
Bragança				Porto			
	aa	0,611	0,0008757		aa	0,7952	0,0741
	ln(aa)	0,9382	0,6536		ln(aa)	0,8967	0,3917
	OCO	0,8867	0,341		OCO	0,9113	0,4757
	ln(OCO)	0,9552	0,774		ln(OCO)	0,9823	0,9463
Castelo Branco				Santarém			
	aa	0,7433	0,03338		aa	0,664	0,003866
	ln(aa)	0,9036	0,4491		ln(aa)	0,9071	0,4504
	OCO	0,939	0,6591		OCO	0,8302	0,1396
	ln(OCO)	0,8534	0,2054		ln(OCO)	0,8378	0,159
Coimbra				Setúbal			
	aa	0,7424	0,02526		aa	0,6004	0,0006346
	ln(aa)	0,8854	0,3345		ln(aa)	0,959	0,8007
	OCO	0,8891	0,3527		OCO	0,9265	0,5729
	ln(OCO)	0,9344	0,6269		ln(OCO)	0,9396	0,6628
Évora				Viana do Castelo			
	aa	0,808	0,09398		aa	0,6834	0,006364
	ln(aa)	0,9092	0,4629		ln(aa)	0,9607	0,8127
	OCO	0,9611	0,8156		OCO	0,8935	0,3751
	ln(OCO)	0,9353	0,633		ln(OCO)	0,9764	0,9143
Faro				Vila Real			
	aa	0,8186	0,1139		aa	0,5946	0,0005301
	ln(aa)	0,9937	0,9908		ln(aa)	0,9148	0,4968
	OCO	0,9382	0,6531		OCO	0,8276	0,1335
	ln(OCO)	0,9399	0,6652		ln(OCO)	0,916	0,5043
Guarda				Viseu			
	aa	0,6054	0,007385		aa	0,6307	0,001555
	ln(aa)	0,9429	0,6868		ln(aa)	0,9652	0,8434
	OCO	0,9097	0,466		OCO	0,8713	0,2716
	ln(OCO)	0,9073	0,4513		ln(OCO)	0,9091	0,4625

Tabela 7.17: Resultados do teste de Shapiro-Wilk, por distritos, para os dados da época de incêndios de 2010.

Distrito	Maio			Junho			Julho			Agosto			Setembro		
	FWI_24h	FWI_48h	DSR_24h	FWI_24h	FWI_48h	DSR_24h	FWI_24h	FWI_48h	DSR_24h	FWI_24h	FWI_48h	DSR_24h	FWI_24h	FWI_48h	DSR_24h
Aveiro	9,6805	8,3026	2,2106	12,4484	11,0821	2,8480	27,9239	27,3233	10,7418	10,4894	34,3223	15,1152	23,9701	24,6540	8,1839
Beja	18,7747	19,5085	6,0872	29,8599	30,4167	12,1192	47,3736	47,3906	26,0838	26,0686	43,6767	22,4145	31,7199	31,9397	13,2317
Braga	7,1301	6,6986	1,4181	11,2320	9,9629	2,4612	25,5035	24,6405	9,2376	8,7207	32,0715	13,7325	20,6148	20,2011	6,5677
Bragança	8,3496	8,0935	1,7328	13,4476	14,7305	3,4721	33,2191	34,2236	13,9756	14,5755	40,0702	19,1472	29,9463	26,8785	12,1681
Castelo Branco	11,6713	11,1104	2,8588	23,7565	22,9132	8,5605	44,6524	45,6593	23,2480	24,2619	46,9735	25,2105	35,7102	35,6120	16,3721
Coimbra	10,3026	9,3862	2,5511	15,0024	13,5482	3,9454	34,0026	33,5212	14,9230	14,6985	40,8062	20,2875	29,4810	29,0217	11,6172
Évora	16,8169	17,9664	5,1283	29,4144	29,5537	11,8924	47,3432	48,7526	25,8568	27,4133	47,0754	25,4457	33,3085	33,3348	14,9250
Faro	18,4307	18,4538	5,9435	28,3299	27,3017	11,1934	47,5447	46,4721	26,7277	25,4362	41,7210	20,9903	32,0891	32,3618	13,4628
Guarda	8,8880	9,1446	2,0053	15,7607	16,3386	4,8883	36,8175	37,1395	16,9040	17,0932	43,3781	22,1729	22,3891	33,1623	14,2923
Leiria	12,3748	12,0910	3,4775	16,7696	16,3937	4,6765	35,7949	35,4781	16,6063	16,5369	42,3238	21,8879	31,7069	32,3083	13,1294
Lisboa	17,6897	20,9563	5,8737	27,1322	28,1064	10,3417	43,5062	44,3712	22,8584	23,7550	46,0710	24,9159	34,6259	35,8267	16,5926
Portalegre	14,9949	15,6538	4,2095	28,1876	28,0818	11,1322	47,8172	48,8141	26,2418	27,3289	48,2832	26,5051	34,6789	36,4702	15,1470
Porto	8,4823	7,7139	1,8430	12,2170	10,8523	2,8105	27,3261	26,3568	10,3901	9,7603	34,0431	15,0642	23,0728	23,9804	7,8988
Santarém	17,5497	18,5961	5,7535	28,3718	28,8712	11,2682	50,1236	51,0860	28,6082	29,8022	50,1952	28,4856	36,7517	37,7873	16,8972
Setúbal	19,3151	21,0477	6,5479	30,0752	30,2093	12,1315	46,5135	47,1820	25,4943	26,0310	44,5939	23,3220	32,3821	33,0632	13,5182
Viana do Castelo	6,1306	6,4092	1,1055	9,3511	9,1372	1,8366	21,8088	20,6854	7,1689	6,6234	29,9225	12,3361	11,8574	19,3990	5,9377
Vila Real	5,9089	6,2166	1,0788	10,1692	11,2861	2,1789	25,3832	25,9781	8,9308	9,2509	33,9976	14,6126	25,2003	23,9151	9,0900
Viseu	7,4901	7,7254	1,5576	13,4463	13,1042	3,4469	32,3128	31,5854	13,1115	13,1115	38,9890	18,4887	29,0981	28,8530	11,5898

Tabela 7.18: Médias mensais, por distrito, dos índices FWI e DSR, calculados mediante previsões WRF a 24 e 48 horas, para o período de Maio a Setembro de 2010.

7.4 Resultados obtidos e sua discussão

área ardida (ou o seu logaritmo) e o índice DSR e entre o número de ocorrências (ou o seu logaritmo) assumem, simultaneamente, valores mais altos do coeficiente de correlação.

Distrito	ln(aa) vs. DSR24h	ln(aa) vs. DSR48h	aa vs. DSR24h	aa vs. DSR48h	OCO vs. FWI24h	OCO vs. FWI48h	ln(OCO) vs. FWI24h	ln(OCO) vs. FWI48h
Aveiro	0,8675	0,8457	0,7951	0,7700	0,8736	0,8480	0,9293	0,9067
Beja	0,6489	0,6581	0,4346	0,4377	0,4521	0,4601	0,6585	0,6638
Braga	0,9324	0,9328	0,8971	0,8928	0,9275	0,9257	0,9803	0,9800
Bragança	0,9912	0,9727	0,7379	0,7360	0,8761	0,8498	0,9739	0,9454
Castelo Branco	0,9389	0,9332	0,8008	0,7815	0,9209	0,9185	0,9503	0,9441
Coimbra	0,9086	0,9066	0,5728	0,5669	0,9238	0,9249	0,9749	0,9739
Évora	0,9823	0,9786	0,9398	0,9494	0,8715	0,8917	0,8873	0,8914
Faro	0,9683	0,9708	0,9126	0,8775	0,9903	0,9904	0,9883	0,9894
Guarda	0,9989	0,9897	0,7121	0,7512	0,8945	0,8859	0,9810	0,9548
Leiria	0,9513	0,9337	0,7329	0,6863	0,9611	0,9569	0,9859	0,9910
Lisboa	0,9589	0,9630	0,9269	0,8899	0,9590	0,9491	0,9681	0,9625
Portalegre	0,8126	0,8007	0,7524	0,7579	0,9414	0,9303	0,9391	0,9312
Porto	0,9603	0,9363	0,9184	0,8874	0,9415	0,9204	0,9873	0,9749
Santarém	0,9265	0,8979	0,6787	0,6131	0,9475	0,9403	0,9621	0,9600
Setúbal	0,8371	0,8576	0,6710	0,6888	0,9779	0,9807	0,9885	0,9834
Viana do Castelo	0,8904	0,9124	0,8810	0,9157	0,9347	0,9679	0,9687	0,9693
Vila Real	0,9836	0,9701	0,7758	0,7510	0,8864	0,8677	0,9940	0,9848
Viseu	0,9928	0,9940	0,7488	0,7622	0,9071	0,9141	0,9958	0,9973

Tabela 7.19: Coeficientes de Correlação de Pearson, usando as observações 2010:05 - 2010:09.

Capítulo 8

Conclusões

O oitavo capítulo condensa e resume os assuntos tratados ao longo da dissertação. São apreciados os resultados obtidos, à luz dos objectivos gerais e específicos delineados para o trabalho, reflectindo-se sobre as principais conclusões que emergem do trabalho desenvolvido, bem como sobre as novas questões que se colocam. Posteriormente, discutem-se as potenciais limitações do estudo, procurando, em primeira análise, identificá-las e, paralelamente, reflectir sobre eventuais estratégias para a sua resolução. Na última secção do capítulo tecem-se considerações sobre eventuais percursos futuros de investigação na área, reconhecendo ao mesmo tempo a contribuição deste trabalho para o tema em investigação como um esboço eternamente incompleto, ao invés de obra definitiva e acabada.

8.1 Considerações conclusivas sobre o trabalho efectuado

Ao longo dos anteriores capítulos procurou-se materializar o resultado de uma jornada temporalmente significativa, dedicada à aplicação prática de conceitos, métodos, técnicas e ferramentas intrínsecas das Ciências Exactas e Naturais em geral e da Física e das Ciências da Terra e do Ambiente em particular a um fenómeno recorrente que, maximizado pela acção humana, se reveste de inúmeras implicações nos mais variados planos, entre os quais, o ambiental, o social, o político, o económico, entre tantos outros.

Tal como um qualquer período temporal não consegue ser cristalizado numa fotografia, também o presente documento não torna possível a condensação de todo o percurso construído no decurso da investigação. Reconhece-se, pois, que o presente estudo não substancia uma contribuição definitiva para a resolução do problema dos fogos florestais. Outrossim, analisa-se a implementação de estratégias para a emissão de alertas que podem constituir uma mais-valia para variados sectores da sociedade, promovendo, deste modo,

uma aproximação das aplicações da Ciência e Tecnologia às problemáticas do quotidiano. Necessariamente, irrompem, do trabalho desenvolvido, caminhos conducentes à colocação de novas questões relativas aos fogos florestais, preconizando assim uma visão dinâmica do processo de construção do conhecimento científico.

Nos capítulos iniciais da dissertação procurou-se providenciar uma introdução geral ao assunto em discussão, bem como uma visão tão detalhada quanto possível do referencial teórico inerente ao problema em estudo. Assim, no segundo capítulo contextualizou-se o problema dos incêndios florestais no que concerne aos fenómenos físicos e químicos que ocorrem durante um incêndio. A área em estudo foi devidamente caracterizada, tendo-se incidido sobre uma análise das condições meteorológicas típicas de Portugal Continental. Procedeu-se igualmente ao levantamento das questões relativas à constituição da floresta portuguesa e sua evolução histórica, tendo-se prosseguido com uma análise das ocorrências de fogos florestais no território continental português, no período compreendido entre 1980 e 2010, onde se enfatizou a análise das épocas de incêndio de 2009 e 2010, na medida em que constituíram os dois instantes temporais de maior relevância para este estudo. Teceram-se igualmente algumas considerações sobre as causas dos incêndios em Portugal, tendo-se salientado a forte contribuição humana sobre este fenómeno, na região Mediterrânica e, de modo particular, em Portugal. Descreveu-se sumariamente o conjunto de medidas legislativas implementadas em Portugal relativas à protecção das florestas contra incêndios. Posteriormente, no seguimento do reconhecimento da influência dos parâmetros meteorológicos (precipitação, humidade relativa, temperatura, vento) sobre os incêndios florestais e da clarificação das definições de risco e perigo de incêndio, detalhou-se sobre o sistema FWI canadiano, tendo-se destacado a sua aplicação operacional em Portugal, por parte do IPMA, a partir de observações da rede de Estações Meteorológicas. No terceiro capítulo abordou-se, de forma geral, o problema de previsão numérica de tempo, tendo-se dado ênfase ao modelo WRF, utilizado neste trabalho, tanto no que concerne à sua constituição geral, como no que à constituição e funcionamento do núcleo dinâmico ARW diz respeito. No quarto capítulo abordou-se o contributo da Detecção Remota para o problema dos incêndios florestais, tendo-se procedido a uma breve resenha dos conceitos fundamentais em Detecção Remota, bem como à exposição dos fundamentos físicos, métodos e técnicas inerentes à detecção remota de focos de incêndio. De seguida, fez-se o levantamento dos mais prementes marcos da evolução científica e tecnológica da detecção remota de incêndios florestais.

O capítulo 5 expôs o desenvolvimento, implementação e aplicação de uma ferramenta de visualização de focos de incêndio activos, baseada na tecnologia Google Maps/Google Earth, que faz uso dos dados adquiridos pela estação de recepção EUMETCast da Universidade de Aveiro, nomeadamente, do produto FIR da EUMETSAT. À data do seu desenvolvimento

(2010), a ferramenta constituiu uma forma inovadora de visualização da situação dos fogos activos sobre o campo de visão dos satélites MSG, que funcionou ininterruptamente até 2010. Da base de dados constituída, procedeu-se à validação das detecções de incêndio com o produto FIR, comparativamente às detecções de incêndio resultantes do produto MODIS, tendo-se verificado uma boa adequabilidade do produto FIR para a detecção de incêndios em tempo quase-real sobre Portugal Continental. Os resultados, que dão conta de mais de 40% de eventos de fogo detectados, comparativamente ao produto de detecção de incêndios MODIS, de acordo com a metodologia proposta, situam-se entre os de Tekeli et al. (2009), que efectuaram validação sobre a Turquia, e os de Sifakis et al. (2011), que procederam a validação de detecções FIR para a Grécia. Muito embora a resolução temporal dos dados MSG constitua uma mais-valia para a monitorização de ocorrências de incêndio sob a sua área de visão, deve reconhecer-se que a resolução espacial das imagens pode constituir uma limitação para a detecção de fogos florestais de pequenas dimensões e/ou de fraca potência radiativa.

O capítulo 6 versou sobre a estação de recepção HRPT da Universidade de Aveiro, com particular destaque para o algoritmo de detecção de incêndios desenvolvido para as imagens dos satélites NOAA adquiridas por esta infra-estrutura. Caracterizou-se, pois, a estação, quer em termos do *hardware* que a constitui, quer no que respeita às soluções de *software* adoptadas, com vista à disponibilização operacional e arquivo dos dados HRPT, devidamente calibrados, num formato conveniente à investigação científica. Posteriormente, abordou-se sucintamente a geração da máscara de nuvens enquanto produto auxiliar, requerido pelo algoritmo de detecção de focos de incêndio implementado. O maior destaque, no capítulo em questão, é dado ao algoritmo de detecção de ocorrências de incêndio desenvolvido. Do resultado da sua aplicação a imagens adquiridas em finais do mês de Julho de 2010 e princípios do mês de Agosto do mesmo ano, infere-se da sua concordância espacial com os resultados do produto de detecção de incêndios do MODIS. À luz da estratégia metodológica de validação dos resultados obtidos, destaca-se que o algoritmo proposto identificou correctamente mais de 70% dos eventos de fogo detectados pelo produto MODIS, pese embora sejam de assinalar alguns erros de omissão, na ordem de 30%, bem como algumas falsas detecções, também de cerca de 30%. A análise dos resultados sugere a necessidade de desenvolvimentos adicionais do algoritmo, nomeadamente no que diz respeito aos limiares estabelecidos, no sentido de minimizar as omissões.

No sétimo capítulo dissertou-se sobre a utilização de previsões WRF de alta resolução sobre Portugal Continental e sua posterior utilização para a determinação das componentes do sistema FWI Canadano. Descreveram-se detalhadamente os sistemas de aquisição de dados de inicialização do modelo e da estrutura de cálculo implementada, bem como a configuração do modelo WRF, tanto no que diz respeito à configuração dos domínios de

simulação, como no que toca à parametrização física utilizada e às etapas de inicialização operacional e articulação com o sistema FWI canadiano.

Procedeu-se a uma validação intensiva do modelo ao longo das épocas de incêndio de 2009 e 2010. Os resultados obtidos ilustram uma boa concordância entre os dados simulados e observados, tanto no que às previsões a 24 horas como no que às previsões a 48 horas diz respeito. Os valores das medidas de avaliação do modelo são da mesma ordem das apresentadas em diversos trabalhos, como os de Borge et al. (2008) e Lee et al. (2011), sendo, no geral, consideradas como satisfatórias para os objectivos do trabalho.

Com base nos resultados das previsões obtidas, as componentes do sistema FWI canadiano foram determinadas, tendo-se verificado um impacto positivo do aumento da resolução espacial sobre a determinação dos índices FWI e DSR, que exibem correlações apreciáveis com os dados de ocorrências de incêndios e respectiva área ardida em Portugal para as épocas de incêndio referidas, tanto à escala nacional, como à escala distrital. Assim, pode concluir-se da adequabilidade do modelo WRF para disponibilizar, em tempo real, informação pertinente relativa à indexação do risco meteorológico de incêndio florestal.

Os resultados obtidos, exibem, porém, diferenças significativas no que toca às épocas de incêndio de 2009 e 2010. As diferenças entre os resultados obtidos para a época de 2009 e de 2010 podem dever-se sobretudo às diferentes condições meteorológicas dos dois anos, particularmente no que diz respeito às condições extremas. A Primavera seca de 2009 poderá ter exercido impactos significativos no desenvolvimento da vegetação que, por norma, deve ocorrer sob condições normais de temperatura e precipitação e sujeita a stresse hídrico no final da Primavera, tornando-se assim em combustível disponível. No caso particular de 2009, conforme descrito, e dadas as condições meteorológicas particulares desse ano, poderão não ter existido as condições necessárias, sob o ponto de vista temporal, de desenvolvimento da vegetação, tendo em conta o invulgar número de ocorrências no mês de Março.

Mostrou-se igualmente, em duas situações pontuais (26 e 27 de Julho de 2010), que o acréscimo de detalhe no mapeamento espacial do risco de incêndio se reveste de valor acrescido relativamente aos mapas de risco de incêndio produzidos operacionalmente pelo IPMA, sobretudo no que respeita à planificação de operações de prevenção e combate aos incêndios.

Face ao exposto, e considerando que o trabalho desenvolvido se ergueu desde as suas fundações, pode concluir-se que os objectivos iniciais propostos para o trabalho de investigação foram satisfatoriamente cumpridos.

8.2 Limitações inerentes ao estudo

Assumindo que o presente trabalho possui uma delimitação temporal definida, são reconhecidas algumas limitações que, muito embora não invalidem o estudo, permitem a abertura de fronteiras para posteriores desenvolvimentos.

Assim, no que concerne ao algoritmo desenvolvido para a detecção de incêndios activos com as imagens AVHRR adquiridas, identifica-se a necessidade de um ajuste mais fino aos limiares estabelecidos no algoritmo. Uma das possibilidades consiste, por exemplo, no estabelecimento de limiares dinâmicos, integrando no algoritmo a aplicar sobre uma imagem particular informações sobre imagens de dias anteriores, por exemplo, no que à temperatura de brilho do canal 4 diz respeito. Outra abordagem poderia fazer incluir parâmetros relativos a índices de vigor da vegetação, como o NDVI. Por outro lado, sugere-se que as janelas utilizadas para a determinação dos parâmetros do entorno de um potencial foco de incêndio possam ser aumentadas, de forma a tornar mais representativas as médias e respectivos desvios-padrão determinados. Se, no caso das janelas de 5×5 pixels utilizadas, não foi detectada, nas imagens utilizadas, qualquer influência sobre a média e desvio padrão das temperaturas de brilho do entorno do eventual foco de incêndio por parte da água e das nuvens, esta recomendação impõe que, para janelas maiores, a água e as nuvens devam, forçosamente, ser excluídos do cálculo das variáveis estatísticas. Por manifesta limitação temporal, agravada pela inoperabilidade da estação HRPT da Universidade de Aveiro, não foi possível contemplar estas recomendações na sua totalidade, efectuando nova validação dos resultados, no sentido de avaliar o impacto de uma nova formulação do algoritmo de detecção sobre a eficácia das detecções.

Sob o ponto de vista metodológico, a escolha do produto MODIS como verdade terrestre para validação de ocorrências de incêndio não é isenta de críticas. Se, por um lado, é certo que os registos de ocorrências de incêndios do ICNF padecem de algumas limitações de fiabilidade, é igualmente assinalável que, muito embora o produto MODIS seja internacionalmente reconhecido por muitos organismos (incluindo, por exemplo, a Agência Espacial Europeia), apresenta, naturalmente, erros associados às detecções. Este facto consubstancia a extrema dificuldade do processo de validação de produtos de detecção de incêndios, na medida em que uma base de dados de ocorrências, de absoluta fidelidade, não existe. Não obstante, assume-se que a utilização das detecções MODIS para avaliação do desempenho da detecção de incêndios quer do algoritmo desenvolvido para as imagens AVHRR adquiridas na estação HRPT da UA, quer das detecções de incêndio do produto FIR da EUMETSAT, constitui a melhor verdade terrestre, considerando-se, todavia, aceitáveis algumas das discrepâncias existentes.

8.3 Perspectivas para trabalhos futuros

A partir das questões em aberto emergentes deste trabalho, novos percursos de investigação podem ser traçados, no sentido da continuidade da exploração das temáticas relativas à prevenção e detecção de incêndios em regime operacional, em Portugal.

No sentido de disponibilizar informações sobre as ocorrências de incêndios com recurso a dados de satélite, torna-se premente retomar a operacionalização dos sistemas de recepção de dados de satélite existentes na Universidade de Aveiro, integrando, numa única plataforma de informação tanto os dados do produto FIR da EUMETSAT, como os resultados do modelo de detecção de incêndios desenvolvido para as imagens AVHRR e, eventualmente, do produto de detecção de incêndios baseado no MODIS. Os mais recentes desenvolvimentos em bases de dados geospaciais e, em particular, a linguagem SciQL (Kyzirakos et al., 2014), constituem uma promissora ferramenta a explorar, no sentido da integração de várias fontes de dados numa única plataforma de visualização. Almeja-se assim, apesar dos desafios levantados pela gestão dos elevados volumes de informação e inerente exigência de manutenção de sistemas, para as quais a intervenção humana é crucial, a disponibilização pública de informação, de forma contínua, sobre a situação dos incêndios em Portugal, sobretudo no Verão.

Por outro lado, reconhecendo a importância crítica da parametrização física do modelo de previsão WRF, advoga-se o estabelecimento de um sistema de previsão por *ensembles*, baseado na tipologia de multi-parametrizações, isto é, uma configuração em que cada membro do conjunto de previsões possui diferentes combinações de parametrizações físicas. Naturalmente, a exequibilidade desta proposta deve ser alvo de avaliação cuidadosa, tendo em conta a dependência dos meios de cálculo disponíveis.

A utilização de fontes de dados mais actuais e de mais alta resolução espacial para a obtenção dos campos estáticos utilizados no WRF (topografia, ocupação e uso do solo, vegetação, entre outros), nomeadamente fazendo uso de dados SRTM e Corine Land Cover, a par com a aferição do impacto destas alterações na qualidade das previsões WRF constitui igualmente um desafio a encetar, num futuro muito próximo.

No que concerne ao risco de incêndio, parece pertinente integrar, em conjunto com as condições meteorológicas, outras componentes, nomeadamente factores humanos. Nesse sentido, os trabalhos de Chuvieco et al. (2010) e de Chuvieco et al. (2012) constituem uma base de potencial aplicação em Portugal Continental, que não pode ser descurada.

Por último, impõe-se o início de estudos relativos à modelação do comportamento do fogo, nomeadamente tendo em conta o WRF-Fire (Mandel et al., 2011), que constitui um acoplamento do modelo WRF com um modelo de propagação de fogo (SFIRE), no sentido de possibilitar cenários que possam contribuir positivamente para as operações de combate aos incêndios.

Referências Bibliográficas

- AFN (2010). 5º inventário florestal nacional (2005–2006). Relatório final, MADRP/AFN, Lisboa.
- Ahrens, C. D. (2011). *Essentials of meteorology: an invitation to the atmosphere*. Brooks/Cole, Belmont, CA, 6th edition.
- Alvarez, V., Lorenzo, M., Taboada, J., & Santos-Gonzalez, F. (2012). Tendencias y variabilidad climática para el siglo XXI en Galicia. In *Cambio climático. Extremos e impactos.*, number 8, pages 23–38, Salamanca. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC), 2012, Serie A.
- Amiro, B. D., Logan, K. A., Wotton, B. M., Flannigan, M. D., Todd, J. B., Stocks, B. J., & Martell, D. L. (2004). Fire weather index system components for large fires in the Canadian boreal forest. *International Journal of Wildland Fire*, 13(4):391–400.
- Amraoui, M., DaCamara, C., & Pereira, J. (2010). Detection and monitoring of african vegetation fires using MSG-SEVIRI imagery. *Remote Sensing of Environment*, 114(5):1038–1052.
- Arino, O. & Melinotte, J. M. (1998). The 1993 Africa Fire Map. *International Journal of Remote Sensing*, 19(11):2019–2023.
- Azorin-Molina, C., Baena-Calatrava, R., Echave-Calvo, I., Connell, B. H., Vicente-Serrano, S. M., & López-Moreno, J. I. (2013). A daytime over land algorithm for computing AVHRR convective cloud climatologies for the Iberian Peninsula and the Balearic Islands: Algorithm for computing AVHRR convective cloud climatologies. *International Journal of Climatology*, 33(9):2113–2128.
- Baldrige, A., Hook, S., Grove, C., & Rivera, G. (2009). The ASTER spectral library version 2.0. *Remote Sensing of Environment*, 113(4):711–715.
- Bedia, J., Herrera, S., Camia, A., Moreno, J. M., & Gutiérrez, J. M. (2014). Forest fire danger projections in the Mediterranean using ENSEMBLES regional climate change scenarios. *Climatic Change*, 122(1-2):185–199.

- Benson, R. P., Roads, J. O., & Weise, D. R. (2008). Chapter 2 climatic and weather factors affecting fire occurrence and behavior. In *Developments in Environmental Science*, volume 8, pages 37–59. Elsevier.
- Birot, Y. E. (2009). *Living with wildfires: what science can tell us: a contribution to the science-policy dialogue*. European Forest Institute, Joensuu.
- Borge, R., Alexandrov, V., José del Vas, J., Lumberras, J., & Rodríguez, E. (2008). A comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian Peninsula. *Atmospheric Environment*, 42(37):8560–8574.
- Boschetti, L., Flasse, S. P., & Brivio, P. A. (2004). Analysis of the conflict between omission and commission in low spatial resolution dichotomic thematic products: The Pareto Boundary. *Remote Sensing of Environment*, 91(3-4):280–292.
- Calle, A. & Casanova, J. L. (2012). Forest fires and remote sensing. In Rustamov, R., editor, *Earth Observation*, chapter 8. InTech.
- Calle, A., Casanova, J. L., & Romo, A. (2006). Fire detection and monitoring using MSG Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI) data. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 111(G4):S06.
- Campbell, J. B. (2011). *Introduction to remote sensing*. Guilford Press, New York, 5th edition.
- Cane, D., Ciccarelli, N., Gottero, F., Francesetti, A., Pelfini, F., & Pelosini, R. (2008). Fire weather index application in north-western Italy. *Advances in Science and Research*, 2:77–80.
- Capderou, M. (2005). *Satellites orbits and missions*. Springer, Paris.
- Carvalho, L., Bernardo, S., Orgaz, M., & Yamazaki, Y. (2010). Forest fires mapping and monitoring of current and past forest fire activity from Meteosat Second Generation data. *Environmental Modelling & Software*, 25(12):1909–1914.
- Carvalho, L., Chagas, G., Orgaz, M., Pereira, M., Caramelo, L., & Yamazaki, Y. (2011). Modelling forest fire weather risk in Continental Portugal. *Geophysical Research Abstracts*, 13.
- Carvalho, L. C. (2006). Sistemas de recepção de imagens de satélite: implementação e aplicações. Master's thesis, Universidade de Aveiro.

- Carvalho, L. C. O., Bernardo, S. O., Costa, P. D., Orgaz, M. D. J. M., & Yamasaki, Y. (2008). Validação da temperatura da superfície do mar a partir de medições de satélite. In *Livro de Resumos das XXX Jornadas Científicas da Associação Meteorológica Espanhola*.
- Carvalho, A., Flannigan, M. D., Logan, K., Miranda, A. I., & Borrego, C. (2008). Fire activity in Portugal and its relationship to weather and the Canadian Fire Weather Index System. *Int. J. Wildland Fire*, 17(3):328–338.
- Carvalho, A. C., Carvalho, A., Martins, H., Marques, C., Rocha, A., Borrego, C., Viegas, D., & Miranda, A. (2011). Fire weather risk assessment under climate change using a dynamical downscaling approach. *Environmental Modelling & Software*, 26(9):1123–1133.
- Chagas, G. & Carvalho, L. (2010). Facilitating data access using on-demand data delivery and web repositories. In *2010 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*, volume P.57.
- Chagas, G., Carvalho, L., Correia, P., Santana, F., & Orgaz, M. (2007). Data sharing and cooperation: the usage of IDD in Portugal. In *EMS7/ECAM8 Abstracts*, volume 4, EMS2007-A-00324.
- Chuvieco, E., Aguado, I., Jurdao, S., Pettinari, M. L., Yebra, M., Salas, J., Hantson, S., de la Riva, J., Ibarra, P., Rodrigues, M., Echeverría, M., Azqueta, D., Román, M. V., Bastarrika, A., Martínez, S., Recondo, C., Zapico, E., & Martínez-Vega, F. J. (2012). Integrating geospatial information into fire risk assessment. *International Journal of Wildland Fire*.
- Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martín, M. P., Vilar, L., Martínez, J., Martín, S., Ibarra, P., de la Riva, J., Baeza, J., Rodríguez, F., Molina, J. R., Herrera, M. A., & Zamora, R. (2010). Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Special Issue on Spatial and Temporal Patterns of Wildfires: Models, Theory, and Reality*, 221(1):46–58.
- Chuvieco, E., González, I., Verdú, F., Aguado, I., & Yebra, M. (2009). Prediction of fire occurrence from live fuel moisture content measurements in a Mediterranean ecosystem. *International Journal of Wildland Fire*, 18(4):430.
- Clarke, H. G., Smith, P. L., & Pitman, A. J. (2011). Regional signatures of future fire weather over eastern Australia from global climate models. *International Journal of Wildland Fire*, 20(4):550.

- Congalton, R. & Green, K. (1999). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. CRC Press, Florida.
- Correia, A. V., Baptista, C., Gabriel, C., Pinho, J., Carvalho, M., Colaço, M. C., & Queirós, R. (2009). *Floresta, muito mais que árvores: manual de Educação Ambiental para a Floresta*. ISBN 978-972-8097-74-5.
- Coutinho, J. (2009). *Incêndios florestais: causas e atitudes*. Númena, Porto Salvo.
- Cuomo, V., Lasaponara, R., & Tramutoli, V. (2001). Evaluation of a new satellite-based method for forest fire detection. *International Journal of Remote Sensing*, 22(9):1799–1826.
- Dartcom (2003). *HRPT/CHRPT/SeaWiFS system – Second line maintenance manual*, 6th edition. revision 5.
- Dimitrakopoulos, A. & Papaioannou, K. (2001). Flammability assessment of Mediterranean forest fuels. *Fire Technology*, 37(2):143–152.
- Direcção de Unidade de Defesa da Floresta (2009). Relatório anual de áreas ardidadas e ocorrências em 2009. Technical report, Autoridade Florestal Nacional.
- Direcção de Unidade de Defesa da Floresta (2010). Relatório anual de áreas ardidadas e ocorrências em 2010. Technical report, Autoridade Florestal Nacional.
- Dowdy, A. J., Mills, G. A., Finkle, K., & de Groot, W. (2010). Index sensitivity analysis applied to the Canadian Forest Fire Weather Index and the McArthur Forest Fire Danger Index. *Meteorological Applications*, 17(3):298–312.
- Dozier, J. (1981). A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution. *Remote Sensing of Environment*, 11(0):221 – 229.
- Drysdale, D. (1999). *An introduction to fire dynamics*. Wiley, Chichester; New York.
- Environmental Modeling Center (2003). The GFS atmospheric model. NCEP Office Note 442, National Centers for Environmental Prediction.
- EUFOFINET (2012). European glossary for wildfires and forest fires (1st edition).
- EUMETSAT (2010). Active fire monitoring with MSG. Algorithm Theoretical Basis Document EUM/MET/REP/07/0170 (v2), EUMETSAT.
- European Commission, Joint Research Centre, & Institute for Environment and Sustainability (2010). Forest fires in Europe 2009. Technical Report 10, European Union, Luxembourg: Publications Office of the European Union.

- European Commission, Joint Research Centre, & Institute for Environment and Sustainability (2011). Forest fires in Europe 2010. Technical Report 11, European Union, Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Fearnside, P. M. (2002). Fogo e emissão de gases de efeito estufa dos ecossistemas florestais da Amazônia brasileira. *Estudos Avançados*, 16:99–123.
- Flannigan, M. (1985). Forest fire monitoring using the NOAA satellite series. Msc thesis, Department of Atmospheric Sciences, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Flannigan, M. & Von der Haar, T. (1986). Forest fire monitoring using NOAA satellite AVHRR. *Canadian Journal of Forest Research*, 16:975–982.
- Flannigan, M. D., Krawchuk, M. A., de Groot, W. J., Wotton, B. M., & Gowman, L. M. (2009). Implications of changing climate for global wildland fire. *International Journal of Wildland Fire*, 18(5):483.
- Flasse, S. P. & Ceccato, P. (1996). A contextual algorithm for AVHRR fire detection. *International Journal of Remote Sensing*, 17(2):419–424.
- Foerster, T., Remke, A., & Kaspar, G. (2013). A hybrid approach to disseminate large volume sensor data for monitoring global change. In Krisp, J. M., Meng, L., Pail, R., & Stilla, U., editores, *Earth Observation of Global Changes (EOGC)*, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, pages 165–177. Springer Berlin Heidelberg.
- Font, T. I. (2000). *Climatología de España y Portugal*. 2nd edition.
- Gassó, N., Basnou, C., & Vilà, M. (2010). Predicting plant invaders in the Mediterranean through a weed risk assessment system. *Biological Invasions*, 12(3):463–476.
- Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C. O., & Kaufman, Y. J. (2003). An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 87(2–3):273–282.
- Giglio, L., Kendall, J. D., & Justice, C. O. (1999). Evaluation of global fire detection algorithms using simulated AVHRR infrared data. *International Journal of Remote Sensing*, 20(10):1947–1985.
- Goessmann, F. (2007). Improved spatial resolution of bushfire detection with MODIS. Master's thesis, Curtin University of Technology, Department of Applied Physics.
- Harper, K. (2008). *Weather by the numbers: the genesis of modern meteorology*. Transformations. MIT Press, Cambridge, Mass.

- Hassini (2009). Active fire monitoring with level 1.5 MSG satellite images. *American Journal of Applied Sciences*, 6(1):157–166.
- Hoinka, K. P., Carvalho, A., & Miranda, A. I. (2009). Regional-scale weather patterns and wildland fires in central Portugal. *Int. J. Wildland Fire*, 18(1):36–49.
- Hollemans, P. (2013). *CoastWatch Software Library and Utilities User's Guide*. Terrenus Earth Sciences, Consultant for NOAA/NESDIS.
- Holton, J. R. (2004). *An introduction to dynamic meteorology*. Elsevier Academic Press, Burlington, MA.
- Huang, C., Lin, Y.-L., Kaplan, M. L., & Charney, J. J. (2009). Synoptic-scale and mesoscale environments conducive to forest fires during the October 2003 extreme fire event in southern California. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(3):553–579.
- Ibarra-Castanedo, C. (2005). *Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: depth retrieval with the phase*. PhD thesis, Laval University.
- Inness, P. (2013). *Operational weather forecasting*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- Instituto de Meteorologia (2009). Boletim climatológico anual - ano 2009. Technical report, Instituto Português do Mar e da Atmosfera.
- Instituto de Meteorologia (2010a). Apoio meteorológico na prevenção e combate aos incêndios florestais. Relatório de Época, Instituto de Meteorologia, I. P.
- Instituto de Meteorologia (2010b). Boletim climatológico anual - ano 2010. Technical report, Instituto Português do Mar e da Atmosfera.
- Instituto Nacional de Estatística IP., editor (2010). *Anuário Estatístico de Portugal 2009*. Instituto Nacional de Estatística IP., Lisboa - Portugal.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Jarosinski, J. & Veyssiere, B. (2009). *Combustion phenomena : selected mechanisms of flame formation, propagation, and extinction*. CRC Press, Boca Raton.
- Johnson, E. A. & Miyanishi, K., editores (2001). *Forest fires: behavior and ecological effects*. Academic Press, Inc, San Diego, Calif.

- Jolliffe, I. T. & Stephenson, D. B. (2003). *Forecast verification a practitioner's guide in atmospheric science*. J. Wiley, Chichester, West Sussex, Eng.; Hoboken, N.J.
- Justice, C. O., Kendall, J. D., Dowty, P. R., & Scholes, R. J. (1996). Satellite remote sensing of fires during the SAFARI campaign using NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer data. *Journal of Geophysical Research*, 101(D19):23851–23863.
- Kalnay, E. (2003). *Atmospheric modeling, data assimilation, and predictability*. Cambridge University Press, New York.
- Karali, A., Roussos, A., Giannakopoulos, C., Hatzaki, M., Xanthopoulos, G., & Kaoukis, K. (2013). Evaluation of the Canadian Fire Weather Index in Greece and future climate projections. In Helmis, C. G. & Nastos, P. T., editores, *Advances in Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics*, Springer Atmospheric Sciences, pages 501–508. Springer Berlin Heidelberg.
- Kassomenos, P. (2010). Synoptic circulation control on wild fire occurrence. *Classifications of Atmospheric Circulation Patterns – Theory and Applications*, 35(9–12):544–552.
- Kaufman, Y. J., Justice, C. O., Flynn, L. P., Kendall, J. D., Prins, E. M., Giglio, L., Ward, D. E., Menzel, W. P., & Setzer, A. W. (1998). Potential global fire monitoring from EOS-MODIS. *Journal of Geophysical Research*, 103(D24):32215.
- Kennedy, P., Belward, A., & Gregoire, J. (1994). An improved approach to fire monitoring in West Africa using AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 15(11):2235–2255.
- Khorram, S., Koch, F. H., van der Wiele, C., & Nelson, S. A. C. (2012). *Remote sensing*. SpringerBriefs in space development. Springer, New York.
- Kilpeläinen, A., Kellomäki, S., Strandman, H., & Venäläinen, A. (2010). Climate change impacts on forest fire potential in boreal conditions in Finland. *Climatic Change*, 103(3–4):383–398.
- Koltunov, A., Ustin, S. L., & Prins, E. M. (2012). On timeliness and accuracy of wildfire detection by the GOES WF-ABBA algorithm over California during the 2006 fire season. *Remote Sensing of Environment*, 127(0):194 – 209.
- Krawchuk, M. A., Moritz, M. A., Parisien, M.-A., Van Dorn, J., & Hayhoe, K. (2009). Global pyrogeography: the current and future distribution of wildfire. *PLoS ONE*, 4(4):e5102.

- Kriebel, K. T., Gesell, G., Kästner, M., & Mannstein, H. (2003). The cloud analysis tool APOLLO: Improvements and validations. *International Journal of Remote Sensing*, 24(12):2389–2408.
- Kyzirakos, K., Karpathiotakis, M., Garbis, G., Nikolaou, C., Bereta, K., Papoutsis, I., Herekakis, T., Michail, D., Koubarakis, M., & Kontoes, C. (2014). Wildfire monitoring using satellite images, ontologies and linked geospatial data. *Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web*, 24:18–26.
- Laneve, G., Castronuovo, M., & Cadau, E. (2006). Continuous monitoring of forest fires in the Mediterranean area using MSG. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(10):2761–2768.
- Langaas, S. & Muirhead, K. (1989). Monitoring bushfires in West Africa by weather satellites. In *Proceedings of the 22nd International Symposium on Remote Sensing of Environment*, pages 253–268, Abidjan, Cote d'Ivoire.
- Lasaponara, R., Cuomo, V., Macchiato, M. F., & Simoniello, T. (2003). A self-adaptive algorithm based on AVHRR multitemporal data analysis for small active fire detection. *International Journal of Remote Sensing*, 24(8):1723–1749.
- Lasaponara, R., Cuomo, V., & Tramutoli, V. (1998). Fire detection by AVHRR: toward a new approach for operational monitoring. In Engman, E. T., editor, *Proc. SPIE 3499, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology*, 348, pages 348–358.
- Lawson, B. D., Armitage, O. B., & Northern Forestry Centre (Canada) (2008). *Weather guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System*. Northern Forestry Centre, Edmonton.
- Lee, S.-H., Kim, S.-W., Angevine, W., Bianco, L., McKeen, S., Senff, C., Trainer, M., Tucker, S., & Zamora, R. (2011). Evaluation of urban surface parameterizations in the WRF model using measurements during the Texas Air Quality Study 2006 field campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(5):2127–2143.
- Lee, T. F. & Tag, P. M. (1990). Improved detection of hotspots using the AVHRR 3.7-um channel. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 71(12):1722–1730.
- Leone, V., Koutsias, N., Martínez, J., Vega-García, C., Allgöwer, B., & Lovreglio, R. (2003). The human factor in fire danger assessment. *Wildland fire danger estimation and mapping. The role of remote sensing data*. World Scientific Publishing, Singapore, pages 143–196.

- Li, Z., Nadon, S., & Cihlar, J. (2000). Satellite-based detection of Canadian boreal forest fires: Development and application of the algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 21(16):3057–3069.
- Liberman, M. A. (2008). *Introduction to physics and chemistry of combustion explosion, flame, detonation*. Springer, Berlin.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2008). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
- Liodakis, S., Bakirtzis, D., & Dimitrakopoulos, A. (2002). Ignition characteristics of forest species in relation to thermal analysis data. *Thermochimica Acta*, 390(1–2):83–91.
- Littell, J., Oneil, E., McKenzie, D., Hicke, J., Lutz, J., Norheim, R., & Elsner, M. (2010). Forest ecosystems, disturbance, and climatic change in Washington State, USA. *Climatic Change*, 102(1-2):129–158.
- Liu, Y., Stanturf, J., & Goodrick, S. (2010). Trends in global wildfire potential in a changing climate. *Adaptation of Forests and Forest Management to Changing Climate Selected papers from the conference on “Adaptation of Forests and Forest Management to Changing Climate with Emphasis on Forest Health: A Review of Science, Policies and Practices”, Umeå, Sweden, August 25-28, 2008.*, 259(4):685–697.
- Lourenço, L., Fernandes, S., Bento-Gonçalves, A., Castro, A., Nunes, A., & Vieira, A. (2012). Causas de incêndios florestais em Portugal continental. análise estatística da investigação efetuada no último quinquénio (1996 a 2010). *Cadernos de Geografia*, (30/31):61–80.
- Lynch, P. (2006). *The emergence of numerical weather prediction: Richardson's dream*. Cambridge University Press, Cambridge, UK ; New York.
- Maini, A. K. & Agrawal, V. (2011). *Satellite technology principles and applications*. Wiley, Chichester, West Sussex, U.K.; Hoboken, N.J.
- Mandel, J., Beezley, J. D., & Kochanski, A. K. (2011). Coupled atmosphere-wildland fire modeling with WRF-Fire version 3.3. *Geoscientific Model Development Discussions*, 4(1):497–545.
- Manso, M. D. & Esteves, M. A. (2002). Variación de la temperatura anual sobre Portugal. *Rev. Int. Información Tecnológica*, 13(6):55–60.

- Matsapey, N., Faucheu, J., Flury, M., & Delafosse, D. (2013). Design of a gonio-spectrophotometer for optical characterization of gonio-apparent materials. *Measurement Science and Technology*, 24(6):065901.
- Matson, M. & Dozier, J. (1981). Identification of subresolution high temperature sources using a thermal IR sensor. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 47(9):1311–1318.
- Matson, M. & Holben, B. (1987). Satellite detection of tropical burning in Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 8(3):509–516.
- Matson, M., Schneider, S., Aldridge, B., & Satchwell, B. (1984). Fire detection using the NOAA-series satellites. NOAA Technical Report NESDIS 7, NOAA.
- Matson, M., Stephens, G., & Robinson, J. (1987). Fire detection using data from the NOAA-N satellites. *International Journal of Remote Sensing*, 8(7):961–970.
- Mesoscale & Microscale Meteorology Division (2010). *User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 3.1*. National Center for Atmospheric Research.
- Mestre, A. & Manta, M. I. (2014). A fire weather index as a basis for an early warning system in Spain. *Int. J. Wildland Fire*, (23):510–519.
- Mitchell, R. J., Simonson, W., Flegg, L. A., Santos, P., & Hall, J. (2009). A comparison of the resilience of four habitats to fire, and the implications of changes in community composition for conservation: a case study from the serra de monchique, portugal. *Plant Ecology & Diversity*, 2(1):45–56.
- Mölders, N. (2008). Suitability of the Weather Research and Forecasting (WRF) model to predict the june 2005 fire weather for Interior Alaska. *Weather and Forecasting*, 23(5):953–973.
- Moreira, F. (2012). *Post-fire management and restoration of Southern European forests*. Springer, Dordrecht; New York.
- Muirhead, K. & Cracknell, A. (1984). Identification of gas flares in the North Sea using satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 5(1):199–212.
- Neary, D. G., Ryan, K. C., & DeBano, L. F. (2005). Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42 vol. 4, Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ogden, UT.

- Nolasco, M. I. M. (2003). *Estudio de la estructura y funcionamiento de dos índices de peligro meteorológico de incendios forestales. Aplicación a tres zonas climáticas de España peninsular*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Madrid.
- Palmer, J. M. (2010). *The art of radiometry*. SPIE Press, Bellingham, Wash.
- Pausas, J. G. & Keeley, J. E. (2009). A burning story: The role of fire in the history of life. *BioScience*, 59(7):593–601.
- Pechony, O. & Shindell, D. T. (2010). Driving forces of global wildfires over the past millennium and the forthcoming century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(45):19167–19170.
- Peixoto, J. P. (1972). A problemática da água decénio hidrológico internacional. *Fomento*, 10(2, 2º Trimestre, n.º 17):187–201.
- Peixoto, J. P. (1978). A problemática da água no decénio hidrológico internacional. *C.D.U.*, 556.5(17 Notas):9–23.
- Pendergast, S. & Pendergast, T., editores (2002). *Worldmark encyclopedia of national economies*. Gale Group/Thomson Learning, Detroit.
- Pereira, H. M., Domingos, T., Vicente, L., & Proença, V. (2009). *Ecosistemas e bem-estar humano: avaliação para Portugal do Millennium Ecosystem Assessment*. Escolar, Lisboa.
- Pereira, M., Calado, T., DaCamara, C., & Calheiros, T. (2013). Effects of regional climate change on rural fires in Portugal. *Climate Research*, 57(3):187–200.
- Pereira, M. G., Malamud, B. D., Trigo, R. M., & Alves, P. I. (2011). The history and characteristics of the 1980–2005 Portuguese rural fire database. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(12):3343–3358.
- Pereira, M. G., Trigo, R. M., da Camara, C. C., Pereira, J. M., & Leite, S. M. (2005). Synoptic patterns associated with large summer forest fires in Portugal. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129(1–2):11–25.
- Persson, A. (2005a). Early operational Numerical Weather Prediction outside the USA: an historical introduction: Part II: Twenty countries around the world. *Meteorological Applications*, 12(3):269–289.
- Persson, A. (2005b). Early operational Numerical Weather Prediction outside the USA: an historical introduction part III: Endurance and mathematics - british NWP, 1948–1965. *Meteorological Applications*, 12(04):381–413.

- PNDFCI (2005). Relatório intercalar – plano nacional defesa da floresta contra incêndios. Technical report, Instituto Superior de Agronomia.
- Podur, J. & Wotton, M. (2010). Will climate change overwhelm fire management capacity? *Ecological Modelling*, 221(9):1301–1309.
- Prins, E. M. & Menzel, W. P. (1992). Geostationary satellite detection of bio mass burning in South America. *International Journal of Remote Sensing*, 13(15):2783–2799.
- Prior, V. M. M. S. (2006). *Estrutura termodinâmica da baixa troposfera associada ao regime de Brisas em Portugal*. PhD thesis, Universidade de Aveiro.
- Pyne, S. J. (1996). *Introduction to wildland fire*. Wiley, New York.
- Radich, M. C. & Alves, A. A. M. (2000). *Dois séculos da floresta em Portugal*. CELPA, Lisboa.
- Radich, M. C. & Baptista, F. O. (2005). Floresta e Sociedade: Um Percurso (1875–2005). *Silva Lusitana*, 13:143 – 157.
- Rasilla, D. F., García-Codron, J. C., Carracedo, V., & Diego, C. (2010). Circulation patterns, wildfire risk and wildfire occurrence at continental Spain. *Classifications of Atmospheric Circulation Patterns – Theory and Applications*, 35(9–12):553–560.
- Ravail, N. & San-Miguel-Ayanz, J. (2002). Evaluation of the performance of the world fire web contextual fire detection algorithm over Spain for the years 1997–98. Eur report, European Union, Office for Official Publications of the European Communities, L-2985, Luxemburg.
- Roberts, G. & Wooster, M. (2008). Fire detection and fire characterization over Africa using Meteosat SEVIRI. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 46(4):1200–1218.
- Saha, K. (2008). *The Earth's atmosphere: its physics and dynamics*. Springer, Berlin; London.
- Santos, F. D., Forbes, K., & Moita, R. (2002). *Climate change in Portugal: scenarios, impacts and adaptation measures : SIAM Project*. Gradiva, Lisboa, Portugal.
- Saunders, R. W. & Kriebel, K. T. (1988). An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 9(1):123–150.

- Schaepman-Strub, G., Schaepman, M., Painter, T., Dangel, S., & Martonchik, J. (2006). Reflectance quantities in optical remote sensing - definitions and case studies. *Remote Sensing of Environment*, 103(1):27–42.
- Setzer, A. & Pereira, M. (1991). Amazonia biomass burnings in 1987 and an estimate of their tropospheric emissions. *Ambio*, 20(1):19–22.
- Shapiro, S. S. & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3-4):591–611.
- Sifakis, N. I., Iossifidis, C., Kontoes, C., & Keramitsoglou, I. (2011). Wildfire detection and tracking over Greece using MSG–SEVIRI Satellite data. *Remote Sensing*, 3(12):524–538.
- Skamarock, W. C. & Klemp, J. B. (2008). A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *Predicting weather, climate and extreme events*, 227(7):3465–3485.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X. Y., Wang, W., & Powers, J. G. (2008). A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Technical Note NCAR/TN–475+STR, Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research.
- Statheropoulos, M. & Karma, S. (2007). Complexity and origin of the smoke components as measured near the flame-front of a real forest fire incident: A case study. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 78(2):430–437.
- Stefanidou, M., Athanaselis, S., & Spiliopoulou, C. (2008). Health impacts of fire smoke inhalation. *Inhalation Toxicology*, 20(8):761–766.
- Storch, H. v. & Zwiers, F. W. (1999). *Statistical analysis in climate research*. Cambridge University Press, Cambridge; New York.
- Tekeli, A. E., Sönmez, İ., Erdi, E., & Demir, F. (2009). Validation studies of EUMETSAT's active fire monitoring product over Turkey. *Int. J. Wildland Fire*, 18(5):517–526.
- Tian, X., McRae, D. J., Jin, J., Shu, L., Zhao, F., & Wang, M. (2011). Wildfires and the Canadian Forest Fire Weather Index system for the Daxing'anling region of China. *International Journal of Wildland Fire*, 20(8):963–973.
- Trigo, R. M., Pereira, J. M. C., Pereira, M. G., Mota, B., Calado, T. J., Dacamara, C. C., & Santo, F. E. (2006). Atmospheric conditions associated with the exceptional fire season of 2003 in Portugal. *International Journal of Climatology*, 26(13):1741–1757.

- van Wagner, C. E. (1987). Development and structure of the Canadian forest fire weather index system. Forestry Technical Report 35, Canadian Forest Service.
- van Wagner, C. E. & Pickett, T. L. (1987). Equations and FORTRAN program for the Canadian forest fire weather index system. Forestry Technical Report 33, Canadian Forestry Service.
- Viegas, D. & Viegas, M. (1994). A relationship between rainfall and burned area for Portugal. *Int. J. Wildland Fire*, 4(1):11–16.
- Viegas, D., Viegas, M., & Ferreira, A. (1992). Moisture content of fine forest fuels and fire occurrence in central Portugal. *Int. J. Wildland Fire*, 2(2):69–86.
- Viegas, D. X. (1997). Forest fire origin, behaviour and evolution. In P. Balabanis, G. Efthichidis, R. F., editor, *Proceedings of the European School of Climatology and Natural Hazards course*, Luxembourg. European Commission, Office for Official Publications of the European Communities.
- Viegas, D. X., Bovio, G., Ferreira, A., Nosenzo, A., & Sol, B. (1999). Comparative study of various methods of fire danger evaluation in southern Europe. *Int. J. Wildland Fire*, 9(4):235–246.
- Viegas, D. X., Reis, R. M., Cruz, M. G., & Viegas, M. T. (2004). Calibração do Sistema Canadano de Perigo de Incêndio para aplicação em Portugal. *Silva Lusitana*, 12:77 – 93.
- Weaver, J. F., Purdom, J. F. W., & Schneider, T. L. (1995). Observing forest fires with the GOES-8, 3.9- μm imaging channel. *Wea. Forecasting*, 10(4):803–808.
- Wotton, B. M. (2008). Interpreting and using outputs from the Canadian Forest Fire Danger Rating System in research applications. *Environmental and Ecological Statistics*, 16(2):107–131.
- Wotton, B. M., Gould, J. S., McCaw, W. L., Cheney, N. P., & Taylor, S. W. (2012). Flame temperature and residence time of fires in dry eucalypt forest. *International Journal of Wildland Fire*, 21(3):270–281.

Apêndice A

Código-fonte do modelo FWI para observações pontuais

```
C PROGRAM NO.: F-32
C
C STANDARD 1984 VERSION OF CANADIAN FOREST FIRE WEATHER INDEX SYSTEM
C AS OF 30 AUGUST 1984.
C
C WRITTEN IN FORTRAN 77 FOR DEC-PDP-11/44 AT PNFI
C
C READS WEATHER DATA IN EITHER ENGLISH OR METRIC UNITS AND PRINTS
C OUT IN METRIC ONLY.
C
C CODES AND INDEXES OUTPUT ALL TO ONE DECIMAL PLACE.
C DAILY SEVERITY RATING OUTPUT TO TWO DECIMAL PLACES.
C
C LMON = LENGTH OF MONTHS
C EL = DMC DAY LENGTH FACTORS
C FL = DC DAY LENGTH FACTORS
C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C Alteracoes efectuadas: o programa nao faz mais perguntas sobre a C
C natureza dos dados, nem tao pouco pede ficheiro de entrada dos C
C dados (assume teste.dat como entrada). De forma analoga, tambem C
C nao pede se deseja alterar o valor pre-definido dos indices FFMC, C
C DMC, e DC. C
C C
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC

DIMENSION LMON(12), EL(12), FL(12),AST(2),TITLE(20)
LOGICAL*1 DAT(9),YES,YES1,ANS,ANS1
C LOGICAL *1 INFMT(40)
C TYPE 5
C 5 FORMAT(' INPUT FILENAME: eg: SAMPLE.DAT ', $)
C ACCEPT 10, INFMT
```

```

10 FORMAT(40A1)
C   INFMT(40)=0
   OPEN(UNIT=1, file='teste.dat', TYPE='OLD', READONLY)
   OPEN(UNIT=2, STATUS='unknown', NAME='OUTPUT.DAT')
   DATA LMON /31,28,31,30,31,30,31,31,30,31,30,31/
   DATA EL /6.5,7.5,9.0,12.8,13.9,13.9,12.4,10.9,9.4,8.0,7.0,
*6.0/
   DATA FL /-1.6,-1.6,-1.6,.9,3.8,5.8,6.4,5.0,2.4,.4,-1.6,-1.6/
   DATA AST /' ','*' /
   DATA ANS /'Y' /
C   TYPE 15
C 15 FORMAT(//1X, 'ENTER VIA KEYBOARD EITHER 0 OR 1 ' /1X' .....0
C   * IF DATA IS IN METRIC UNITS'/1X' OR 1 IF DATA IS IN
C   * ENGLISH UNITS')
C   READ(5,*) IUNIT
   IUNIT=0
C
C   20 - METRIC FORMAT, 25 - ENGLISH FORMAT.
C
20 FORMAT(F4.1,2I4,F5.1)
25 FORMAT(F4.0,2I4,F5.2)
C
C   READS IN STATION & YEAR.
C
   READ(1,30) TITLE
30 FORMAT(20A4)
C
C   THIS SECTION ALLOWS FOR INITIAL VALUES OF FFMC, DMC, DC
C   TO BE OPTIONAL.
C
   FO=85.0
   PO=6.0
   DOT=15.0
C   TYPE 35
C 35 FORMAT(' FFMC=85.0, DMC=6.0, DC=15.0; DO YOU WISH TO USE THESE
C   * INITIAL STANDARD VALUES? [Y/N] '$)
C   ACCEPT 10, ANS1
   GO TO 55
   TYPE 40
40 FORMAT(' FFMC (F4.1): ', $)
   ACCEPT 20, FO
   TYPE 45
45 FORMAT(' DMC (F4.1): '$)
   ACCEPT 20, PO
50 FORMAT(' DC (F4.1): ', $)
   ACCEPT 20, DOT
C
C   READS STARTING MONTH OF THE YEAR AND NUMBER OF DAYS IN STARTING
C   MONTH.
C
55 READ(1,60) M, NDAYS
60 FORMAT(I1, I2)
   WRITE(2,65)
65 FORMAT(1H1 'PROGRAM NO.: F-32')
   CALL DATE(DAT)
   WRITE(2,70) DAT, TITLE
70 FORMAT(1X,9A1///1X,20A4//)

```

```

WRITE(2,75) FO,PO,DOT
75 FORMAT(' INITIAL VALUES FOR FFMC: ',F5.1,' ', DMC: ',F5.1',' ', DC: ',F5.1',
*//)
DO 290 J=M,12
NN=LMON(J)
IF(J.EQ.M) GO TO 80
IDAYS=1
GO TO 85
80 IDAYS=LMON(J)-NDAYS+1
C
C READS DAILY WEATHER DATA
C
85 IAST=1
DO 290 I=IDAYS,NN
IF(IUNIT.EQ.0) GO TO 90
READ(1,25,END=305) T,IH,IW,R
W=IW
GO TO 95
90 READ(1,20,END=305) T,IH,IW,R
W=IW
95 IF(IUNIT.EQ.0) GO TO 100
T=(T-32.)*5./9.
W=W*1.609
R=R*25.4
100 TX=T
H=IH
RAIN=R
IF(IAST.GT.1) GO TO 110
WRITE(2,105)
105 FORMAT(///,1X,' DATE TEMP RH WIND RAIN FFMC DMC DC
* ISI BUI FWI DSR'/)
C
C FINE FUEL MOISTURE CODE
C
110 WMO=(147.2*(101-FO))/(59.5+FO)
IF(R.GT.0.5) GO TO 115
GO TO 125
115 RA=R-.5
IF(WMO.GT.150.) GO TO 120
WMO=WMO+42.5*RA*EXP(-100./(251.-WMO))*(1.-EXP(-6.93/RA))
GO TO 125
120 WMO=(WMO+42.5*RA*EXP(-100./251.-WMO))*(1.-EXP(-6.93/RA))+
*(0.0015*(WMO-150.))**2)*RA**5
125 IF(WMO.GT.250.) WMO=250.
ED=0.942*(H**0.679)+(11.*EXP((H-100.)/10.))+0.18*(21.1-T)
** (1.-1./EXP(0.115*H))
IF(WMO-ED) 130,135,140
130 EW=.618*(H**0.753)+(10.*EXP((H-100.)/10.))+.18*(21.1-T)
** (1.-1./EXP(0.115*H))
IF(WMO.LT.EW) GO TO 145
135 WM=WMO
GO TO 150
140 Z=.424*(1.-(H/100.))**1.7+(0.0694*(W**0.5))*(1.-(H/100.))**8
X=Z*(0.581*(EXP(0.0365*T)))
WM=ED+(WMO-ED)/10.**X
GO TO 150
145 Z=.424*(1.-((100.-H)/100.))**1.7+(.0694*(W**0.5))*(1.-((100.-H)

```

```

*/100.))**8)
X=Z*(0.581*(EXP(.0365*T)))
WM=EW-(EW-WMO)/10.**X
150 FFM=(59.5*(250.-WM))/(147.2+WM)
    IF (FFM.GT.101.) GO TO 155
    IF (FFM) 160,165,165
155 FFM=101.
    GO TO 165
160 FFM=0.0
C
C    DUFF MOISTURE CODE
C
165 IF (T+1.1.GE.0.) GO TO 170
    T=-1.1
170 RK=1.894*(T+1.1)*(100.-H)*(EL(J)*0.0001)
175 IF (R.GT.1.5) GO TO 180
    PR=PO
    GO TO 205
180 RA=R
    RW=0.92*RA-1.27
    WMI=20.0+280./EXP(0.023*PO)
    IF (PO.LE.33.) GO TO 185
    IF (PO-65.) 190,190,195
185 B=100./(0.5+0.3*PO)
    GO TO 200
190 B=14.-1.3*ALOG(PO)
    GO TO 200
195 B=6.2*ALOG(PO)-17.2
200 WMR=WMI+(1000.*RW)/(48.77+B*RW)
    PR=43.43*(5.6348-ALOG(WMR-20.))
205 IF (PR.GE.0.) GO TO 210
    PR=0.0
210 DMC=PR+RK
C
C    DROUGHT CODE
C
    IF (T+2.8.GE.0) GO TO 215
    T=-2.8
215 PE=(.36*(T+2.8)+FL(J))/2.
    IF (R.LE.2.8) GO TO 225
    RA=R
    RW=0.83*RA-1.27
    SMI=800.*EXP(-DOT/400.)
    DR=DOT-400.*ALOG(1.+((3.937*RW)/SMI))
    IF (DR.GT.0.) GO TO 220
    DR=0.0
220 DC=DR+PE
    GO TO 230
225 DR=DOT
    GO TO 220
230 IF (DC.GE.0.) GO TO 235
    DC=0.0
C
C    INITIAL SPREAD INDEX, BUILDUP INDEX, FIRE WEATHER INDEX
C
235 FM=(147.2*(101.-FFM))/(59.5+FFM)
    SF=19.115*EXP(FM*(-.1386))*(1.+(FM**5.31)/4.93E07)

```

```
SI=SF*EXP(0.05039*W)
240 IF(DMC.EQ.0.0.AND.DC.EQ.0.0) GO TO 245
BUI=(0.8*DC*DMC)/(DMC+0.4*DC)
GO TO 250
245 BUI=0.
250 IF(BUI.GE.DMC) GO TO 255
P=(DMC-BUI)/DMC
CC=0.92+(0.0114*DMC)**1.7
BUI=DMC-(CC*P)
IF(BUI.LT.0.) BUI=0.
255 IF(BUI.GT.80.) GO TO 260
BB=0.1*SI*(0.626*BUI**0.809+2.)
GO TO 265
260 BB=0.1*SI*(1000./(25.+108.64/EXP(0.023*BUI)))
265 IF(BB-1.0.LE.0.) GO TO 270
SL=2.72*(0.434*ALOG(BB))**0.647
FWI=EXP(SL)
GO TO 275
270 FWI=BB
275 DSR=0.0272*FWI**1.77
280 WRITE(2,285) J,I,TX,IH,IW,RAIN,FFM,DMC,DC,SI,BUI,FWI,DSR
285 FORMAT(1X,2I3,F6.1,I4,I6,F7.1,F7.1,F6.1,F7.1,3F6.1,F8.2)
FO=FFM
PO=DMC
DOT=DC
IAST=IAST+1
290 CONTINUE
C 295 WRITE(5,300)
C 300 FORMAT(/1X'OUTPUT IN F32OUT.DAT AND MUST BE SPOOLED
C * TO THE LINE PRINTER.'//)
305 STOP
END
```

Apêndice B

Código-fonte do modelo FWI estendido para uma matriz de dados

```

      P R O G R A M      CFFWI
C-----
C PROGRAM NO.: F-32
C
C STANDARD 1984 VERSION OF CANADIAN FOREST FIRE WEATHER INDEX SYSTEM
C AS OF 30 AUGUST 1984.
C
C READS WEATHER DATA IN METRIC UNITS AND PRINTS OUT IN METRIC.
C
C CODES AND INDEXES OUTPUT ALL TO ONE DECIMAL PLACE.
C DAILY SEVERITY RATING OUTPUT TO TWO DECIMAL PLACES.
C
C LMON = LENGTH OF MONTHS
C EL = DMC DAY LENGTH FACTORS
C FL = DC DAY LENGTH FACTORS
C
C-----
C VERSAO 2008_01 - LUIS/UA
C INCLUSAO DE FUNCOES - PROCESSAMENTO PARA MATRIZ ( I , J ) DE DADOS
C
C
C*****
C   DIMENSAO DA MATRIZ PARA ARMAZENAMENTO DOS RESULTADOS
C
C
C   PARAMETER ( MX=110, MY = 200 )
C
C-----
C   DEFINICAO PARA ARMAZENAMENTO DOS RESULTADOS EM MATRIZES
C   DE ( MX ,MY ) ELEMENTOS PARA AS VARIAVEIS:
C
C   DIMENSION FFMY(MX,MY) ,DMCY(MX,MY) ,DCY(MX,MY) ,SIY (MX,MY) ,
*   BUIY (MX,MY) ,FWIY (MX,MY) ,DSRY (MX,MY)
C   DIMENSION TYY(MX,MY) ,HYY(MX,MY) ,WYY(MX,MY) ,RYY (MX,MY)

```

C DEFINICAO APENAS PARA ARMAZENAMENTO LOCAL E
C PROCESSAMENTO SEQUENCIAL (PROXIMA DATA)

DIMENSION FOY(MX,MY) ,POY(MX,MY) ,DOTY(MX,MY)

C CHARACTER*80 TITLE
DIMENSION LMON(12) , EL(12) , FL(12) ,AST(2)
CHARACTER*24 DAT

C DADOS FIXOS

DATA LMON /31,28,31,30,31,30,31,31,30,31,30,31/
DATA EL /6.5,7.5,9.,12.8,13.9,13.9,12.4,10.9,9.4,8.0,7.0,6./
DATA FL /-1.6,-1.6,-1.6,.9,3.8,5.8,6.4,5.0,2.4,.4,-1.6,-1.6/

C 0.0 - VALORES INICIAIS DADOS
C ESSES VALORES SAO OS MESMOS PARA TODOS OS PONTOS DA MALHA
C (MX,MY) NO INICIO
C
C FO=85.0
C PO=6.0
C DOT=15.0

C DEFINICAO PARA PROCESSAMENTO (PARA DATAS) POSTERIORES
C INICIALMENTE SAO IGUAIS PARA TODOS OS PONTOS DA MALHA (MX,MY)

DO 5 MXX=1,MX
DO 5 MYY=1,MY
FOY(MXX,MY) = FO
POY(MXX,MY) = PO
DOTY(MXX,MY)= DOT

5 CONTINUE

C 1. 0 - ABERTURA DE ARQUIVOS DE ENTRADA / SAIDA
C
C APENAS DADOS : LINHA 1 : TITLE - LINHA 2 : M, NDAYS

C ARQUIVO # 1

OPEN(1 ,FILE='teste.dat' , STATUS ='OLD')

C ARQUIVO # 2

C DADOS DOS PONTOS DE GRELHA NO FORMATO :
C F6.1 ,F6.1 ,F6.1 ,F6.1 ; OU SEJA 3F6.1
C PARA OUTRO FORMATO ALTERAR -> [20 FORMAT(4F6.1)]

OPEN(30 ,FILE='arquin.dat' , STATUS='UNKNOWN')

C ARQUIVO # 3

```

C
C   ARQUIVO DE SAIDA DOS DADOS
C
C   OPEN(32 ,FILE='arqout.dat' , STATUS ='UNKNOWN')
C
C-----
C 2. 0 – LEITURA DE DADOS – TITULO , DATA E ESTACAO
C
C-----
C   ***** I.D.
C
C   READ(1,30) TITLE
C-----
C   ***** MES E NDIAS DE PROCESSAMENTO
C
C   READ(1,60) M, NDAYS
C
C   CLOSE(1)
C
C-----
C   ***** DATA ATUAL (RELOGIO DO COMPUTADOR)
C   CALL DATE(DAT)
C
C   DATA DO PROCESSAMENTO ATUAL
C
C   PRINT*, ' PROCESSANDO – AGUARDE ! ' , DAT
C
C
C-----
C   ***** GRAVACAO – TITULO , I.D. DATA
C
C   WRITE(6,65)
C   WRITE(6,70) DAT,TITLE
C   WRITE(6,75) FO,PO,DOT
C
C-----
C*****
C-----
C 3.0 INICIO DO PROCESSAMENTO
C
C=====
C LOOP PARA O MES "M" ATE 12 OU ANTES, NAO TIVER MAIS DADOS
C=====
C
C DO 290 J=M,12
C
C   NUMERO DE DIAS DO MES LIDO
C   NN=LMON(J)
C
C   IF (J.EQ.M) GO TO 80
C   IDAYS=1
C   GO TO 85
C 80 IDAYS=LMON(J)-NDAYS+1
C
C-----
C 3.1 – READS DAILY WEATHER DATA
C

```



```
C
85   IAST=1
C   WRITE(32,105)

C   LOOP PARA TODOS OS DIAS
C   =====

      DO 290 I=IDAYS,NN

      PRINT*, ' PROCESSANDO J, I : ', J, I

C-----

      90 CONTINUE
c+++++
C   arquin.dat
c
C CADA LOOP DE "DO" VAI LER UMA LINHA (ATE A ULTIMA LINHA, NO TOTAL DE
C I=MX LINHAS) SENDO QUE EM CADA LINHA HA MY VALORES DE UMA VARIAVEL
C
C   LEITURA DA TEMPERATURA

      READ(30,*,END=305) ((TYY(MXX,MY), MXX=1,MX),MYY=1,MY)

C.....
C   LEITURA DA HUMIDADE

      READ(30,*,END=305) ((HYY(MXX,MY), MXX=1,MX),MYY=1,MY)

C.....
C   LEITURA DO VENTO

      READ(30,*,END=305) ((WYY(MXX,MY), MXX=1,MX),MYY=1,MY)

C.....
C   LEITURA DA PRECIPITACAO

      READ(30,*,END=305) ((RYY(MXX,MY), MXX=1,MX),MYY=1,MY)

C-----
C PROCESSAMENTO PARA TODOS OS PONTOS DA GRELHA DA MATRIZ LIDA
C-----

      DO 888 MXX = 1, MX
      DO 888 MY = 1, MY
      T =TYY(MXX,MY)
      H = HYY(MXX,MY)
      W = WYY(MXX,MY)
      R = RYY(MXX,MY)

C
C EL , FL   --> VALORES DEPENDENTES DO MES
C FO, PO, DOT --> APENAS INICIALMENTE CONSTANTES
C           PARA PROCESSAMENTO APOS O PRIMEIRO DIA -- CADA PONTO
C           DA MALHA DEVE USAR O VALOR DO PROCESSAMENTO ANTERIOR
```

C (I . E . DA **DATA** ANTERIOR)

C

FO = FOY(MXX,MY)
PO = POY(MXX,MY)
DOT = DOTY(MXX,MY)

C

C

FFM = FPMC(FO, R, H, T, W)
ELJ = EL(J)
DMC = DMCC(T, H, ELJ, R, PO)
FLJ = FL(J)
DC = DCC(T, FLJ, R, DOT)
SI = SIC(FFM, W)
BUI = BUIC(DMC, DC)
BB = BBC(BUI, SI)
FWI = FWIC(BB)
DSR = DSRC(FWI)

C ARMAZENAMENTO PARA GRAVACAO

FFMY(MXX,MY) = FFM
DMCY(MXX,MY) = DMC
DCY(MXX,MY) = DC
SIY(MXX,MY) = SI
BUIY(MXX,MY) = BUI
FWIY(MXX,MY) = FWI
DSRY(MXX,MY) = DSR

C ARMAZENAR PARA PROCESSAMENTO POSTERIOR (PROXIMA **DATA**)

C

FOY(MXX,MY) = FFM
POY(MXX,MY) = DMC
DOTY(MXX,MY) = DC

888 **CONTINUE**

C

C NESSE PONTO O PROCESSAMENTO FOI FEITO PARA TODA A MATRIZ

C --> PARA UMA **DATA** I, J

C

C

C

C

C

GRAVACAO DOS DADOS PROCESSADOS

c eliminado

IH = IFIX(H)

c eliminado

IW = IFIX(W)

c eliminado

WRITE(2,285) J, I, T, IH, IW, R, FFM, DMC, DC, SI, BUI, FWI, DSR

C GRAVANDO ARQUIVO OS DADOS PROCESSADOS PARA A **DATA** (J, I)

C **WRITE**(32,2854) J, I

WRITE(32,2855)((TYY(MXX,MY), MXX=1,MY), MYY=1,MY)

WRITE(32,2855)((HYY(MXX,MY), MXX=1,MY), MYY=1,MY)

WRITE(32,2855)((WYY(MXX,MY), MXX=1,MY), MYY=1,MY)

WRITE(32,2855)((RYY(MXX,MY), MXX=1,MY), MYY=1,MY)

WRITE(32,2855)((FFMY(MXX,MY), MXX=1,MY), MYY=1,MY)

```

WRITE(32,2855)((DMCY(MXX,MY), MXX=1,MX), MYY=1,MY)
WRITE(32,2855)((DCY(MXX,MY), MXX=1,MX), MYY=1,MY)
WRITE(32,2855)((SIY(MXX,MY), MXX=1,MX), MYY=1,MY)
WRITE(32,2855)((BUIY(MXX,MY), MXX=1,MX), MYY=1,MY)
WRITE(32,2855)((FWIY(MXX,MY), MXX=1,MX), MYY=1,MY)
WRITE(32,2855)((DSRY(MXX,MY), MXX=1,MX), MYY=1,MY)
C-----
c      redefinido apenas para o cabeçalho da escrita
c
      IAST=IAST+1

290 CONTINUE

C
C-----
C              FORMATOS
C              =====
C
10  FORMAT(40A1)
20  FORMAT(F4.1,2I4,F5.1)
30  FORMAT(A80)
60  FORMAT(2I2)
65  FORMAT(' PROGRAMA :F-32')
70  FORMAT(1X,'DATA PROCESSAMENTO: ',A24,/,/,1x,A80//)
75  FORMAT(' VALORES INICIAIS - FFMC: ',F5.1,' ',DMC: ',F5.1,
* ', DC: ',F5.1)

105 FORMAT(1X,' DATE TEMP RH WIND RAIN FFMC DMC',
* ' DC, ISI BUI FWI DSR')
285 FORMAT(1X,2I3,F6.1,I4,I6,F7.1,F7.1,F6.1,F7.1,3F6.1,F8.2)
2854 FORMAT(2I3)
2855 FORMAT(90000F8.2)

C
C-----
305 CONTINUE

C      PRINT*, ' Final de leitura dos dados e processamento '
C      STOP
C      END

C+++++
C
C      F U N C O E S
C
C+++++
C=====
C*****
C      FUNCTION  FFMC(FO,R,H,T,W)

C FINE FUEL MOISTURE CODE
C-----

      WMO=(147.2*(101-FO))/(59.5+FO)
      IF(R.GT.0.5) GO TO 115
      GO TO 125
115 RA=R-.5

```

```

      IF (WMO.GT.150.) GO TO 120
      WMO=WMO+42.5*RA*EXP(-100./(251.-WMO))*(1.-EXP(-6.93/RA))
      GO TO 125
120 WMO=(WMO+42.5*RA*EXP(-100./251.-WMO))*(1.-EXP(-6.93/RA))+
      *(0.0015*(WMO-150.)**2)*RA**5
125 IF (WMO.GT.250.) WMO=250.
      ED=0.942*(H**0.679)+(11.*EXP((H-100.)/10.))+0.18*(21.1-T)
      *(1.-1./EXP(0.115*H))
      IF (WMO-ED) 130,135,140
130 EW=.618*(H**0.753)+(10.*EXP((H-100.)/10.))+.18*(21.1-T)
      *(1.-1./EXP(0.115*H))
      IF (WMO.LT.EW) GO TO 145
135 WM=WMO
      GO TO 150
140 Z=.424*(1.-(H/100.))**1.7+(0.0694*(W**0.5))*(1.-(H/100.))**8
      X=Z*(0.581*(EXP(0.0365*T)))
      WM=ED+(WMO-ED)/10.**X
      GO TO 150
145 Z=.424*(1.-((100.-H)/100.))**1.7+(.0694*(W**5))*(1.-((100.-H)
      */100.))**8
      X=Z*(0.581*(EXP(.0365*T)))
      WM=EW-(EW-WMO)/10.**X
150 FFM=(59.5*(250.-WM))/(147.2+WM)
      IF (FFM.GT.101.) GO TO 155
      IF (FFM) 160,165,165
155 FFM=101.
      GO TO 165
160 FFM=0.0
165 CONTINUE
      FFM = FFM
      RETURN
      END

```

C*****
FUNCTION DMCC(T,H,ELJ,R,PO)

C DUFF MOISTURE CODE

```

      IF (T+1.1.GE.0.) GO TO 170
      T=-1.1
170 RK=1.894*(T+1.1)*(100.-H)*(ELJ*0.0001)
175 IF (R.GT.1.5) GO TO 180
      PR=PO
      GO TO 205
180 RA=R
      RW=0.92*RA-1.27
      WMI=20.0+280./EXP(0.023*PO)
      IF (PO.LE.33.) GO TO 185
      IF (PO-65.) 190,190,195
185 B=100./(0.5+0.3*PO)
      GO TO 200
190 B=14.-1.3*ALOG(PO)
      GO TO 200
195 B=6.2*ALOG(PO)-17.2
200 WMR=WMI+(1000.*RW)/(48.77+B*RW)
      PR=43.43*(5.6348-ALOG(WMR-20.))

```

```

205 IF (PR.GE.0.) GO TO 210
    PR=0.0
210 DMC=PR+RK
C
    DMCC = DMC
C SAIDA COM DMCC
C
    RETURN
    END

=====
C*****
    FUNCTION DCC (T,FLJ,R,DOT)

C DROUGHT CODE
C-----
    IF (T+2.8.GE.0) GO TO 215
    T=-2.8
215 PE=(.36*(T+2.8)+FLJ)/2.
    IF (R.LE.2.8) GO TO 225
    RA=R
    RW=0.83*RA-1.27
    SMI=800.*EXP(-DOT/400.)
    DR=DOT-400.*ALOG(1.+((3.937*RW)/SMI))
    IF (DR.GT.0.) GO TO 220
    DR=0.0
220 DC=DR+PE
    GO TO 230
225 DR=DOT
    GO TO 220
230 IF (DC.GE.0.) GO TO 235
    DC=0.0
235 CONTINUE
    DC = DCC
    RETURN
    END

=====
C-----
C*****
    FUNCTION SIC (FFM,W)

C
C OTENCAO DE SI
C-----
    FM=(147.2*(101.-FFM))/(59.5+FFM)
    SF=19.115*EXP(FM*(-.1386))*(1.+(FM**5.31)/4.93E07)
    SI=SF*EXP(0.05039*W)
    SIC = SI
    RETURN
    END

=====
C*****
    FUNCTION BUIC (DMC,DC)

C
C OBTENCAO DE BUI
C-----
    IF (DMC.EQ.0.0.AND.DC.EQ.0.0) GO TO 245
    BUI=(0.8*DC*DMC)/(DMC+0.4*DC)

```

```

      GO TO 250
245 CONTINUE
      BUI=0.
250 CONTINUE
      IF (BUI.GE.DMC) GO TO 255
      P=(DMC-BUI)/DMC
      CC=0.92+(0.0114*DMC)**1.7
      BUI=DMC-(CC*P)
      IF (BUI.LT.0.) BUI=0.
255 CONTINUE
      BUIC = BUI
      RETURN
      END
C=====
C*****
      FUNCTION BBC (BUI, SI)
C
C      OBTENCAO DE BB
C=====
      IF (BUI.GT.80.) GO TO 260
      BB=0.1*SI*(0.626*BUI**0.809+2.)
      GO TO 265
260 CONTINUE
      BB=0.1*SI*(1000./(25.+108.64/EXP(0.023*BUI)))
265 CONTINUE
      BBC = BB
      RETURN
      END
C=====
C*****
      FUNCTION FWIC (BB)
C
C      OBTENCAO DE FWI
C=====
      IF (BB-1.0.LE.0.) GO TO 270
      SL=2.72*(0.434*ALOG(BB))**0.647
      FWI=EXP(SL)
      GO TO 275
270 CONTINUE
      FWI=BB
275 CONTINUE
      FWIC = FWI
      RETURN
      END
C=====
C*****
      FUNCTION DSRC (FWI)
C
C      OBTENCAO DE DSR
C=====
      DSR=0.0272*FWI**1.77
280 CONTINUE
      DSRC = DSR
      RETURN
      END
C*****

```

Apêndice C

Código-fonte da máscara de nuvens utilizada

```
%%      CLOUD MASK FROM AVHRR DATA IN HDF FORMAT!!!
%
%      Inspired by the poster "A NEW APOLLO DAYTIME OVER LAND
%      ALGORITHM FOR COMPUTING CONVECTIVE CLOUD COMPOSITES OVER THE IBERIAN
%      PENINSULA AND BALEARIC ISLANDS", from C. Azorin-Molina, B.H. Connel
%      and R. Baena-Calatrava, presented at the 7th ECACS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Input arguments: ch1, ch2, ch5 and landmask from the avhrr hdf file

function cloudmask=cloudmask(ch1,ch2,ch5,landmask)

%% AVHRR DATA GIVEN AS INPUT
avhrr_ch1=ch1;
avhrr_ch2=ch2;
avhrr_ch5=ch5;
%% LANDSEA MASK GIVEN AS INPUT
land=landmask;

%%INFORMATIONS
%% The solar channels 1 (0.58-0.68 um) and 2 (0.72-1.10 um) were calibrated
%% to reflectance (in %) and the thermal IR spectrum 4 (10.30-11.30 um)
%% and 5 (11.50-12.50 um) to brightness temperature (in K). Since channel 3b
%% (3.55-3.93 um) from NOAA-16 satellite is always on (no 3a switching)
%% it was calibrated to brightness temperature (in K).
%% NOAA-17 satellite switches channels at the terminator such
%% that 3a (1.58-1.64 um) is on during daylight and 3b is on during night.
%% Therefore, channel 3a from NOAA-17 was calibrated to reflectance (in %).

%%TEST 1 - SNOW-ICE DETECTION
%%Snow-ice can be discriminated from cloud using visible and short wave infrared
%%channels. For the NOAA-17, a quota ratio (Q) is defined as the ratio of
%%reflectance of 1.6 um divided by the reflectance of 0.6 um. Since snow is
```

```

%considerably less reflective at 1.6 um, values of Q <=0.2 designate a snow-ice
%pixel. We used a threshold brightness temperature difference (BTD, of <=15 K
%between 3.7 um and 11 um for detecting snow-ice pixels for NOAA-16.
%
%
%NOTE TO SELF: since i don't have ch3a, i'll skip the snow-ice detection
%part!

% BTD=avhrr_ch3-avhrr_ch4;
%
% teste1=~(BTD<=15);

%TEST 2. IR GROSS THRESHOLD TEST at 12 um
%A unique threshold of <=290 K was used to select cloudy pixels representing all
%cloud types for both satellite data. Sea breeze fronts develop under high
%insolation and therefore land surface temperatures during the day (LST) are
%>290 K even during the cooler months. This is a simple threshold technique.

teste2=avhrr_ch5 <=290;

%TEST 3. ALBEDO or VISIBLE at 0.6 um
%A fixed threshold reflectance of >=20% was chosen to select cloudy pixels.

teste3=avhrr_ch1 >=20;

%TEST 4. Q RATIO NIR/VIS
%A Q threshold from 0.7 to 1.3 was found for grouping together cloudy pixels. A
%supplementary threshold test was added to reject barren pixels from cloudy ones.
%We tagged as cloudy pixels with a Q ratio between 0.7-1.3 and T12 <=290 K.
Q=avhrr_ch2./avhrr_ch1;

teste4=((Q>=0.7 & Q<=1.3) & avhrr_ch5 <=290);

%%The algorithm identifies a pixel as cloudy if at least two tests (Test 2,
%%3 or 4) prove positive. Note that we're mapping clouds over land!

cloudmask=((teste2 & (teste3 | teste4 )));
cloudmask=double(cloudmask);
cloudmask(land==0)=NaN;

%%TO GET THE CLOUD EDGES WE FILTER THE IMAGE WITH AN AVERAGE FILTER (optional)
%
% h=fspecial('average',5)
% cloudmask=imfilter(cloud,h,'same');

```


Apêndice D

Código-fonte do modelo de detecção de incêndios baseado em dados AVHRR

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%% FIRE DETECTION PROGRAM, FROM AVHRR DATA IN HDF FORMAT           %%  
%% VERSION 3.0 – LUIS CARVALHEIRO, UNIVERSITY OF AVEIRO, FEB 2010   %%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%% updated on april 2014 to include navigation corrections          %%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
  
%% FOR TIME BENCHAMRKING :-)  
tic ;  
addpath ('/media/luis/DATA/export_fig');  
addpath ('/home/luis/matlab_toolbox/worlddatamap/');  
%%CLEAN UP WORKSPACE  
clc ;  
close all ;  
clear all ;  
  
DATADIR='/media/luis/DATA/avhrr_2010/';  
files = dir (fullfile (DATADIR, '*n19_map_proj.hdf')) ;  
  
%% GET FILE  
myFile='/home/luis/avhrr_files/noaa-19/2010_219_1323_n19_map_proj.hdf';  
  
%%IF FILE EXISTS AND NO ERRORS OCCUR, MOVE ON  
if exist(myFile, 'file')  
disp (char(myFile))  
  
else  
disp ('File error ... quitting');  
return ;  
end
```

```

%% GET VARIABLES FROM FILE

%% Get ATTRIBUTES!
props=hdfinfo(myFile);

%% Get satellite name
satellite=props.Attributes(1,1).Value
%% Is this a daytime or nighttime pass?
daynight=props.Attributes(1,6).Value;
%% A typical original filename - 20100726_1347.raw
a=strfind(props.Attributes(1,4).Value, '.raw');
%% so, to find the pass date we just have to find the first .raw
%% occurrence and go back 13 positions!
datetime=props.Attributes(1,4).Value(a(1)-13:a(1)-1);
year=str2num(datetime(1:4));
month=str2num(datetime(5:6));
day=str2num(datetime(7:8));
hour=str2num(datetime(10:11));
minute=str2num(datetime(12:13));
date=datetime([year, month, day, hour, minute, 00]);

%%GET NAV_AFFINE ATTRIBUTE FOR NAVIGATION CORRECTION
nav_affine=props.SDS(1,1).Attributes(1,12).Value;

%% LATITUDE & LONGITUDE - DOUBLED
latitude = double(hdfread(myFile, '/latitude'));
longitude = double(hdfread(myFile, '/longitude'));

%% AVHRR DATA - DOUBLED & SCALED
avhrr_ch1 = double(hdfread(myFile, '/avhrr_ch1')*0.01);
avhrr_ch2 = double(hdfread(myFile, '/avhrr_ch2')*0.01);
avhrr_ch3 = double(hdfread(myFile, '/avhrr_ch3')*0.01 +273.15);
avhrr_ch4 = double(hdfread(myFile, '/avhrr_ch4')*0.01 + 273.15);
avhrr_ch5 = double(hdfread(myFile, '/avhrr_ch5')*0.01 + 273.15);

%% LANDSEA MASK - IT SHOULD EXIST A LANDMASK CREATED WITH THE COASTWATCH
%% UTILITIES, BUT IF NOT... CREATE IT!
%%
%% THE CREATION OF THE LANDMASK IS ACCOMPLISHED WITH
%status=unix(['/home/luis/cwf_3.3.0_54/bin/cwgraphics -V land -l ...
%      1 -c 0 -g 0 -V land -l 1 -c 0 -g 0 ' myFile'],'-echo');

land = hdfread(myFile, '/land');

%% THE NAVIGATION CORRECTION PART. WE ARE SIMPLY SHIFTING AVHRR CHANNELS DATA!
% Create arrays of NaN values, with the same size as avhrr_ch1

[rows, cols]=size(avhrr_ch1);
avhrr_ch1_new = ones(size(avhrr_ch1)).*NaN;
avhrr_ch2_new = ones(size(avhrr_ch2)).*NaN;
avhrr_ch3_new = ones(size(avhrr_ch3)).*NaN;
avhrr_ch4_new = ones(size(avhrr_ch4)).*NaN;
avhrr_ch5_new = ones(size(avhrr_ch5)).*NaN;

for i = 1:rows
    for j = 1:cols

```

```
actual_row = i + round(nav_affine(5));
actual_col = j + round(nav_affine(6));
if (actual_row >= 1 & actual_row <= rows & actual_col >= 1 & actual_col <= cols)
    avhrr_ch1_new(i, j) = avhrr_ch1(actual_row, actual_col);
    avhrr_ch2_new(i, j) = avhrr_ch2(actual_row, actual_col);
    avhrr_ch3_new(i, j) = avhrr_ch3(actual_row, actual_col);
    avhrr_ch4_new(i, j) = avhrr_ch4(actual_row, actual_col);
    avhrr_ch5_new(i, j) = avhrr_ch5(actual_row, actual_col);
end
end
end
avhrr_ch1_correct = avhrr_ch1_new;
avhrr_ch2_correct = avhrr_ch2_new;
avhrr_ch3_correct = avhrr_ch3_new;
avhrr_ch4_correct = avhrr_ch4_new;
avhrr_ch5_correct = avhrr_ch5_new;

%% THE CLOUDMASK!!!!
clouds=cloudmask(avhrr_ch1_correct, avhrr_ch2_correct, avhrr_ch5_correct, land);

%% FIRE DETECTION TESTS
%% %% ZEROTH TEST: ABSOLUTE THRESHOLDING TEST
firetest0=(avhrr_ch3_correct>=max((max(max(avhrr_ch3_correct))),335));

%% FIRST TEST - ABSOLUTE THRESHOLDING TEST
firetest1=(avhrr_ch3_correct >= 315) & (avhrr_ch4_correct >=300);
%% SECOND TEST - t3-t4 test
t34=avhrr_ch3_correct-avhrr_ch4_correct;
firetest2=(t34>10);

%% THIRD TEST - BACKGROUND TEMPERATURE TEST
% The convolution kernel
%% It is set to 5x5
h=fspecial('average',5);

%% filter the image to estimate channel 3 background temperature
windowmean_ch3=imfilter(avhrr_ch3_correct,h,'conv');
windowmean_ch4=imfilter(avhrr_ch4_correct,h,'conv');
windowmean_t34=imfilter(t34,h,'conv');

%% by filtering the edges become invalid, so let's get rid of them
invalid=(windowmean_ch3<min(min(avhrr_ch3_correct)));
invalid([1:4,size(invalid,1)-3:size(invalid,1)],:)=1;
invalid(:,[1:4,size(invalid,2)-3:size(invalid,2)])=1;
windowmean_ch3(invalid)=NaN;
windowmean_ch4(invalid)=NaN;
windowmean_t34(invalid)=NaN;
%% The standard deviation of ch3 and ch4 over a 5x5 window

windowstdDev_ch3=stdfilt(avhrr_ch3_correct,ones(5));
windowstdDev_ch4=stdfilt(avhrr_ch4_correct,ones(5));
windowstdDev_t34=stdfilt(t34,ones(5));
%% STATISTICAL TEST over ch3
firetest3=(avhrr_ch3_correct>windowmean_ch3+3.0*windowstdDev_ch3);

%% SAME AS TEST 3, BUT FOR CH4
firetest4=(avhrr_ch4_correct>windowmean_ch4+3.0*windowstdDev_ch4);
```

```

%% t34 contextual test
firetest5=(t34>windowmean_t34+3.0*windowstdDev_t34);

%% LOGICAL COMBINATION OF TESTS
fire=(firetest0 | ((firetest1 & firetest2) & (firetest3 & firetest5))) & (land==1) ...
    & (clouds==0);

%% Finding fire pixel location
[fireplacex , fireplacey]=find( fire );

if isempty( fireplacex ) | isempty( fireplacey )
    continue
end

%% For the creation of a text report.
reportname=([ 'report_' , num2str( year ) , num2str( month ) , num2str( day ) , ...
    num2str( hour ) , num2str( minute ) , '.csv ' ]);
fprintf( 'Number of fire pixels detected:%i\n' , size( fireplacex ,1) )
fid=fopen( reportname , 'w' )
fprintf( fid , '%s\n' , myFile )
for j=1:size( fireplacex ,1)
    fprintf( 'Fire pixels Location (lat/lon):%6.6f,%6.6f\n' , ...
        latitude( fireplacex( j ) , fireplacey( j ) ) , ...
        longitude( fireplacex( j ) , fireplacey( j ) ) )

    fprintf( fid , '%6.6f,%6.6f\n' , latitude( fireplacex( j ) , fireplacey( j ) ) , ...
        longitude( fireplacex( j ) , fireplacey( j ) ) )

A(j,1)= latitude( fireplacex( j ) , fireplacey( j ) );
A(j,2)= longitude( fireplacex( j ) , fireplacey( j ) );
end
status=fclose( fid );

%% displaying a map and a pretty RGB composite
if strcmp( daynight , 'night ' )
    disp( 'Night scene ' )
    r=mat2gray( avhrr_ch3_correct );
    g=mat2gray( avhrr_ch4_correct );
    b=mat2gray( avhrr_ch5_correct );
else
    disp( 'Day scene ' )
    r=mat2gray( ( avhrr_ch1_correct ) , [ min( min( avhrr_ch1_correct ) ) ...
        max( max( avhrr_ch1_correct ) ) ] );
    g=mat2gray( ( avhrr_ch2_correct ) , [ min( min( avhrr_ch2_correct ) ) ...
        max( max( avhrr_ch2_correct ) ) ] );
    b=mat2gray( ( avhrr_ch4_correct ) , [ max( max( avhrr_ch4_correct ) ) ...
        min( min( avhrr_ch4_correct ) ) ] );
end

r2=imadjust( r , stretchlim( r ) , [0 1] );
g2=imadjust( g , stretchlim( g ) , [0 1] );
b2=imadjust( b , stretchlim( b ) , [0 1] );
rgb=cat( 3 , r2 , g2 , b2 );

```

```
%% GET THE FIRE POINTS PAINTED IN RED
for i=1:length(fireplacex)
    rgb(fireplacex(i),fireplacey(i),1)=1;
    rgb(fireplacex(i),fireplacey(i),2)=0;
    rgb(fireplacex(i),fireplacey(i),3)=0;
end

%% The figure
figure(f)
axesm('mercator')
set(gcf,'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
worldatmap({'/media/luis/DATA/distritos-WGS84.shp','regions'},...
[ min(min(latitude)) max(max(latitude))],[ min(min(longitude)) max(max(longitude))])
pcolorm(latitude,longitude,rgb);

for z=1:size(A,1)
    geoshow(A(z,1),A(z,2),'DisplayType','Point','Marker','o',...
'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',8)
end

% stringie=sprintf(['Number of fire pixels detected:',num2str(size(fireplacex,1)),...
%'\n','Fire Pixels Location (lat/lon)','\n']);

title(['Fire Detection results',10,datestr(date),10,'Satellite:',...
satelite],'FontWeight','bold');

% ylim=get(gca,'YLim');
% xlim=get(gca,'XLim');
% text(xlim(2),ylim(2),stringie,'VerticalAlignment','middle',...
% 'HorizontalAlignment','left','FontWeight','bold');
% if isempty(fireplacex)
%     disp('No fires to display')
% else
%     text(xlim(2),mean(ylim),sprintf('%6.6f,%6.6f\n',stringie2{:}),...
% 'VerticalAlignment','bottom','HorizontalAlignment','left',...
% 'FontWeight','bold');
% end
%
%
%% Output to a nice looking figure

picname=(['fire',num2str(year),num2str(month),num2str(day),num2str(hour),...
num2str(minute),'.png']);
set(gcf,'color',[1 1 1]);
export_fig(picname,'-png','-q101')
close(figure(f))

%% END TIME BENCHMARKING
disp('DONE!')
t=toc;
fprintf('Time elapsed (seconds):%6.4f\n',t);

%end
```

Apêndice E

Comparação entre dados observados e dados simulados, para 2009

Nas figuras que a seguir se representam, pretende-se ilustrar uma comparação directa entre os resultados simulados pelo WRF a 24 e 48 horas e os correspondentes dados observacionais, que estiveram na base do cálculo das medidas de erro apresentadas no capítulo 7. Assim, nas figuras E.1 a E.17 ilustram-se as comparações entre os dados de temperatura, intensidade do vento, humidade relativa e precipitação acumulada nas últimas 24 horas obtidos mediante previsão a 24 horas e respectivos dados observados. Nas figuras E.18 a E.34 apresenta-se a mesma comparação, a partir dos dados previstos pelo WRF a 48 horas.

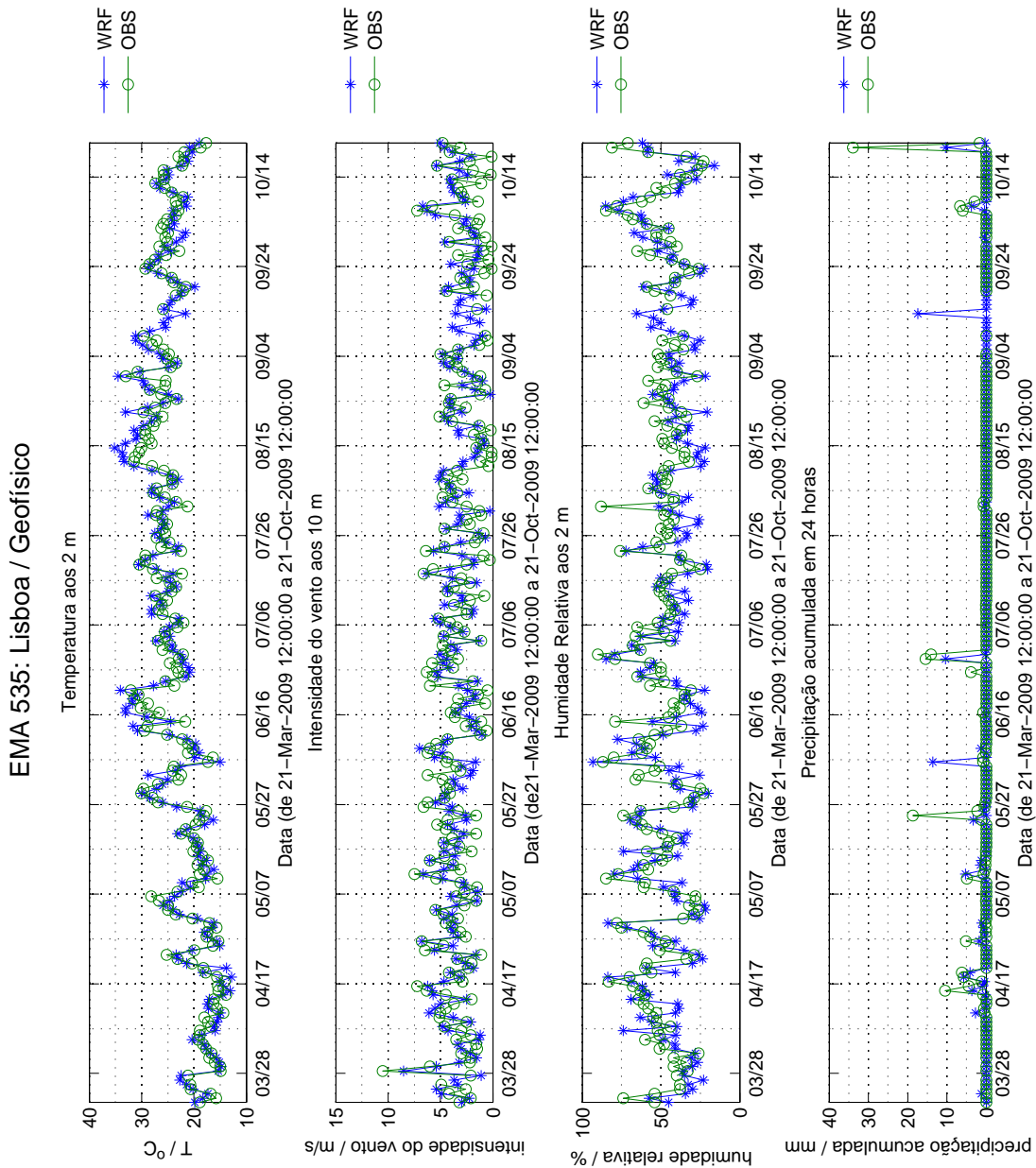


Figura E.1: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 535 (Lisboa/Geofísico).

EMA 541 : Sines / Monte dos Chãos

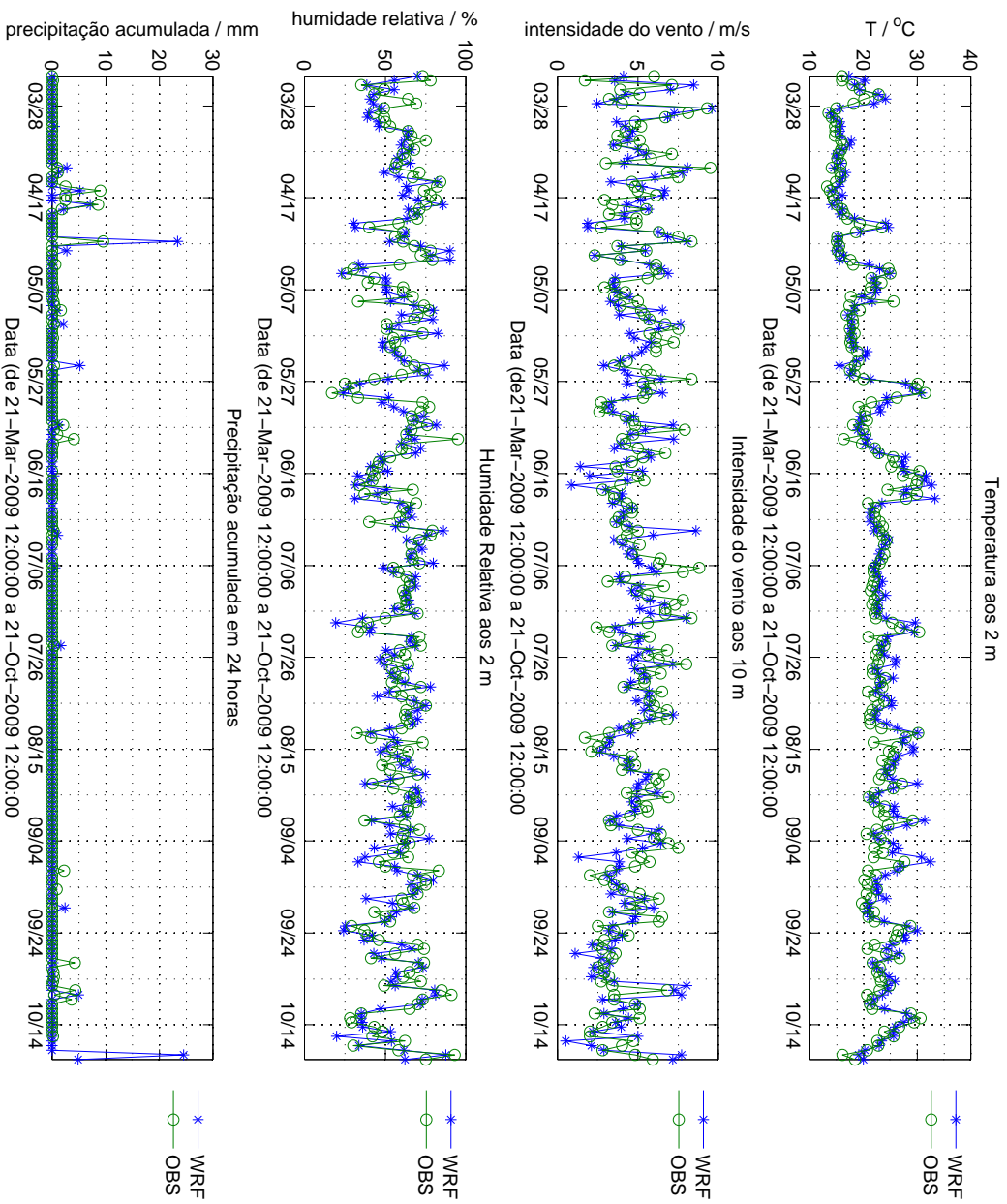


Figura E.2: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 541 (Sines/Monte dos Chãos).

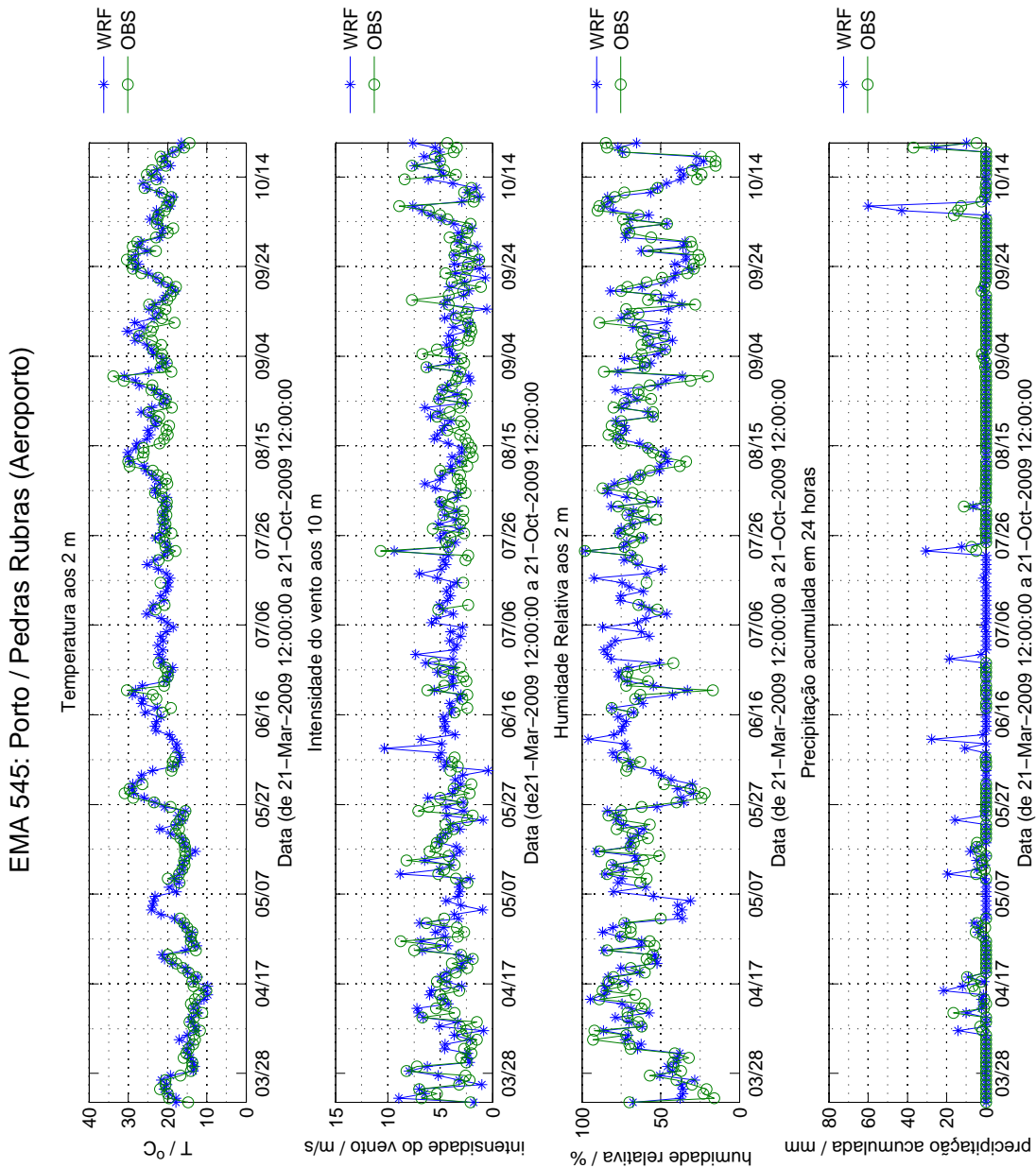


Figura E.3: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 545 (Porto/Pedras Rubras).

EMA 548: Coimbra / Cernache (Aeródromo)

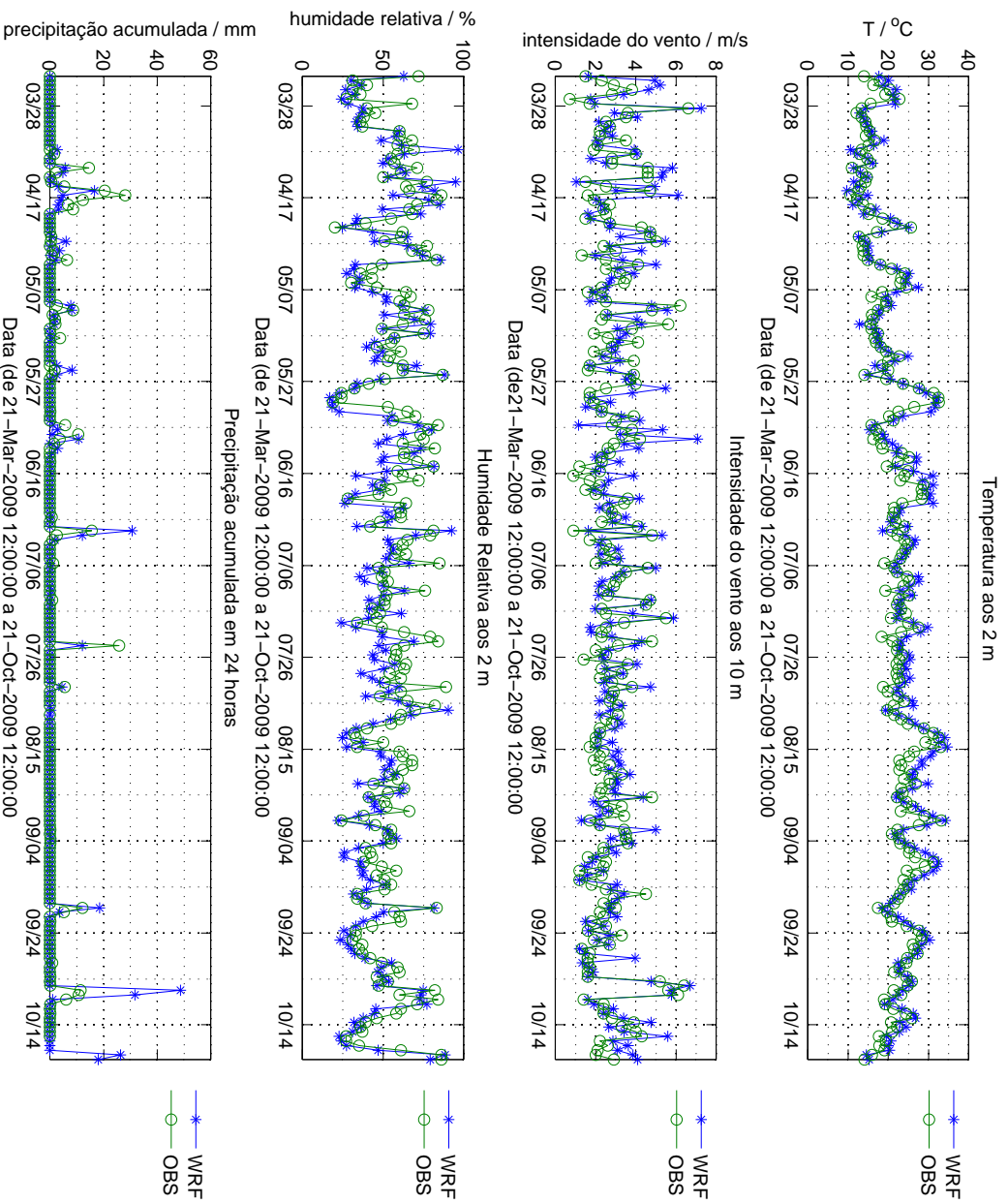


Figura E.4: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 548 (Coimbra/Cernache).

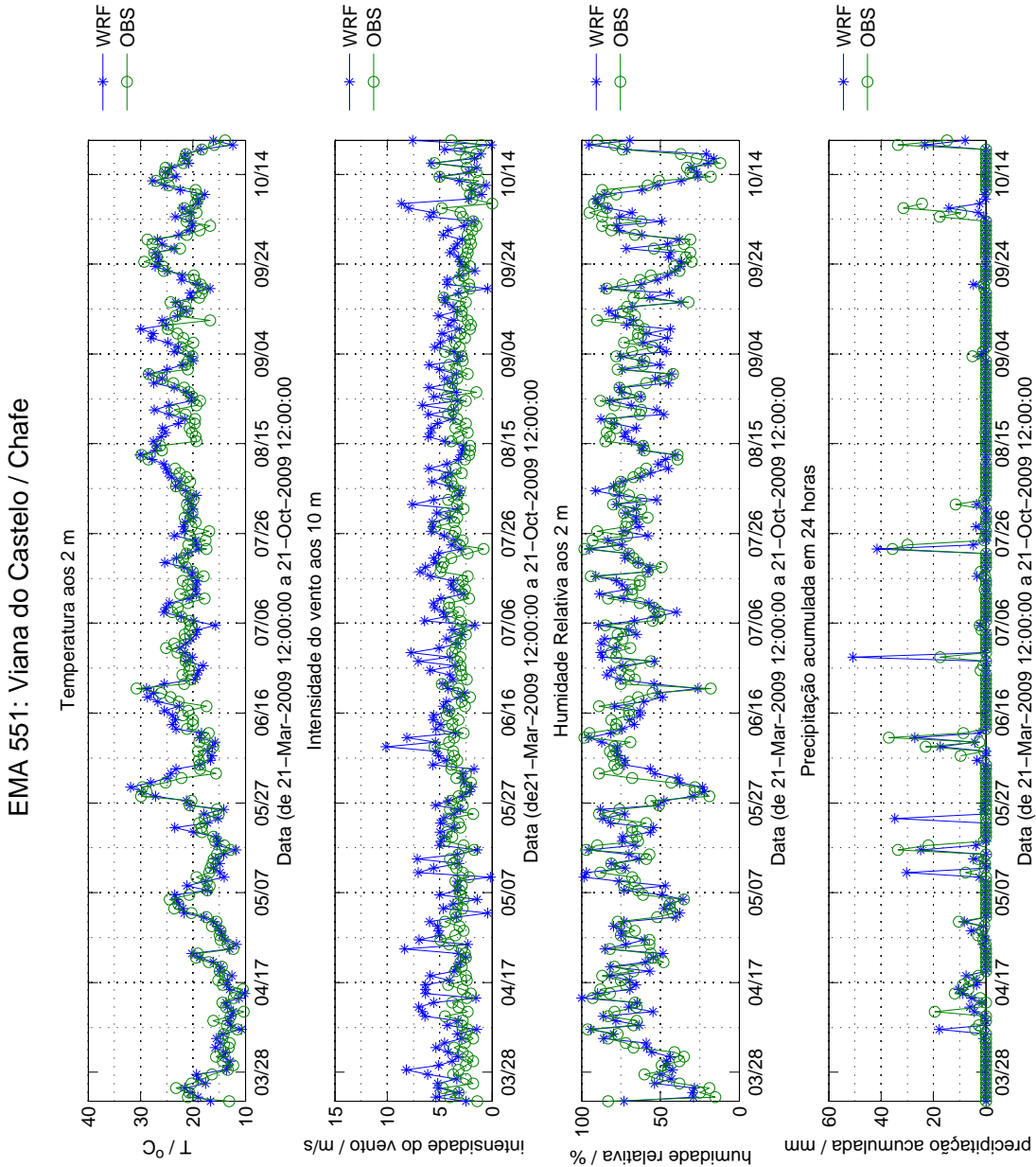


Figura E.5: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 551 (Viana do Castelo/Chafé).

EMA 554: Faro / Aeroporto

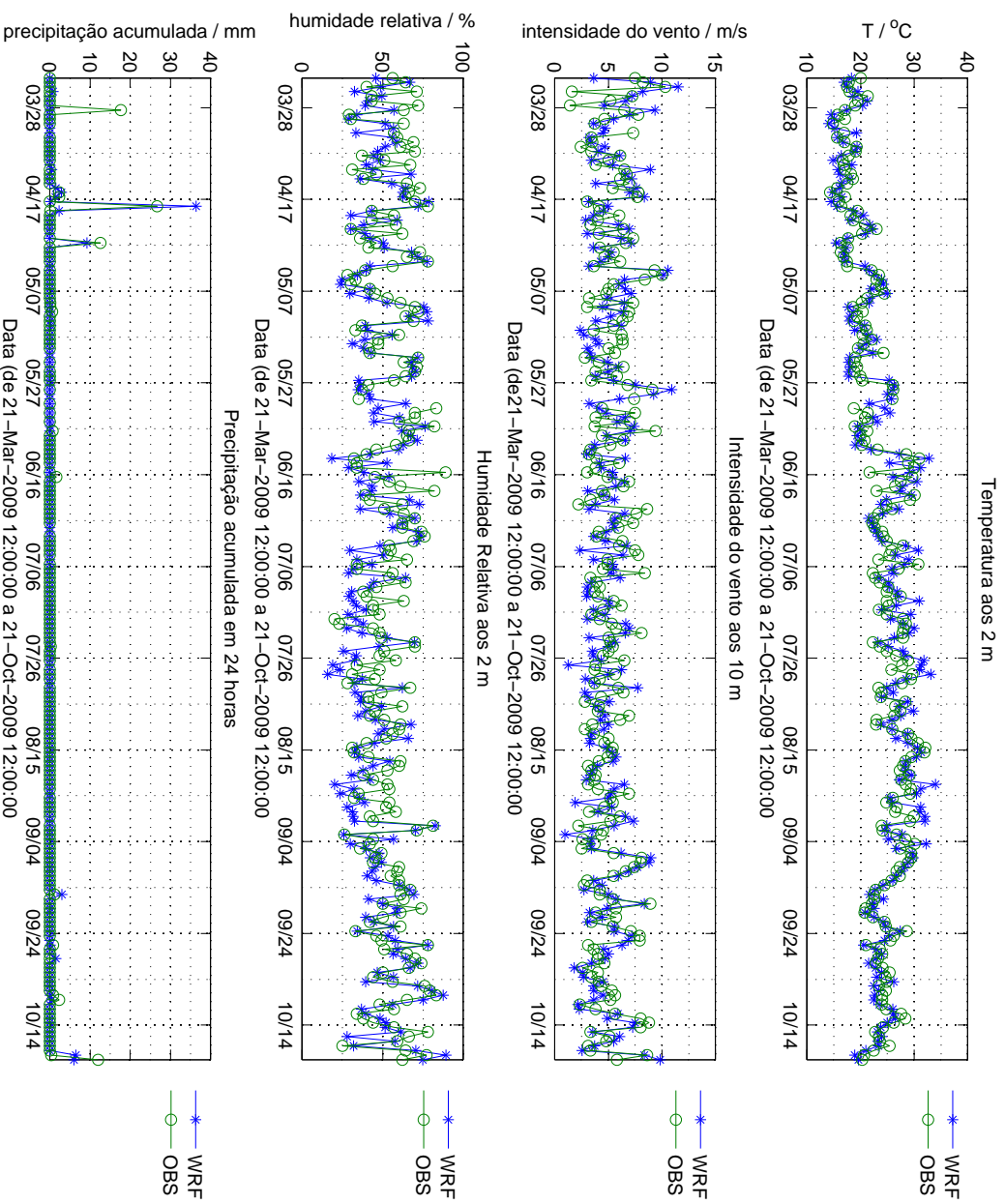


Figura E.6: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 554 (Faro/Aeroporto).

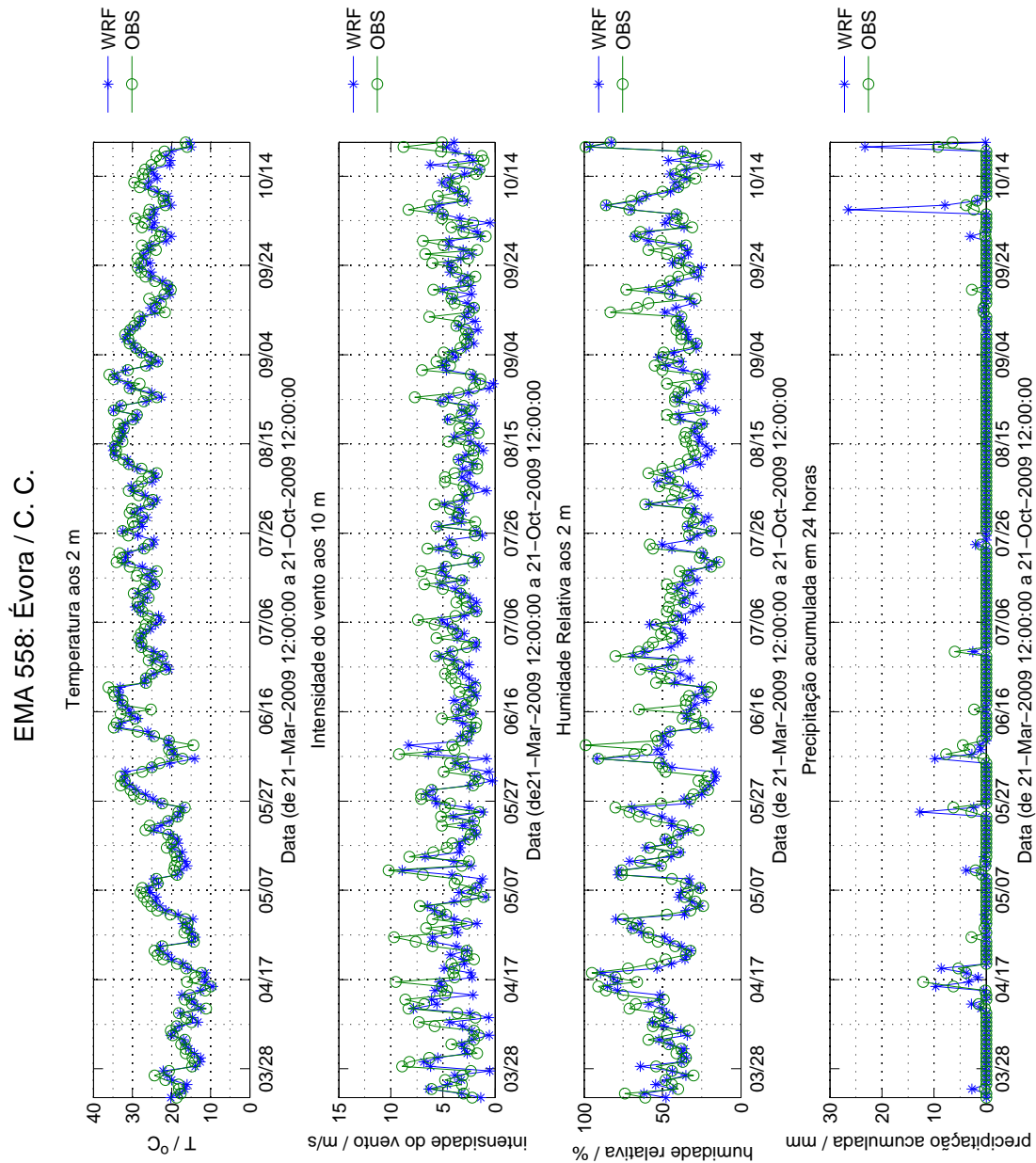


Figura E.7: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 558 (Évora/C.C.).

EMA 560: Viseu / C. C.

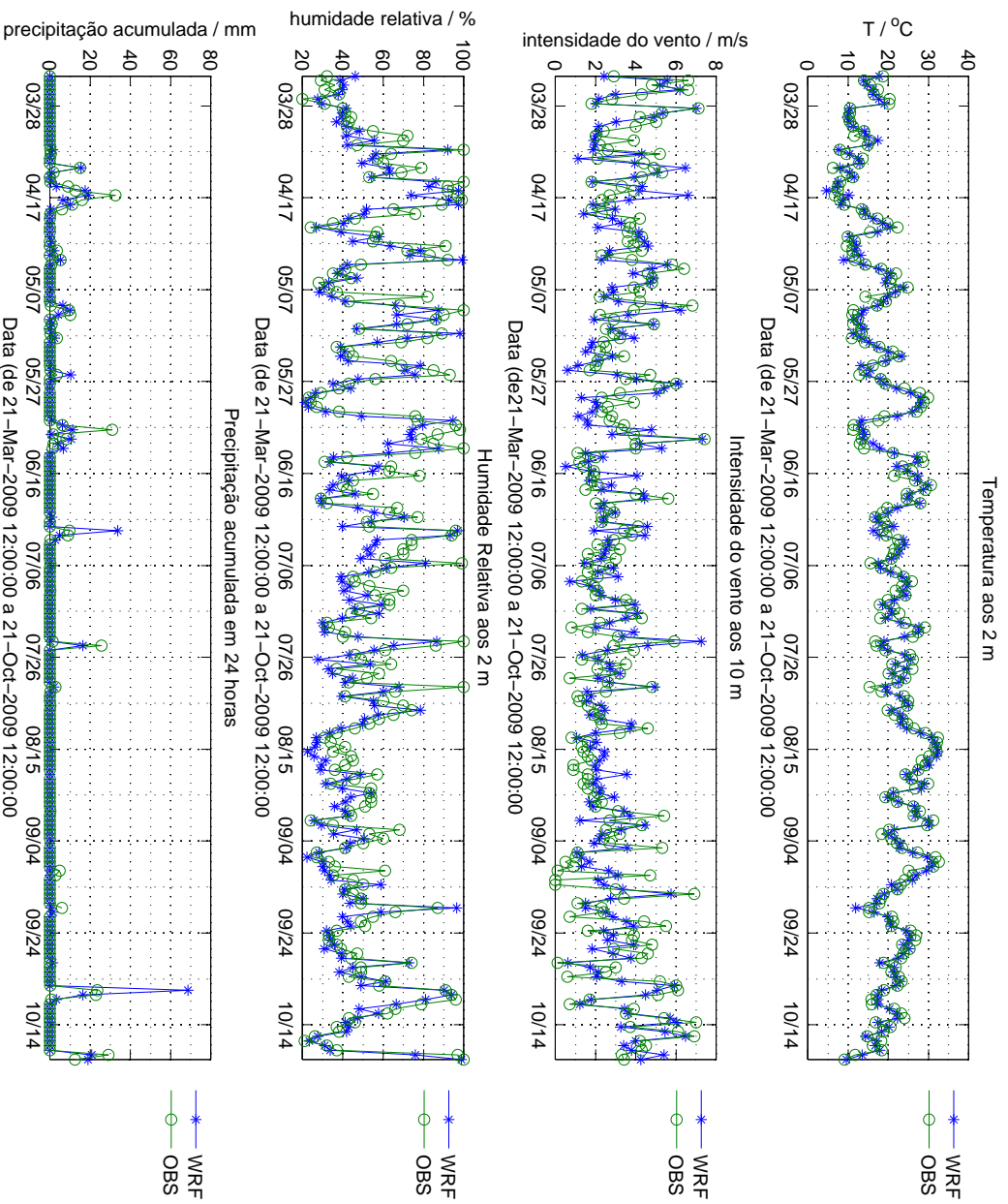


Figura E.8: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 560 (Viseu/C.C.).

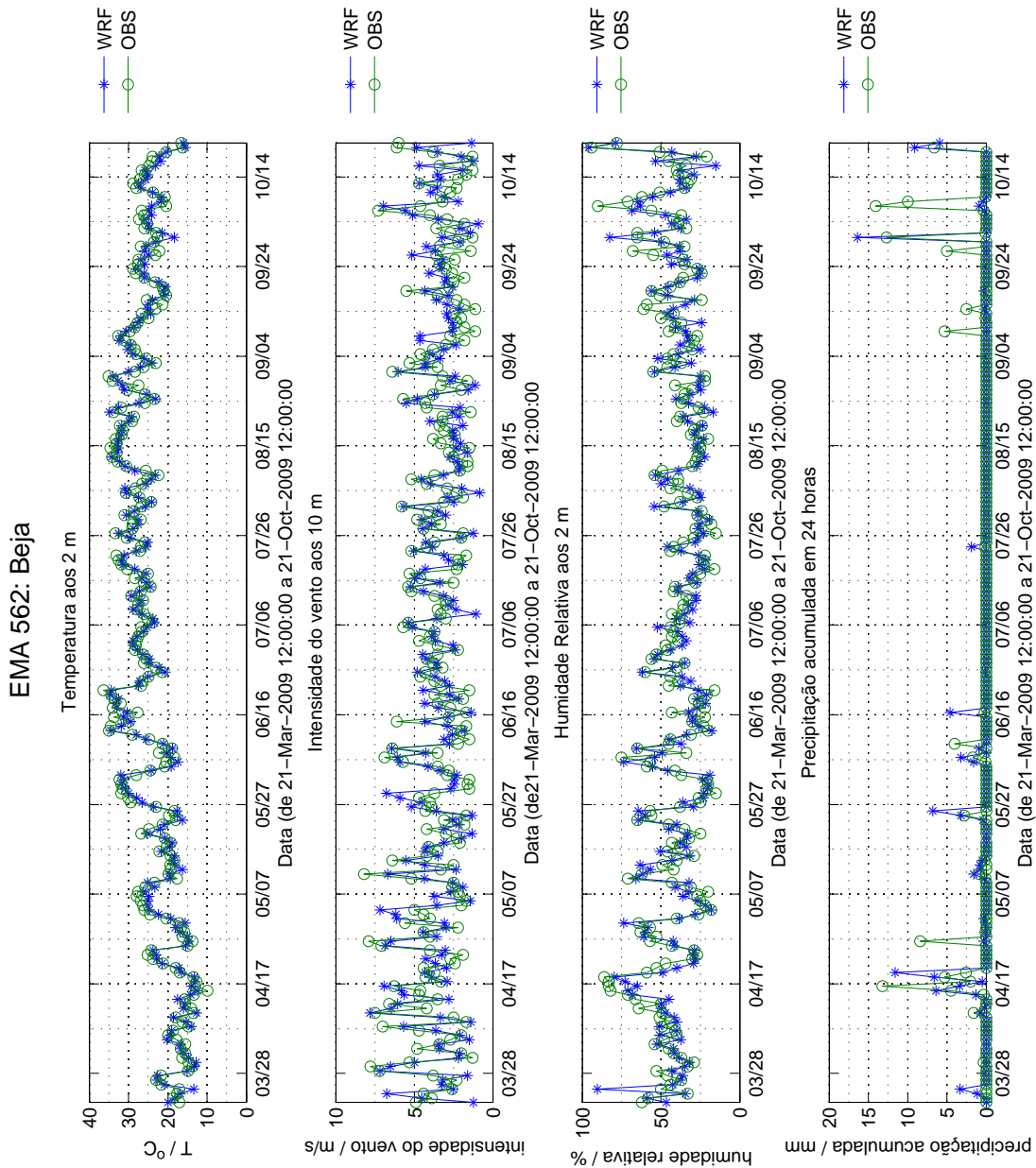


Figura E.9: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 562 (Beja).

EMA 567: Vila Real / C. C.

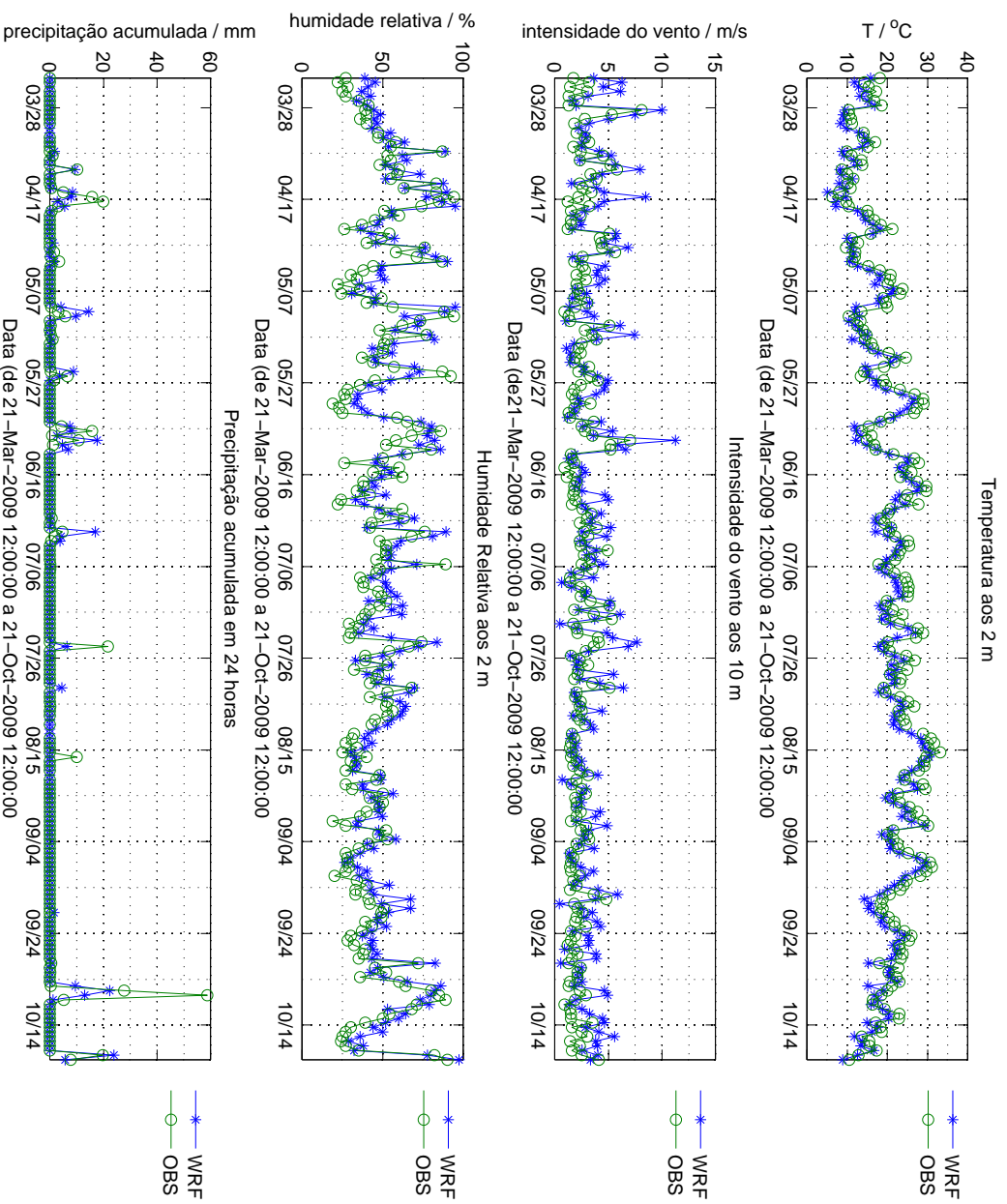


Figura E.10: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 567 (Vila Real/C.C.).

EMA 568: Penhas Douradas / Observatório

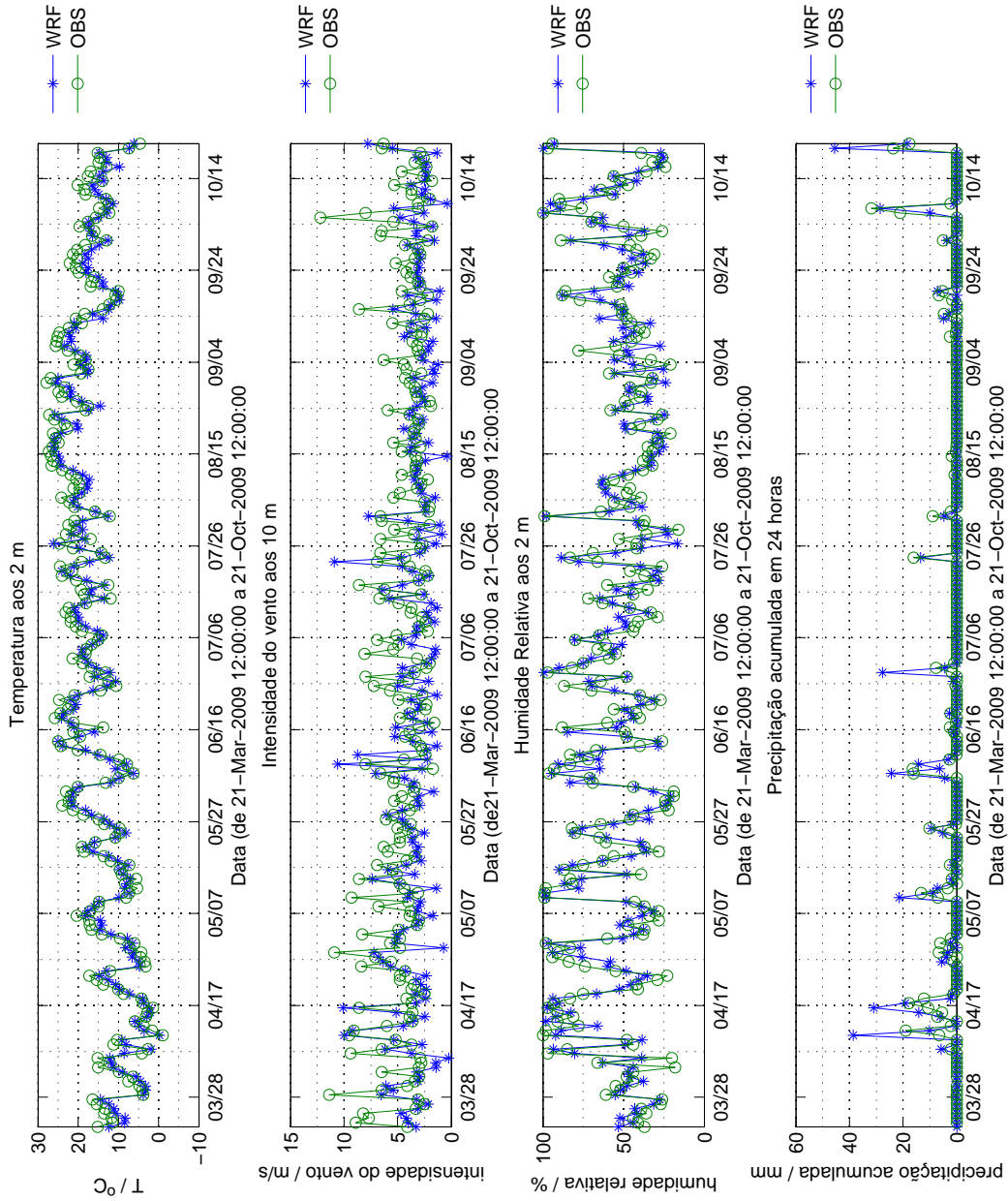


Figura E.11: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 568 (Penhas Douradas/Observatório).

EMA 570: Castelo Branco / C. C.

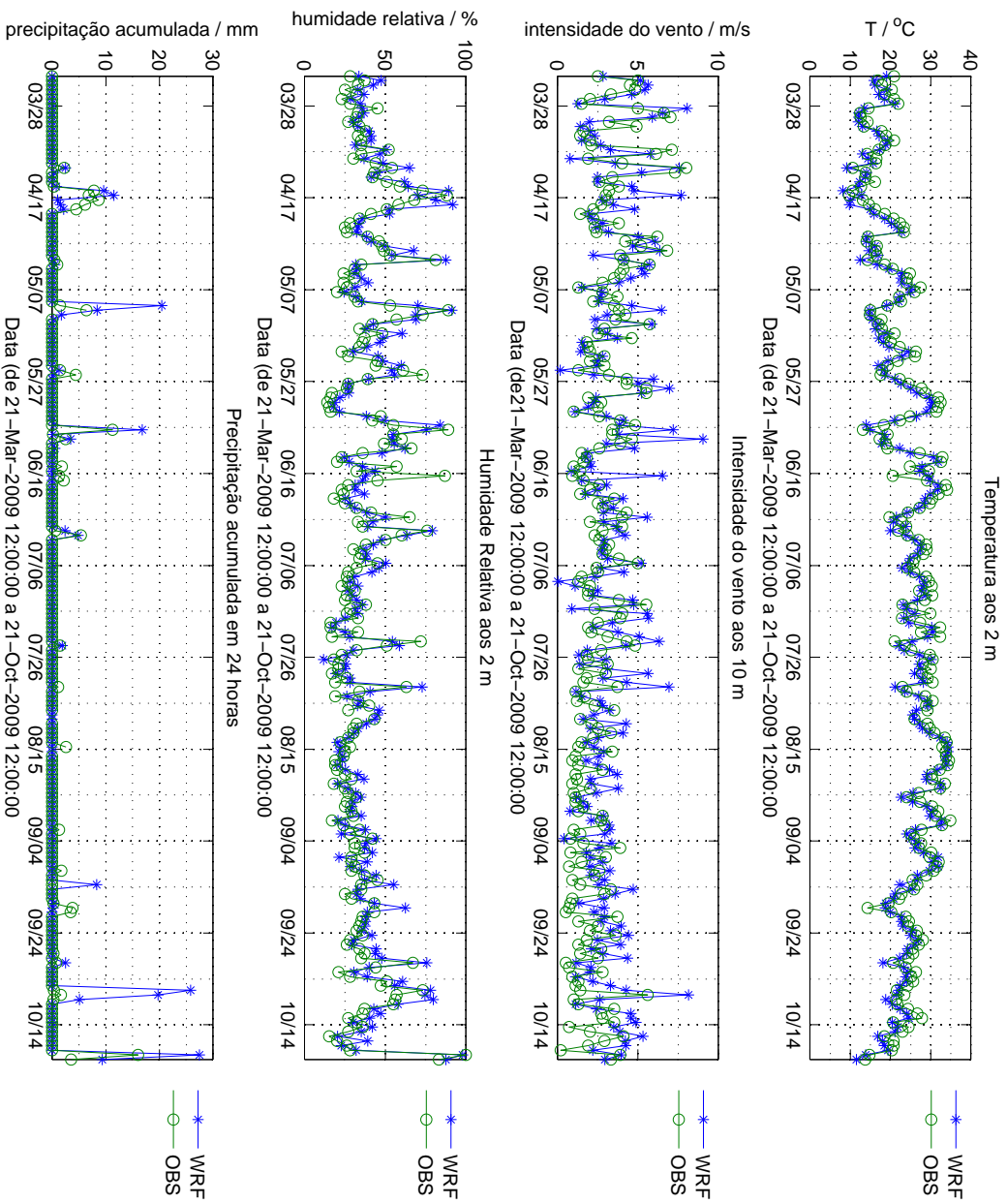


Figura E.12: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 570 (Castelo Branco/C.C.).

EMA 571: Portalegre / C. C.

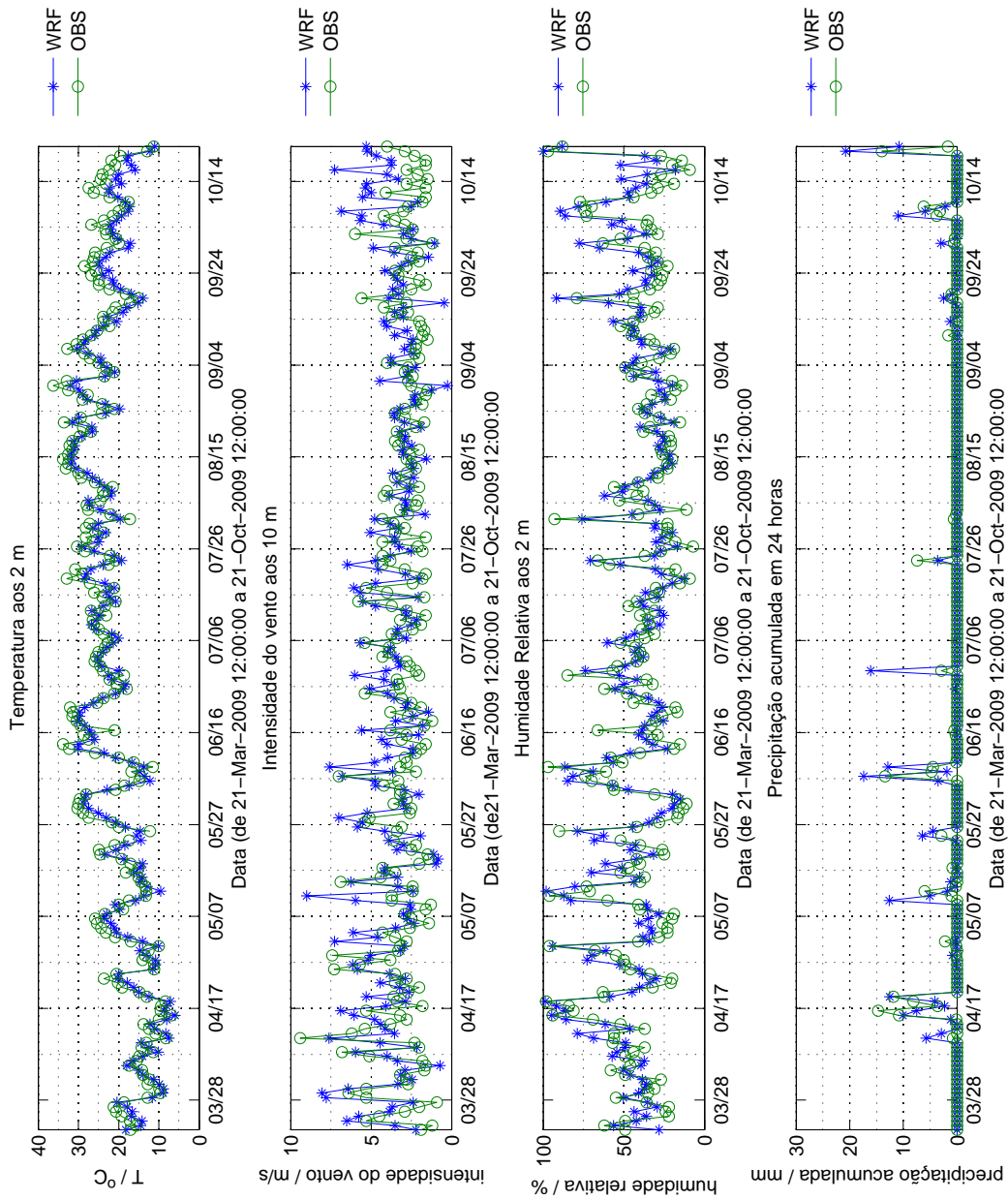


Figura E.13: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 571 (Portalegre/C.C.).

EMA 575: Bragança / C. C.

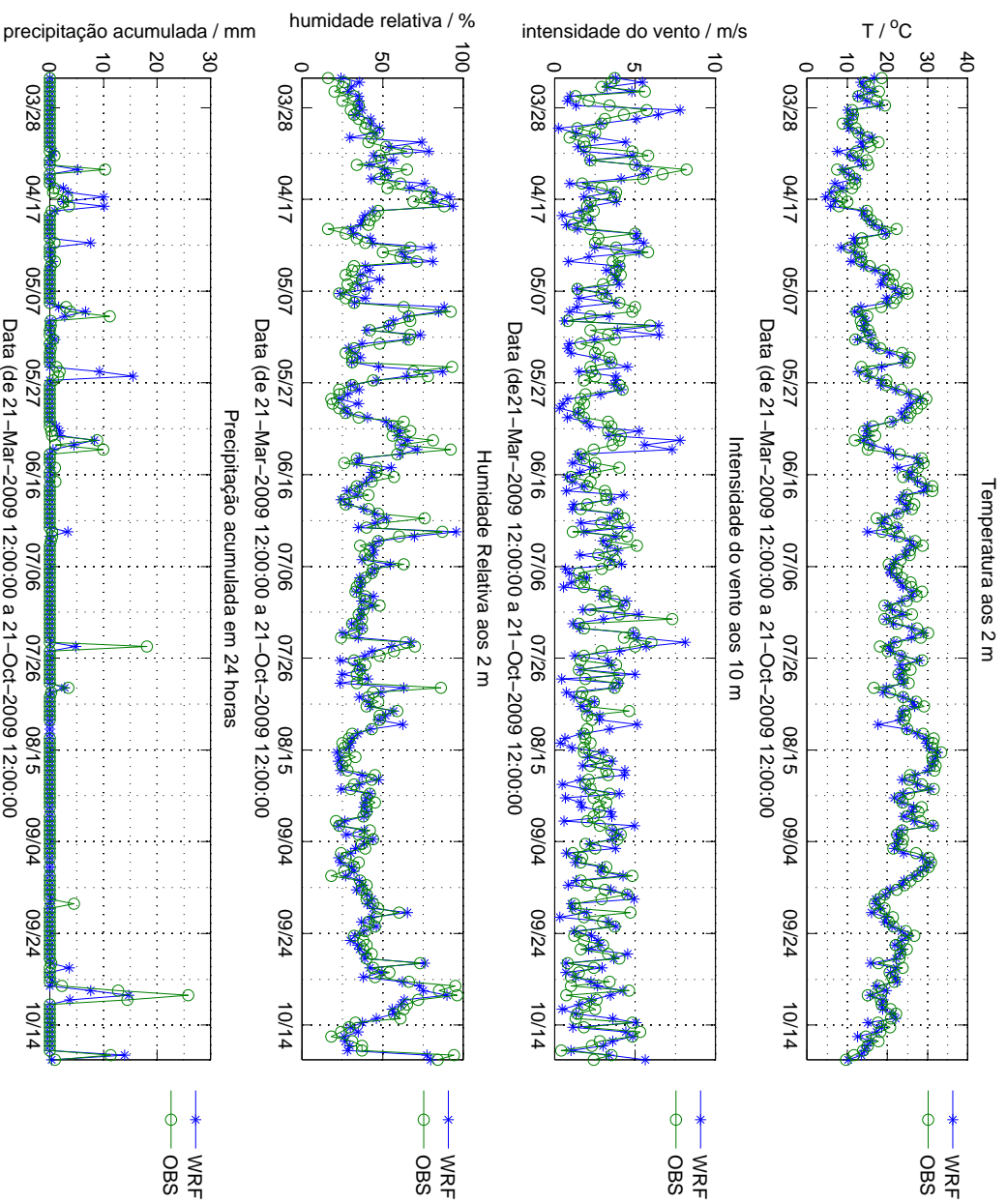


Figura E.14: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 575 (Bragança/C.C.).

EMA 579: Lisboa / Gago Coutinho

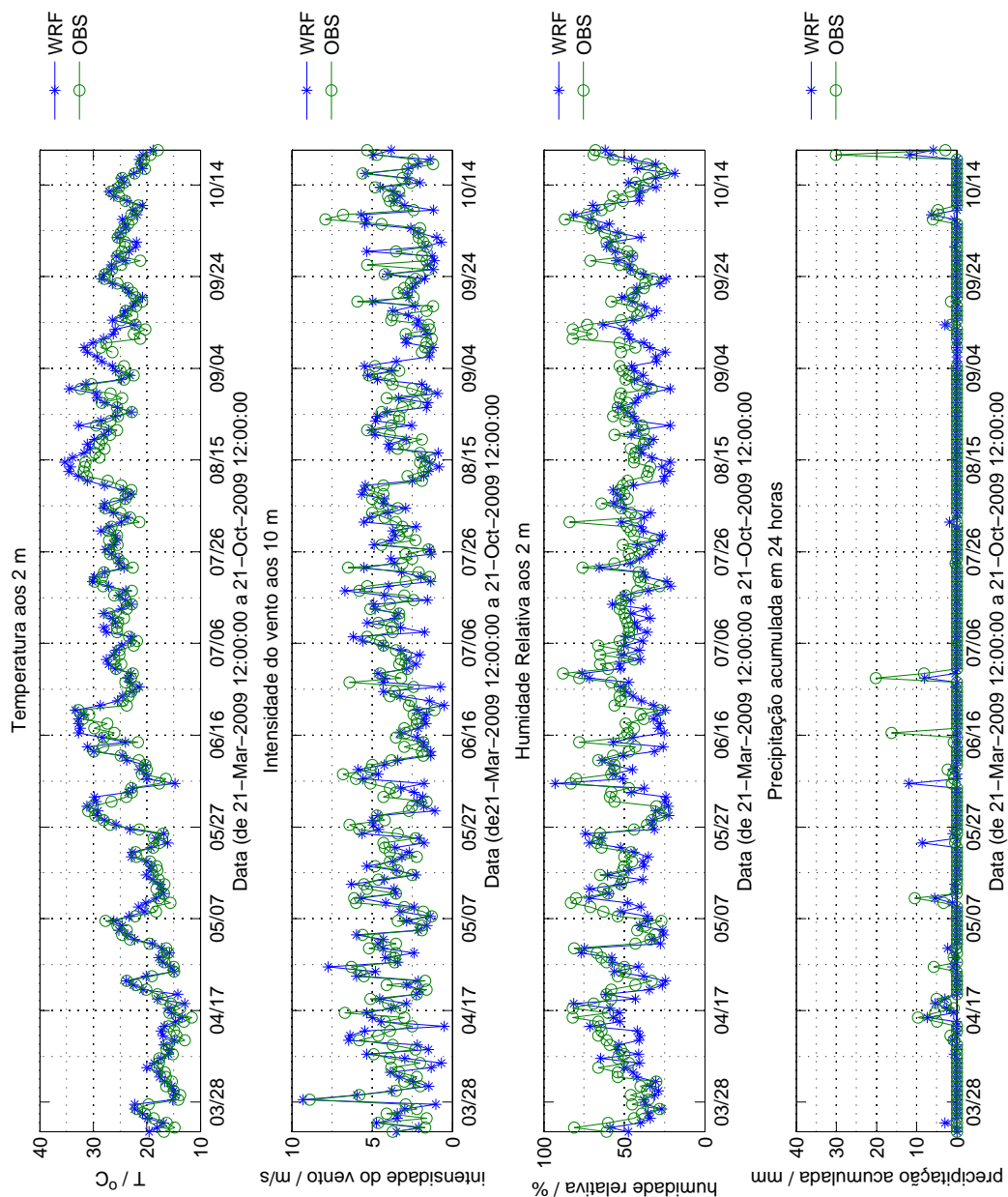


Figura E.15: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 579 (Lisboa/Gago Coutinho).

EMA 616: Chaves / Aeródromo

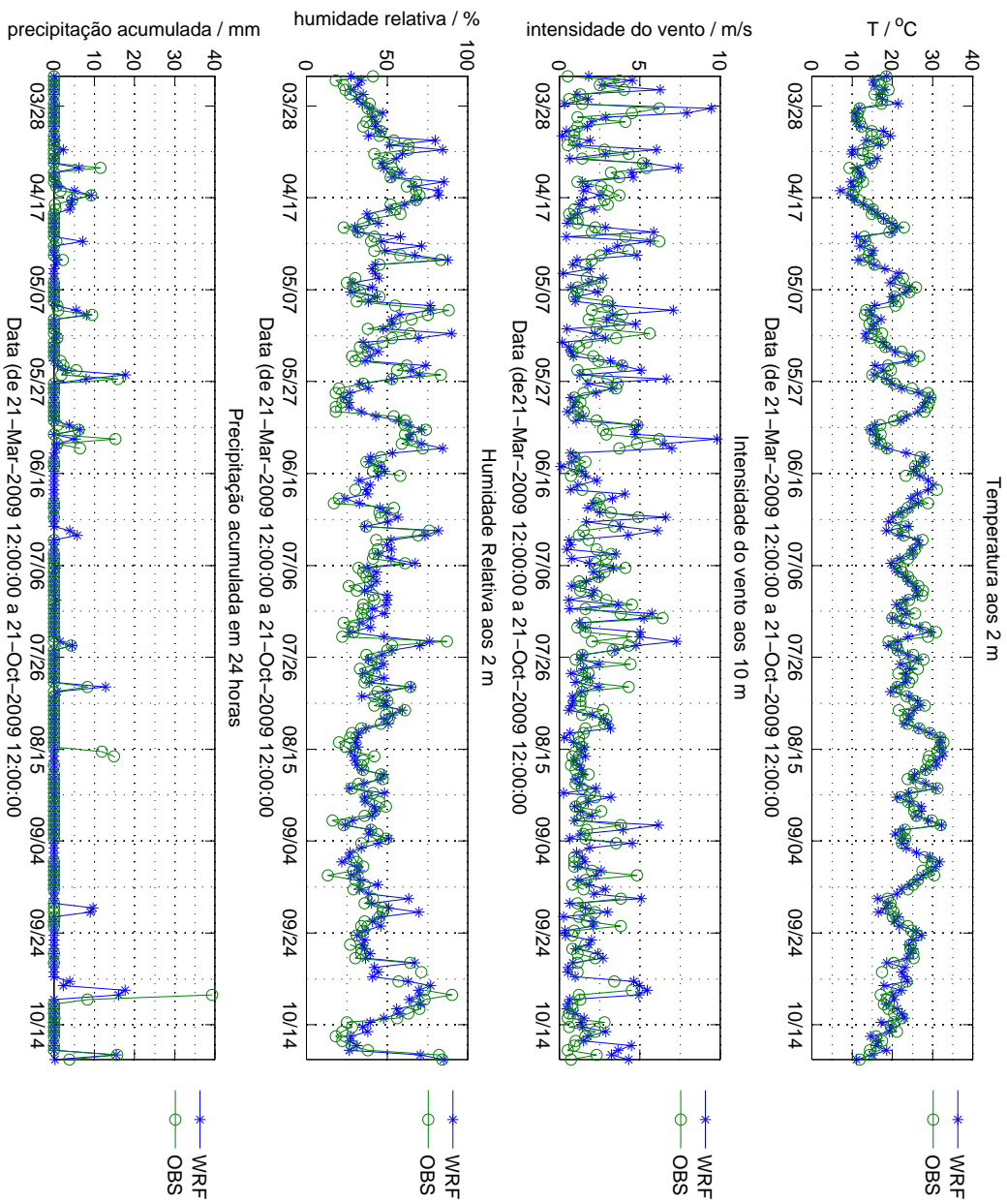


Figura E.16: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 616 (Chaves/Aeródromo).

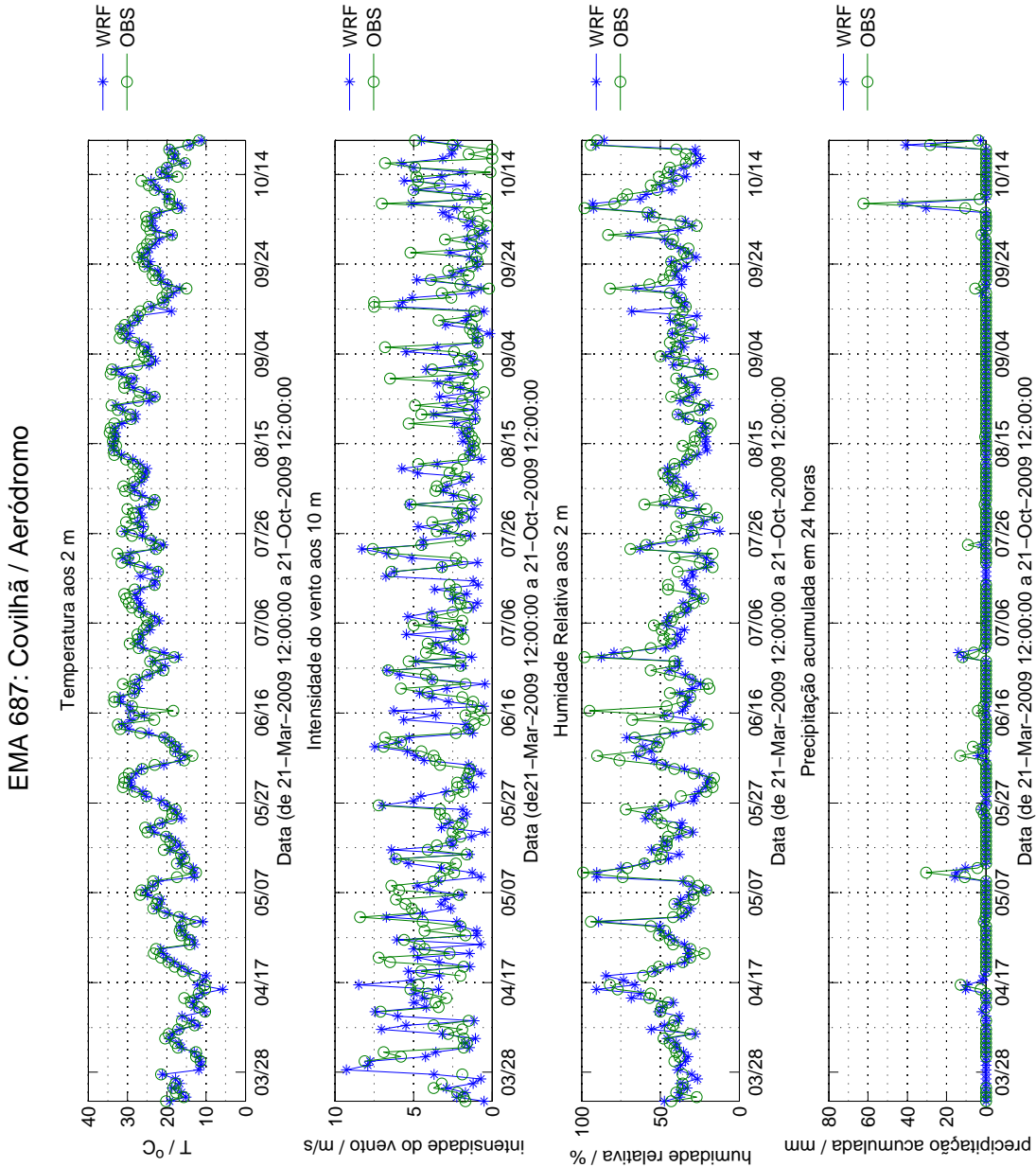


Figura E.17: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 687 (Covilhã/Aeródromo).

EMA 535: Lisboa / Geofísico

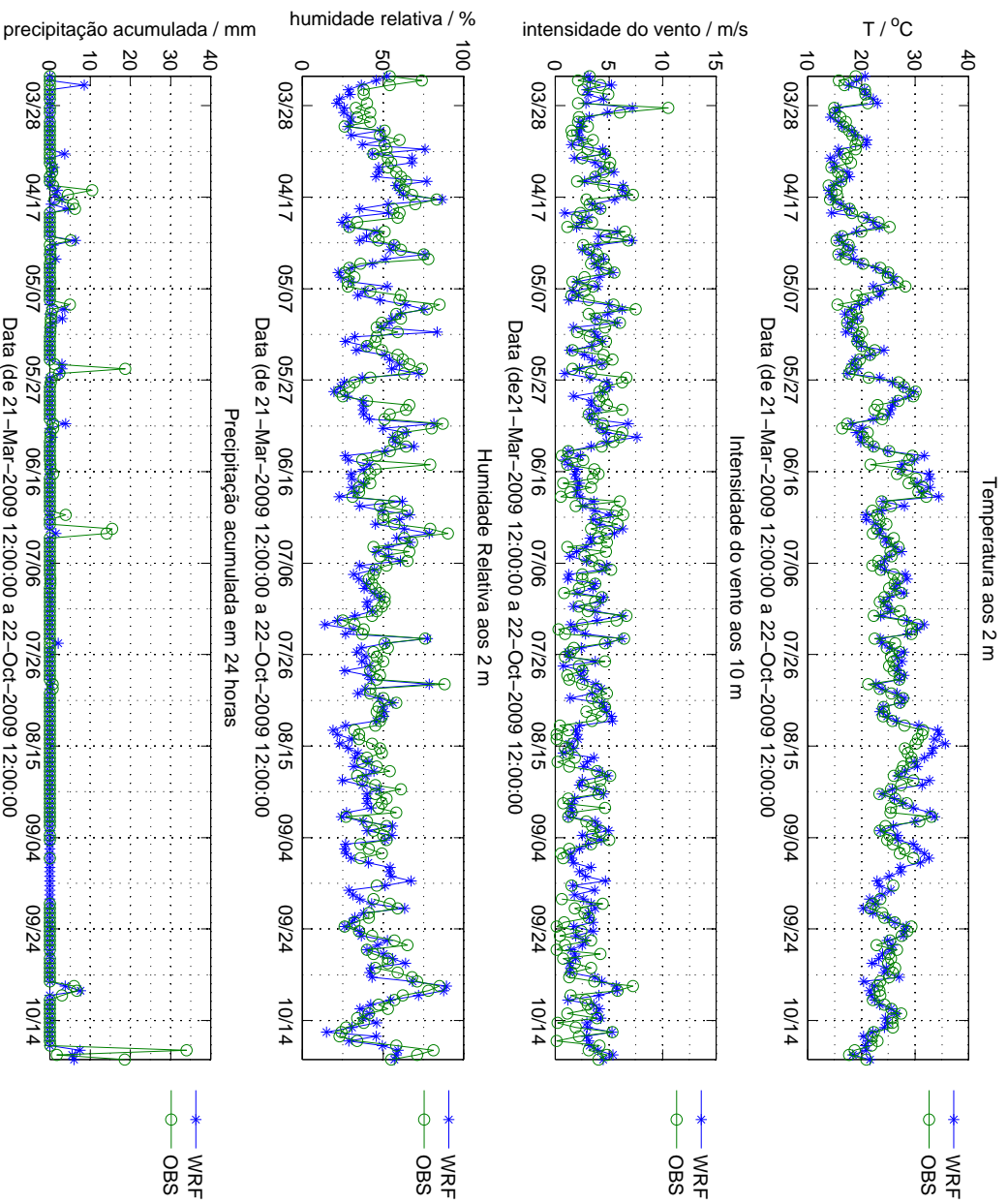


Figura E.18: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 535 (Lisboa / Geofísico).

EMA 541: Sines / Monte dos Chãos

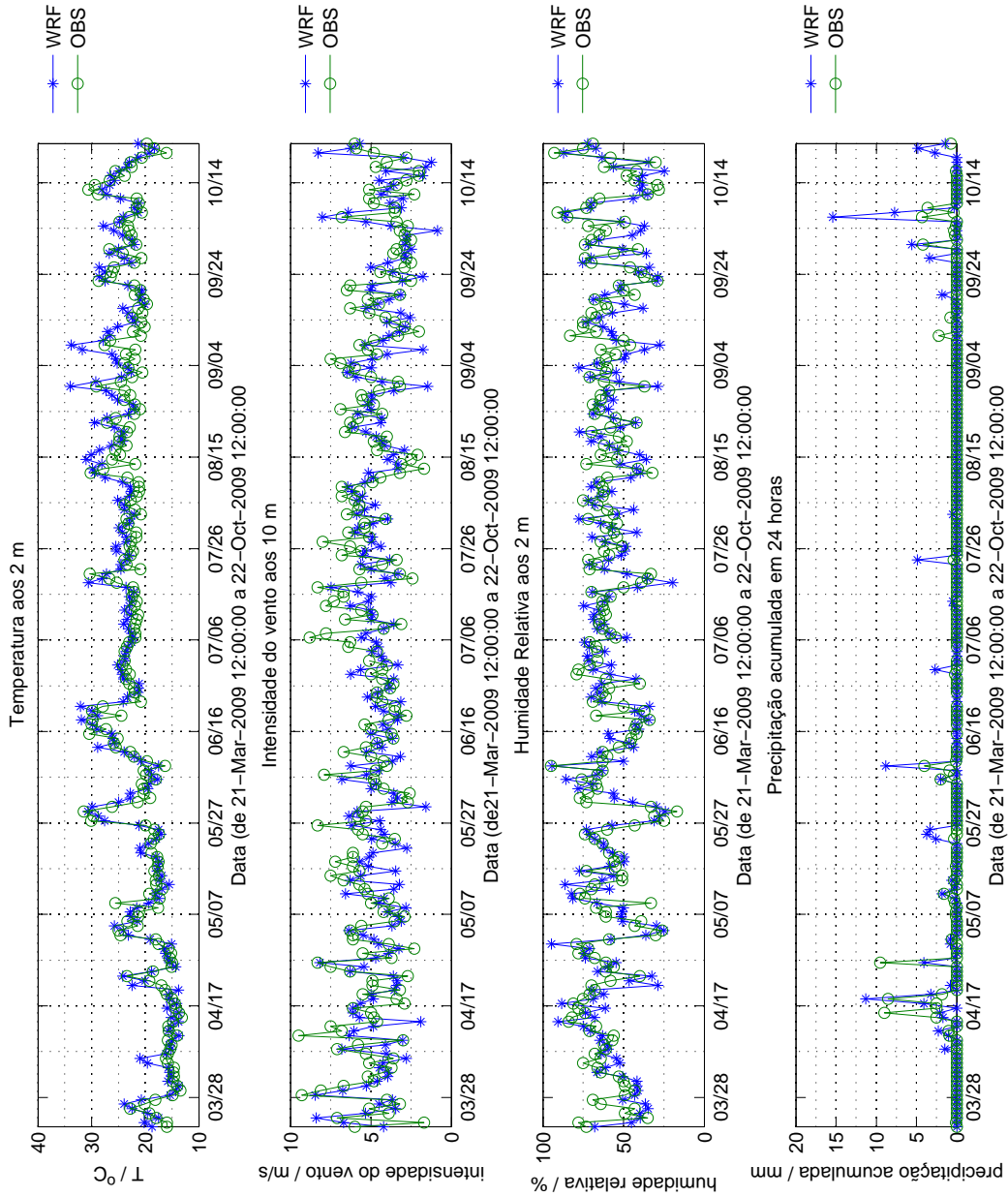


Figura E.19: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 541 (Sines/Monte dos Chãos).

EMA 545: Porto / Pedras Rubras (Aeroporto)

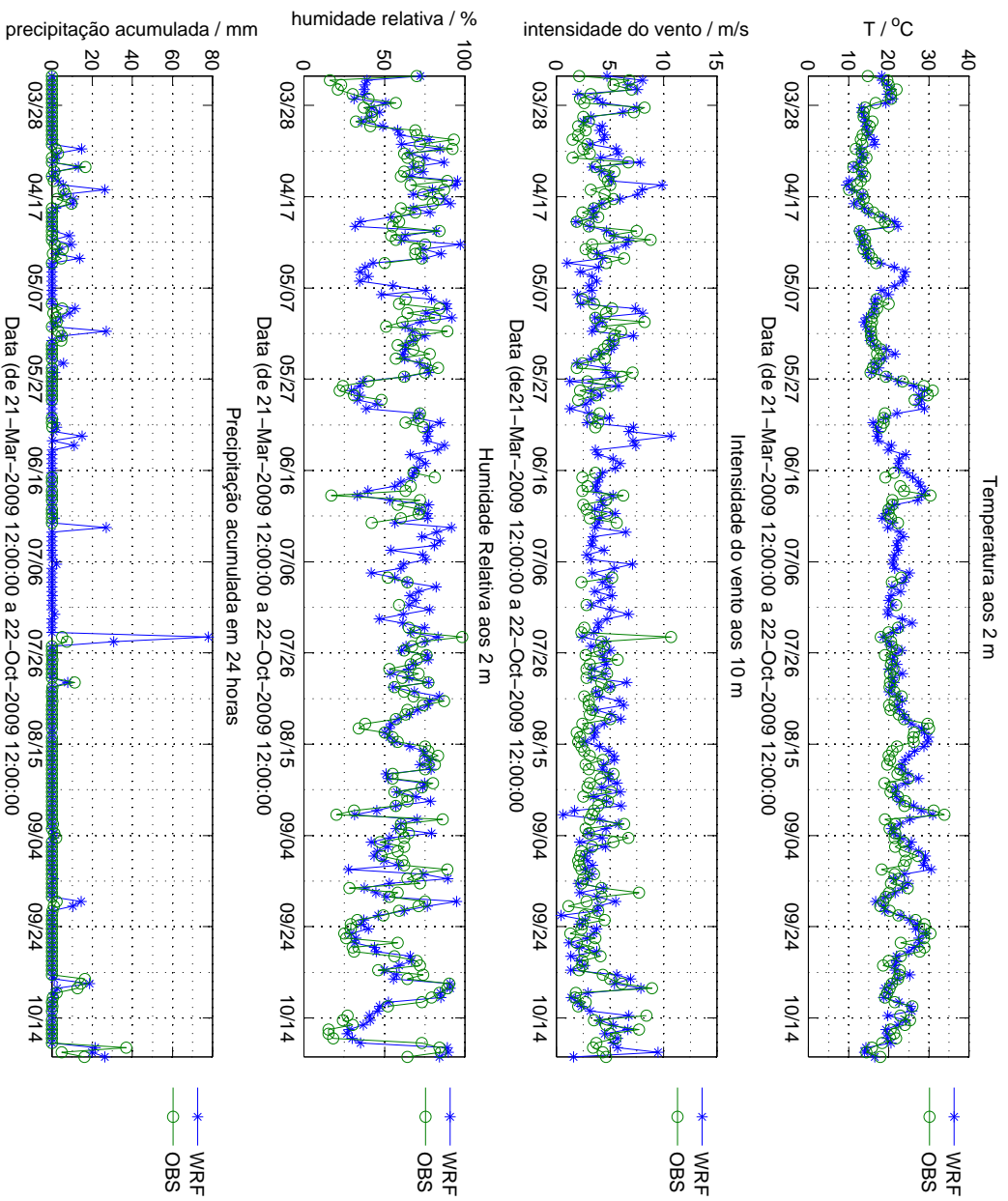


Figura E.20: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 545 (Porto/Pedras Rubras).

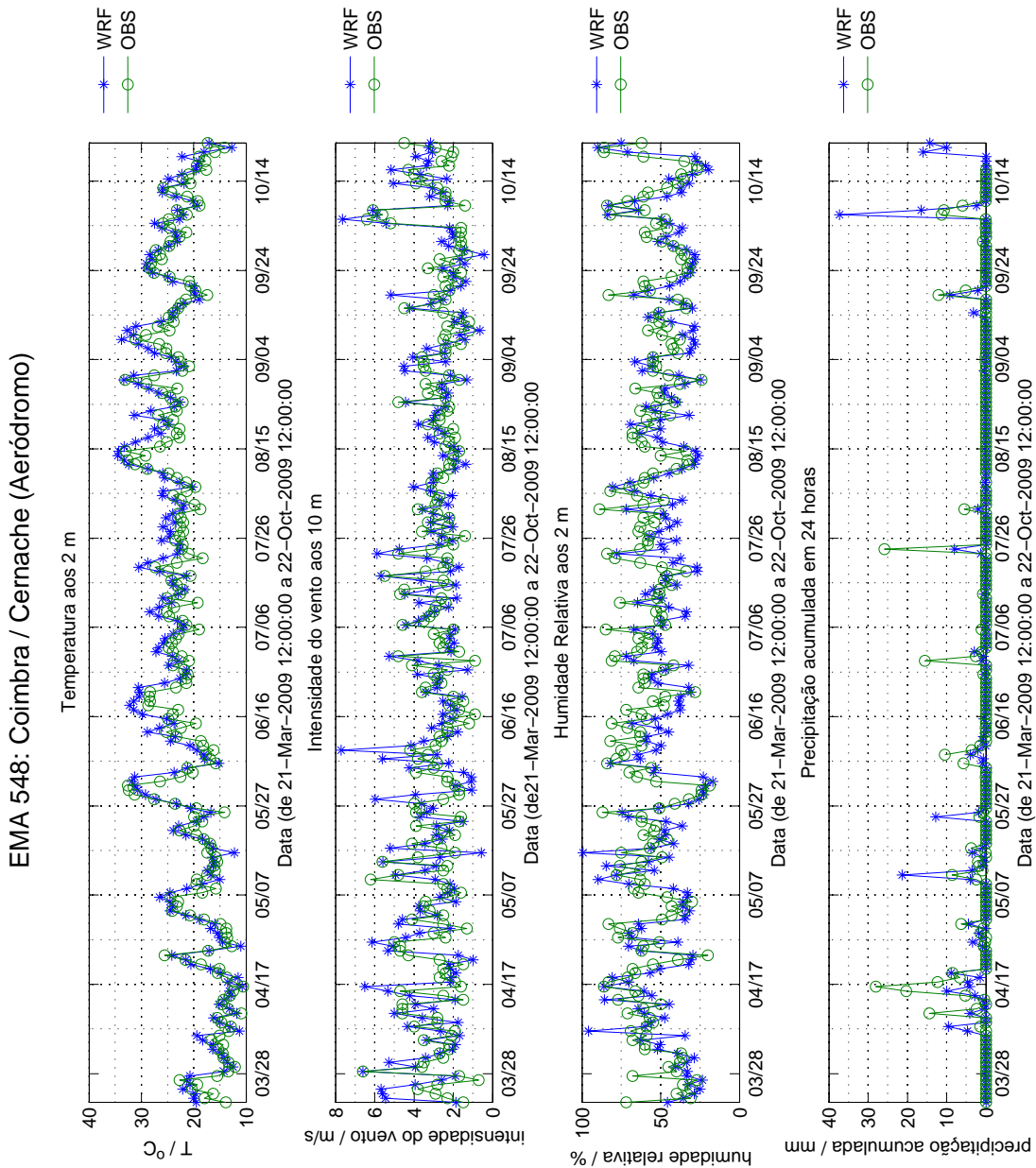


Figura E.21: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 548 (Coimbra/Cernache).

EMA 551 : Viana do Castelo / Chafé

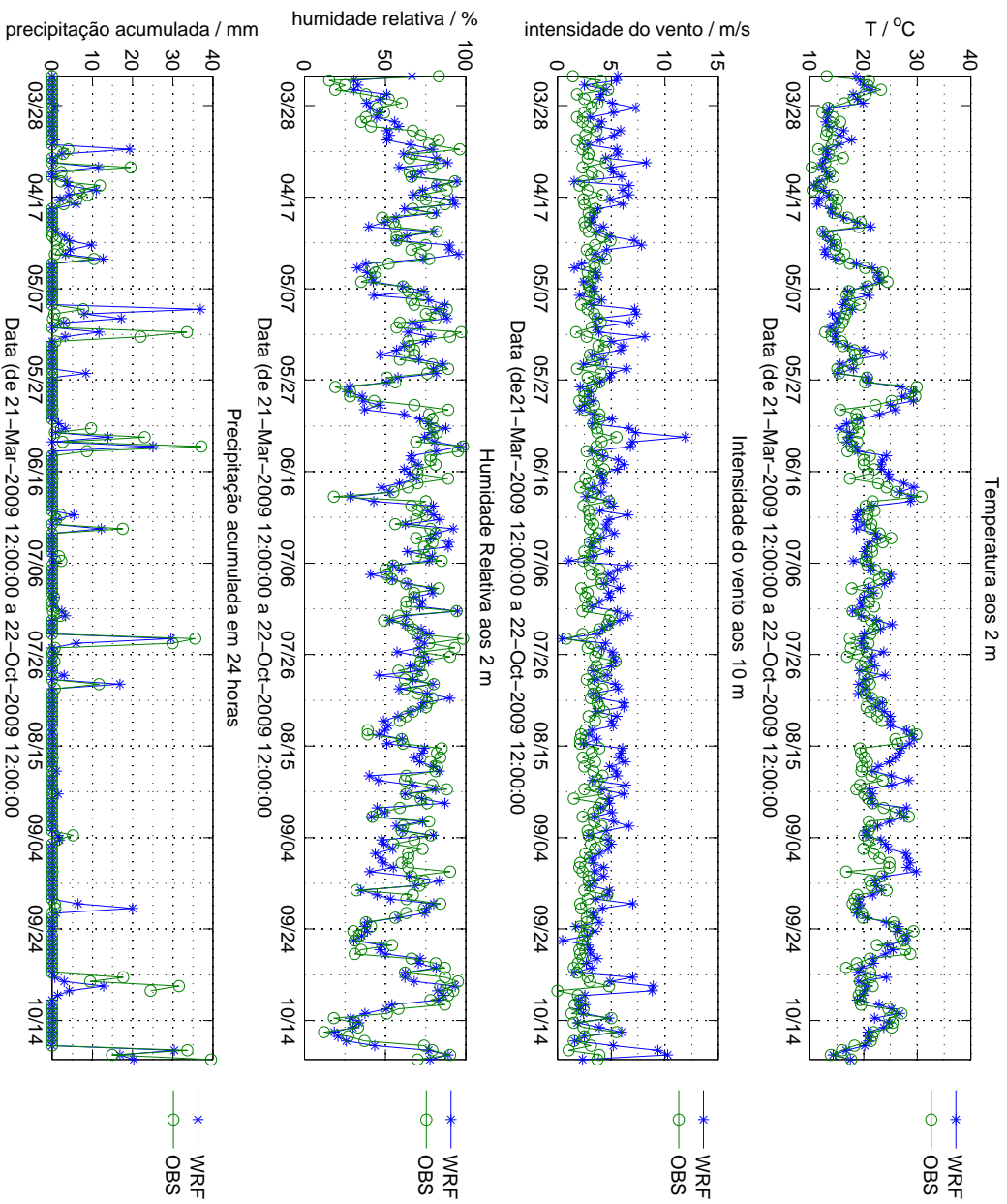


Figura E.22: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 551 (Viana do Castelo/Chafé).

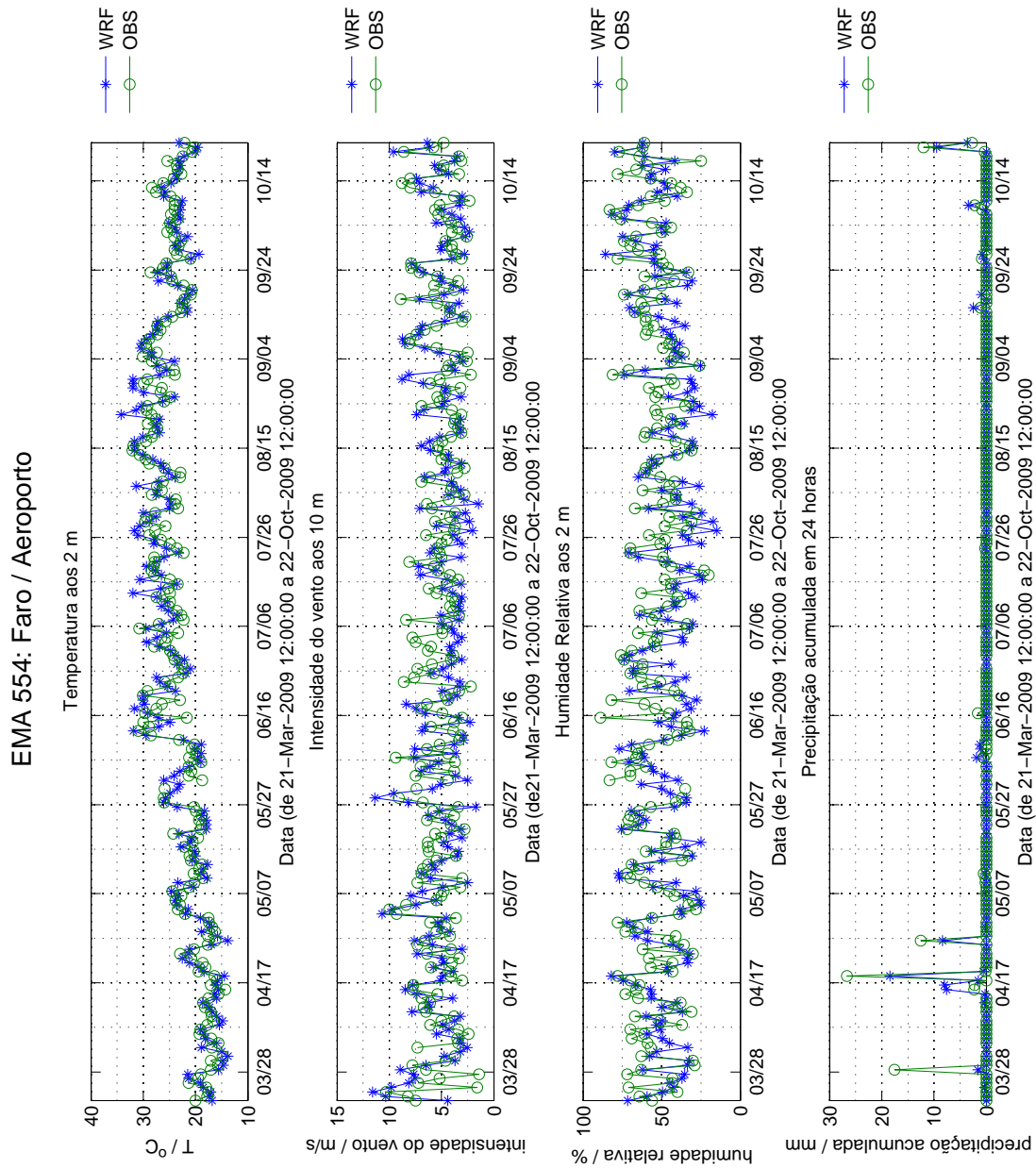


Figura E.23: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 554 (Faro/Aeroporto).

EMA 558: Évora / C. C.

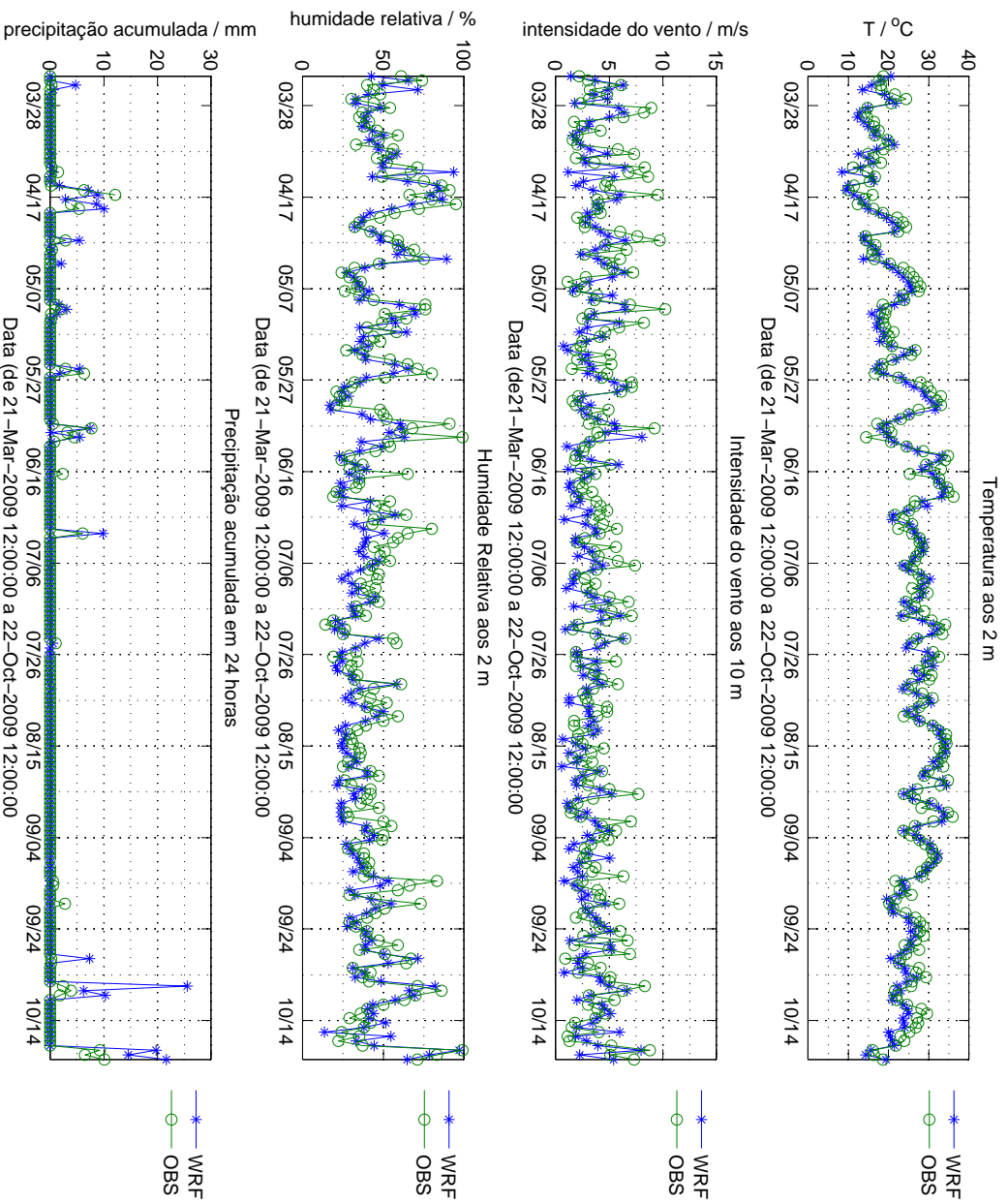


Figura E.24: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 558 (Évora/C.C.).

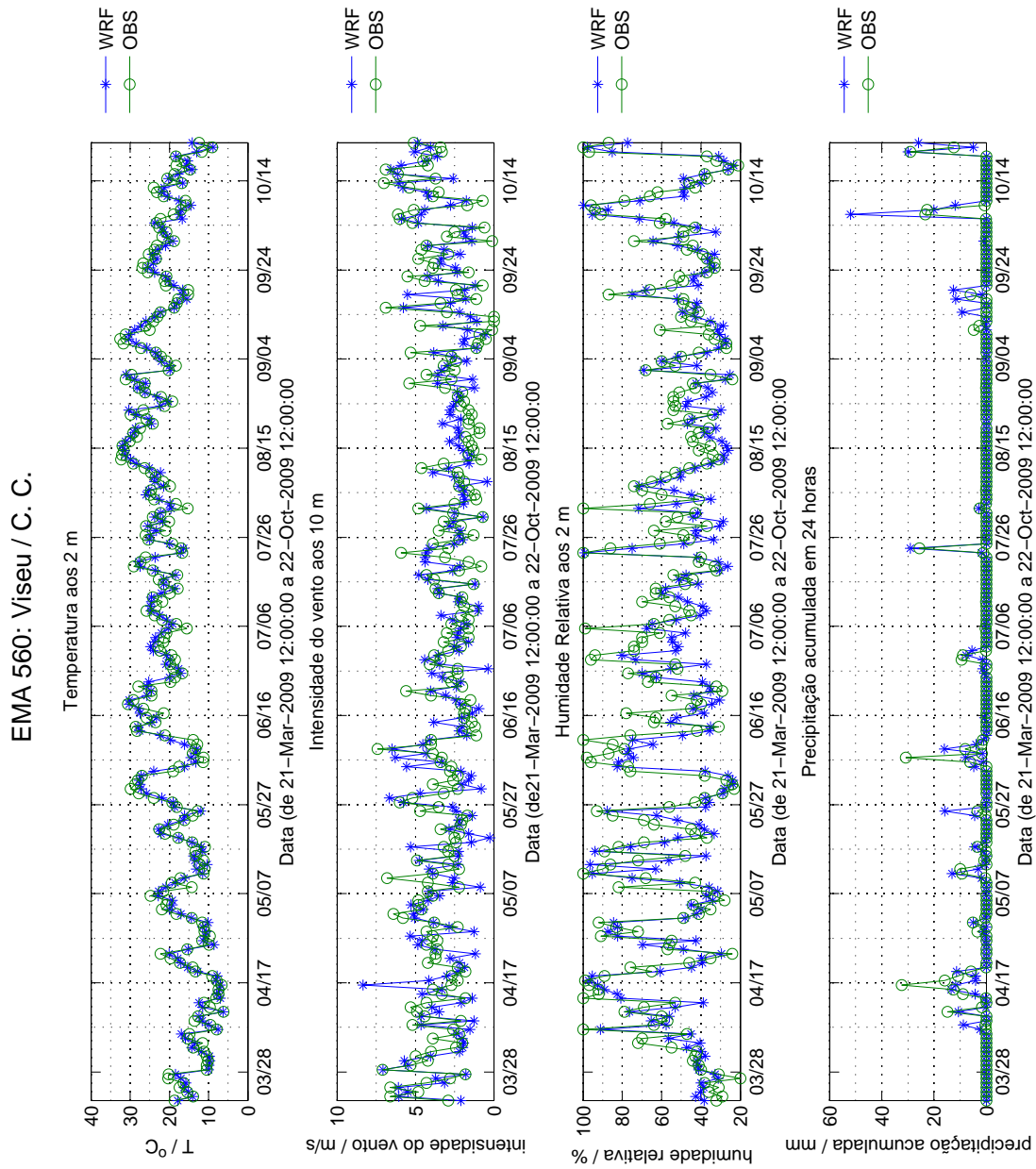


Figura E.25: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 560 (Viseu/C.C.).

EMA 562: Beja

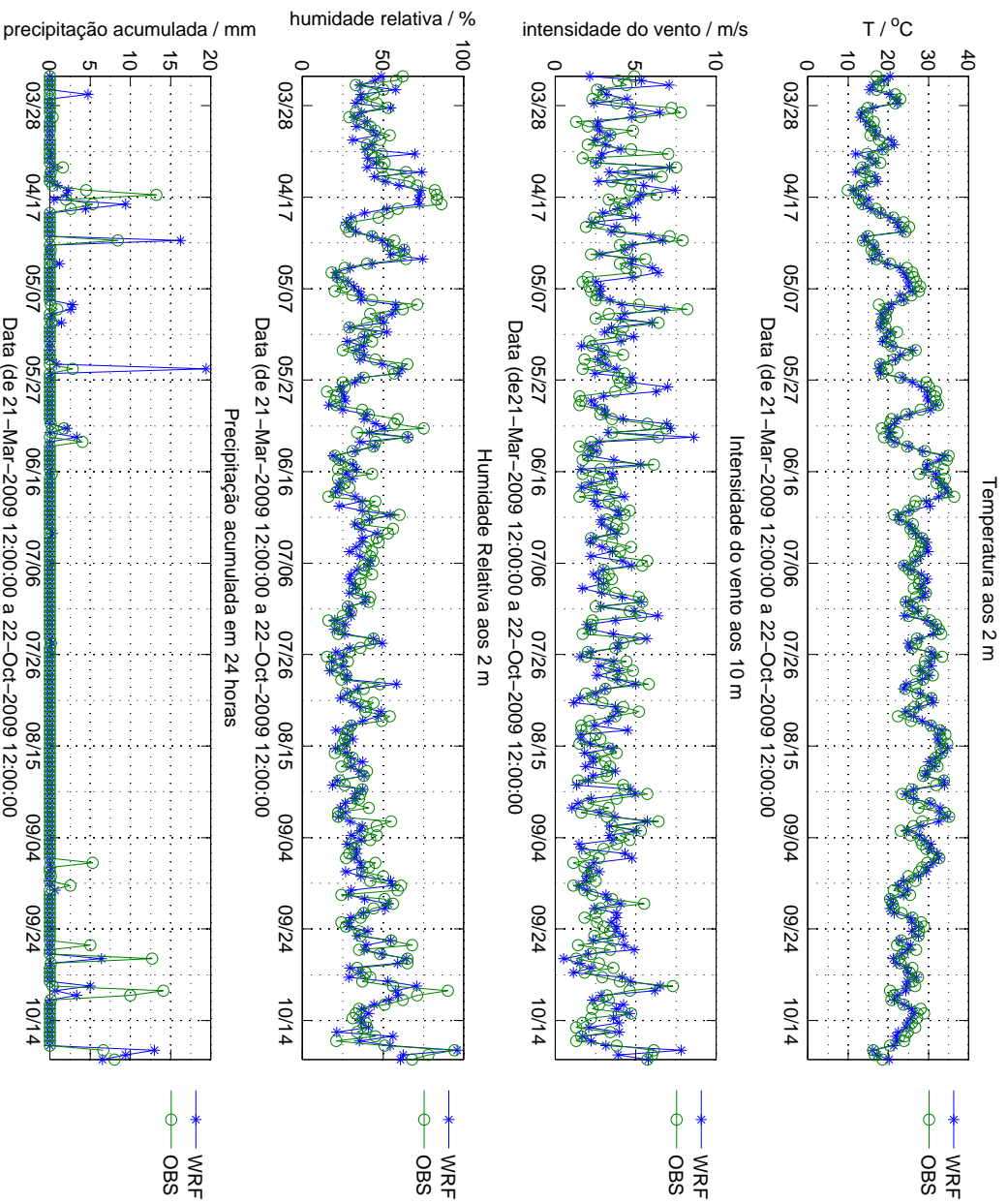


Figura E.26: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 562 (Beja).

EMA 567: Vila Real / C. C.

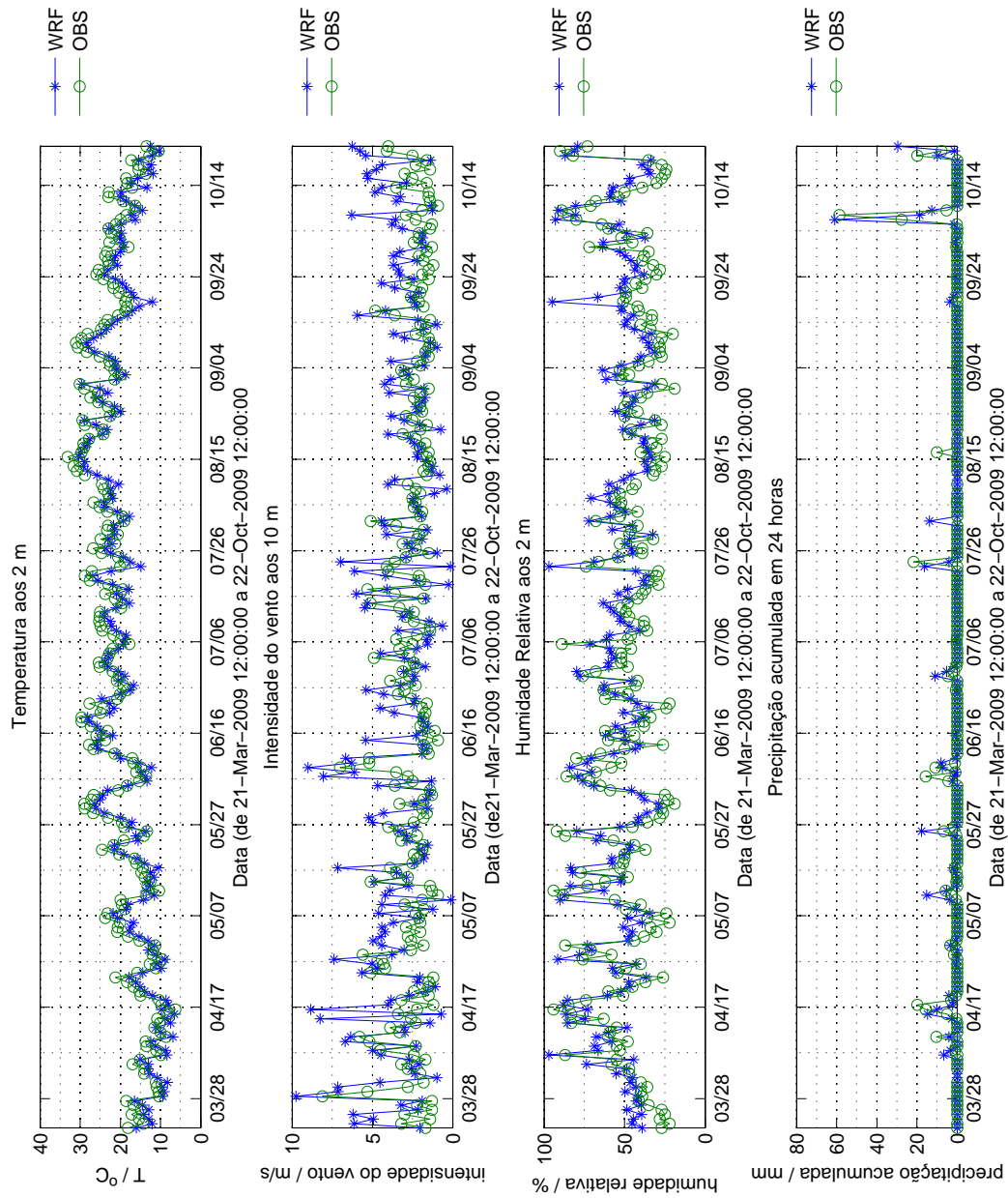


Figura E.27: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 567 (Vila Real/C.C.).

EMA 568: Penhas Douradas / Observatório

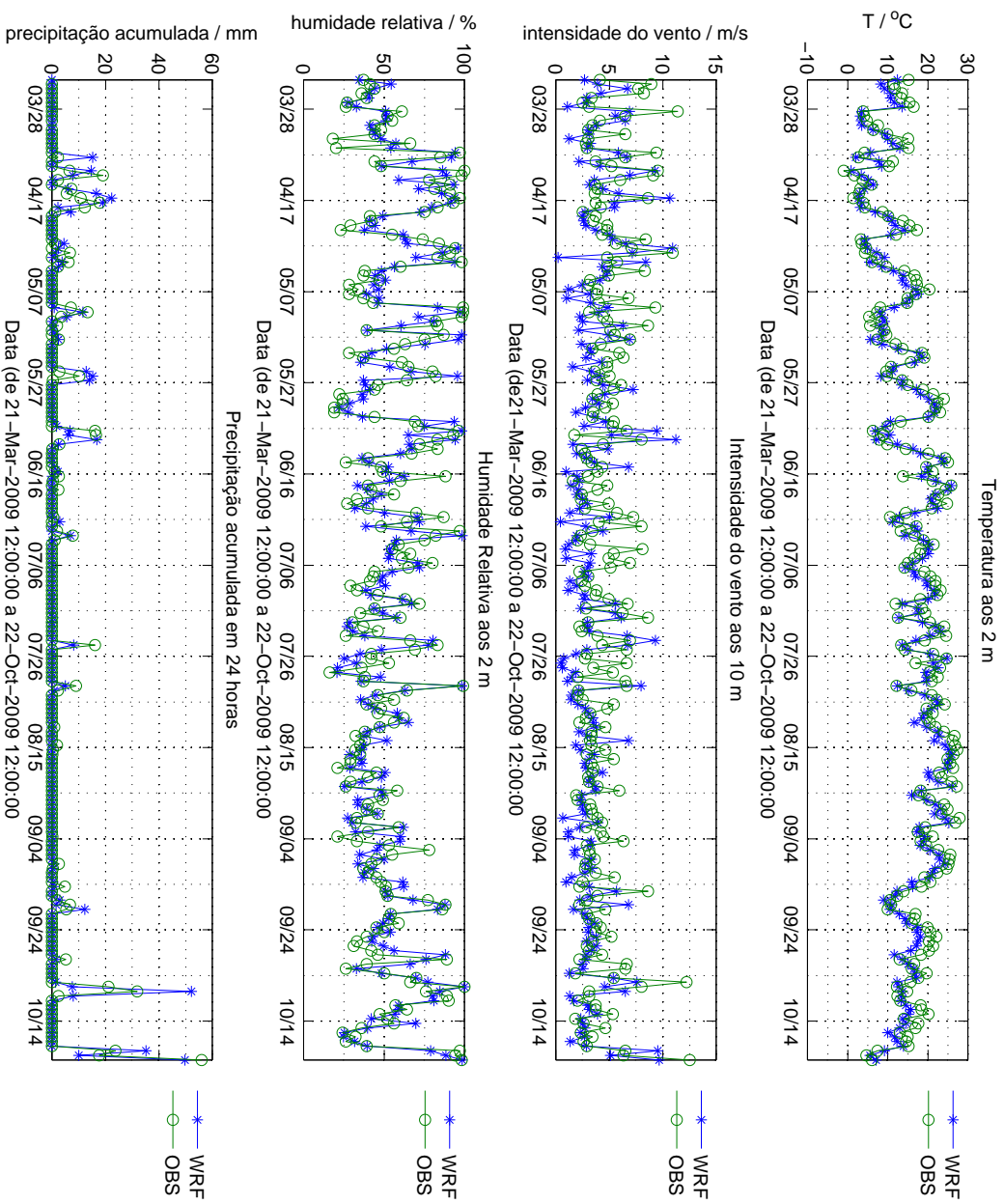


Figura E.28: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 568 (Penhas Douradas/Observatório).

EMA 570: Castelo Branco / C. C.

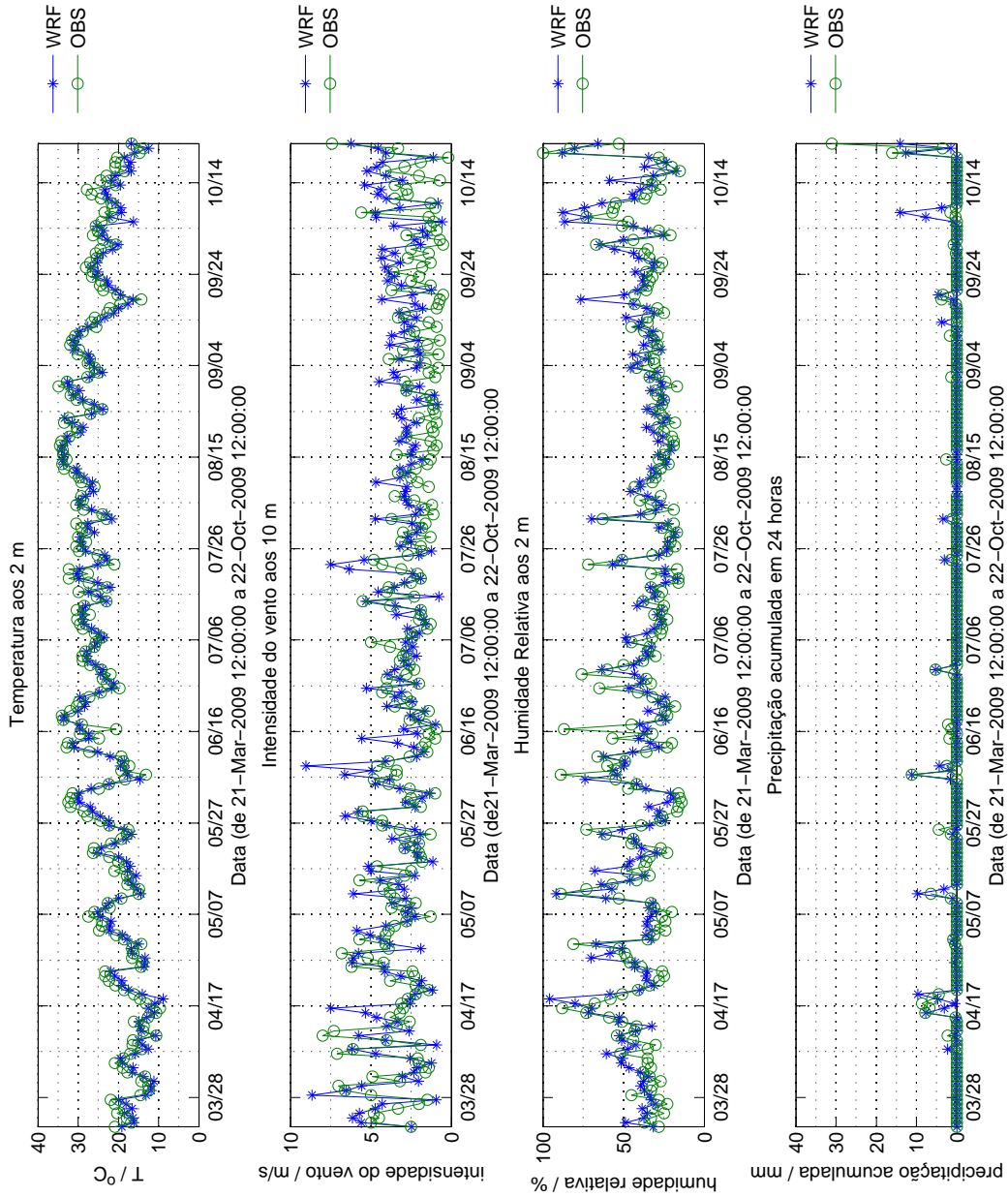


Figura E.29: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 570 (Castelo Branco/C.C.).

EMA 571 : Portalegre / C. C.

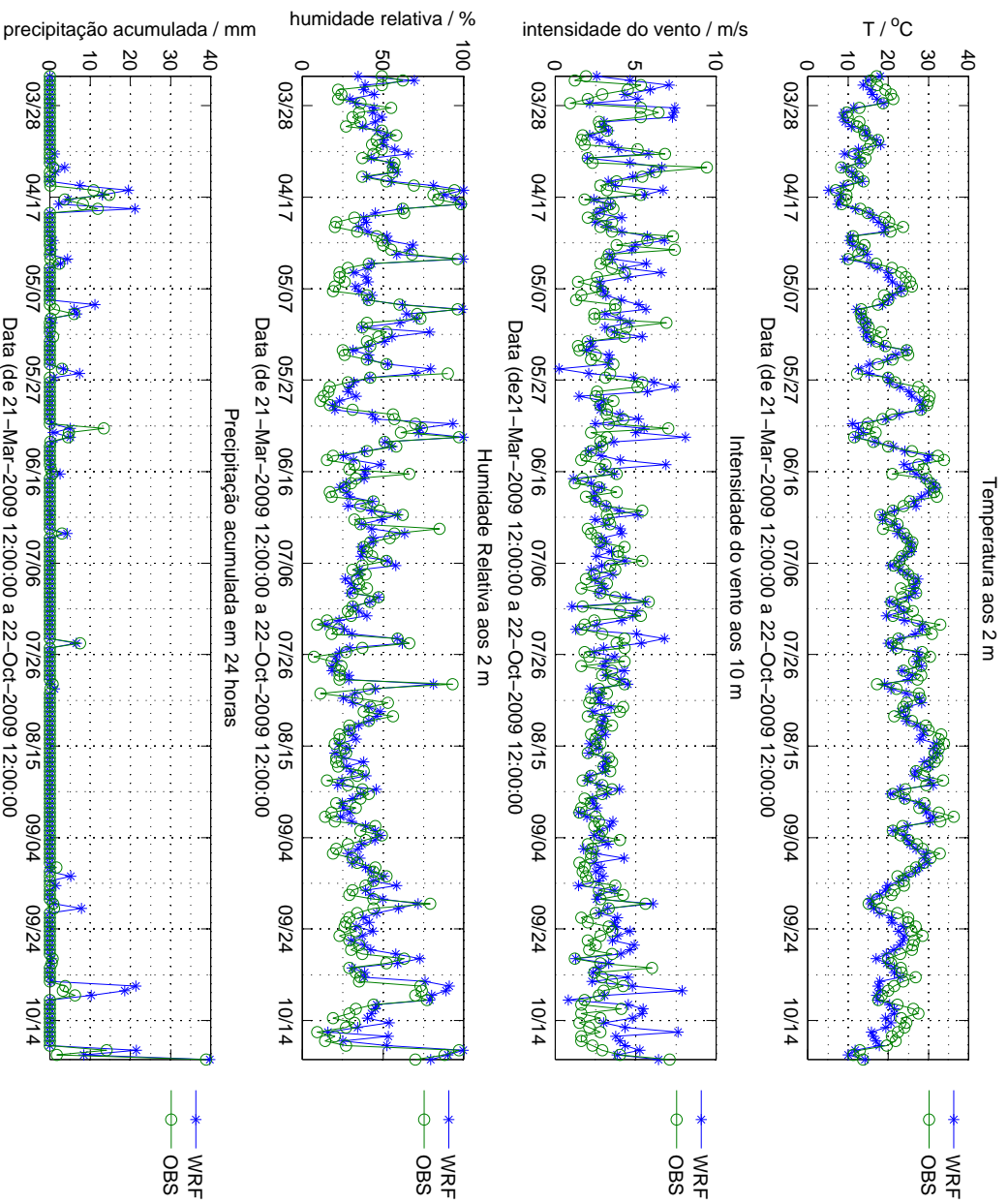


Figura E.30: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 571 (Portalegre/C.C.).

EMA 575: Bragança / C. C.

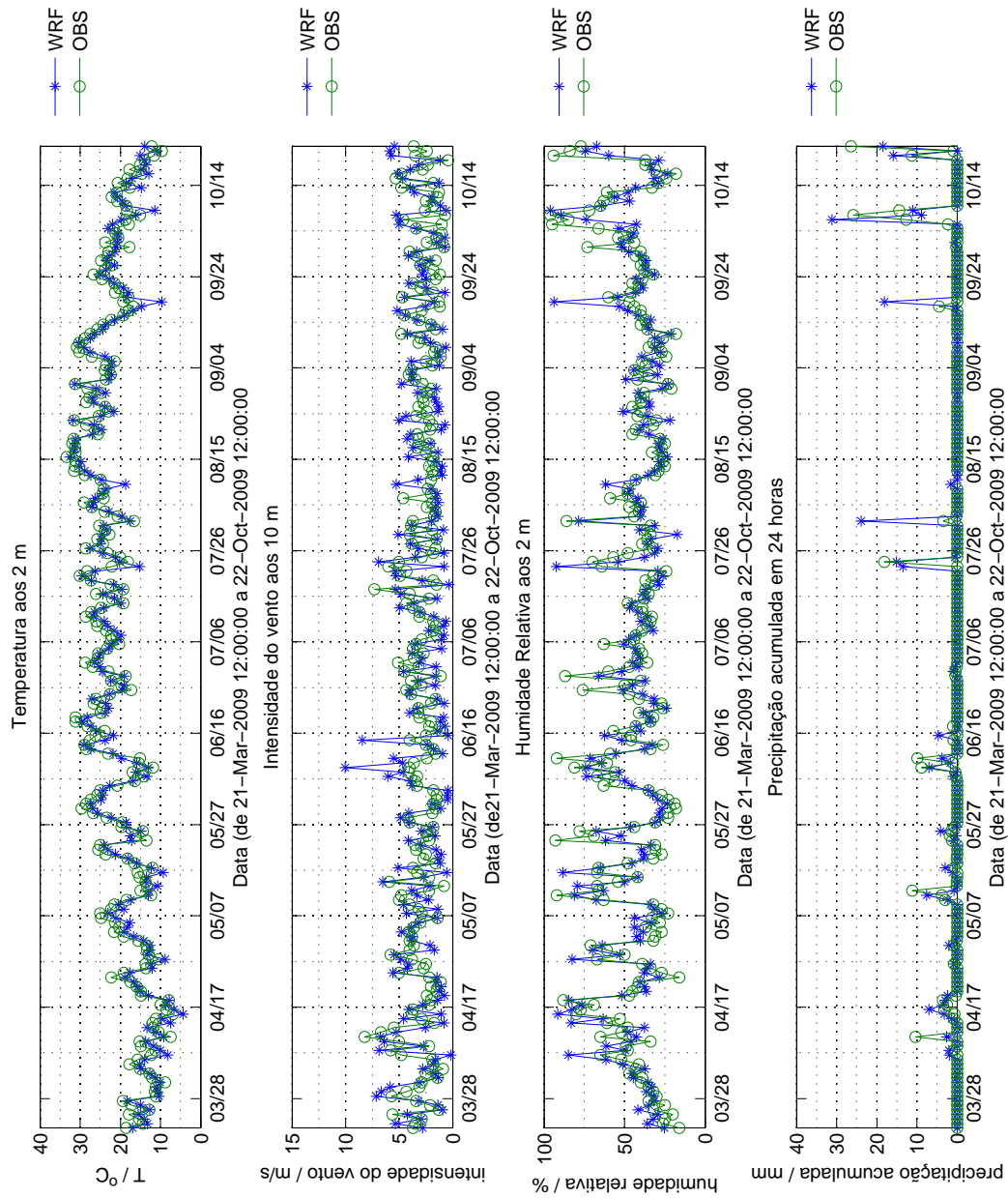


Figura E.31: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 575 (Bragança/C.C.).

EMA 579: Lisboa / Gago Coutinho

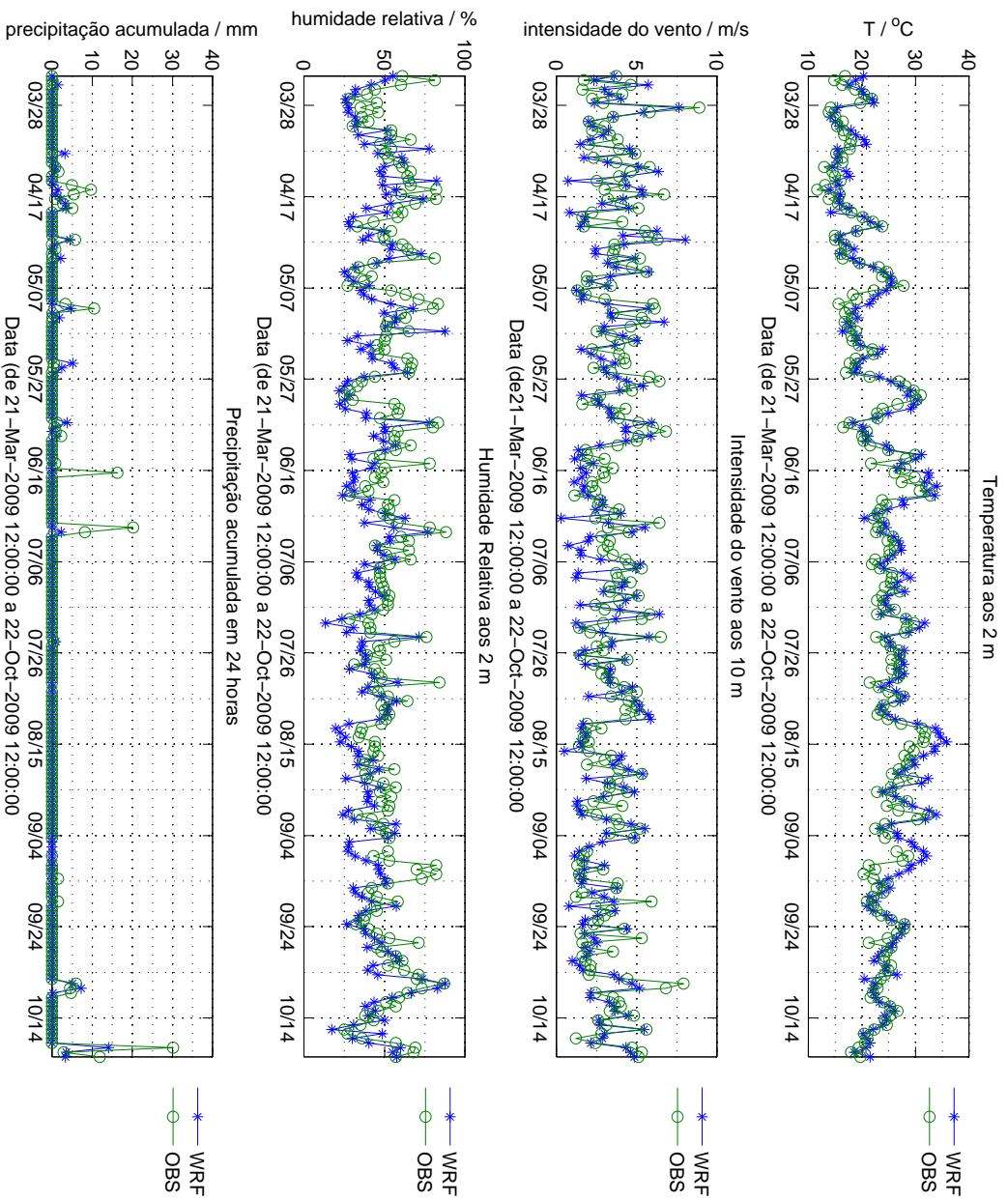


Figura E.32: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 579 (Lisboa/Gago Coutinho).

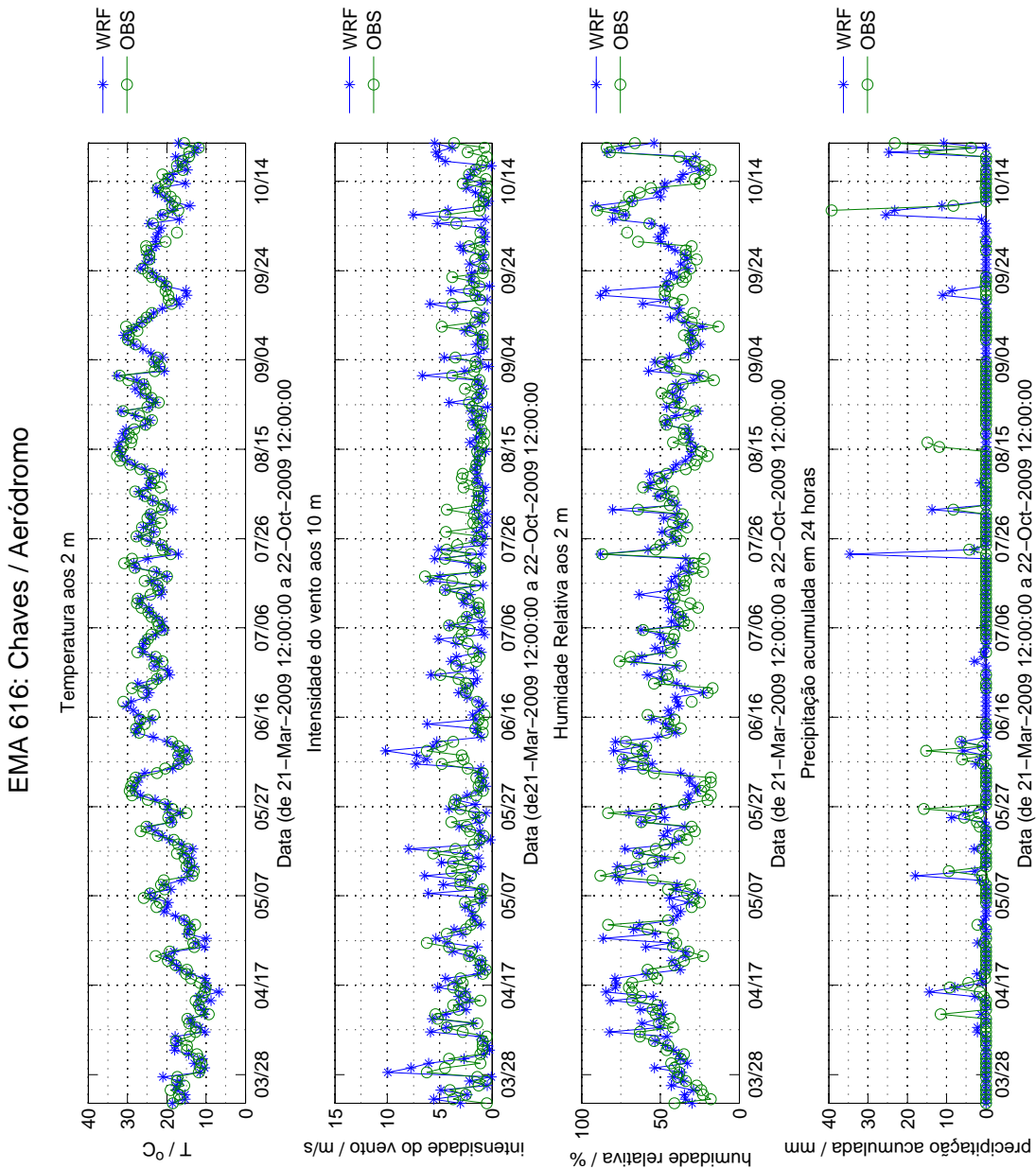


Figura E.33: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 616 (Chaves/Aeródromo).

EMA 687: Covilhã / Aeródromo

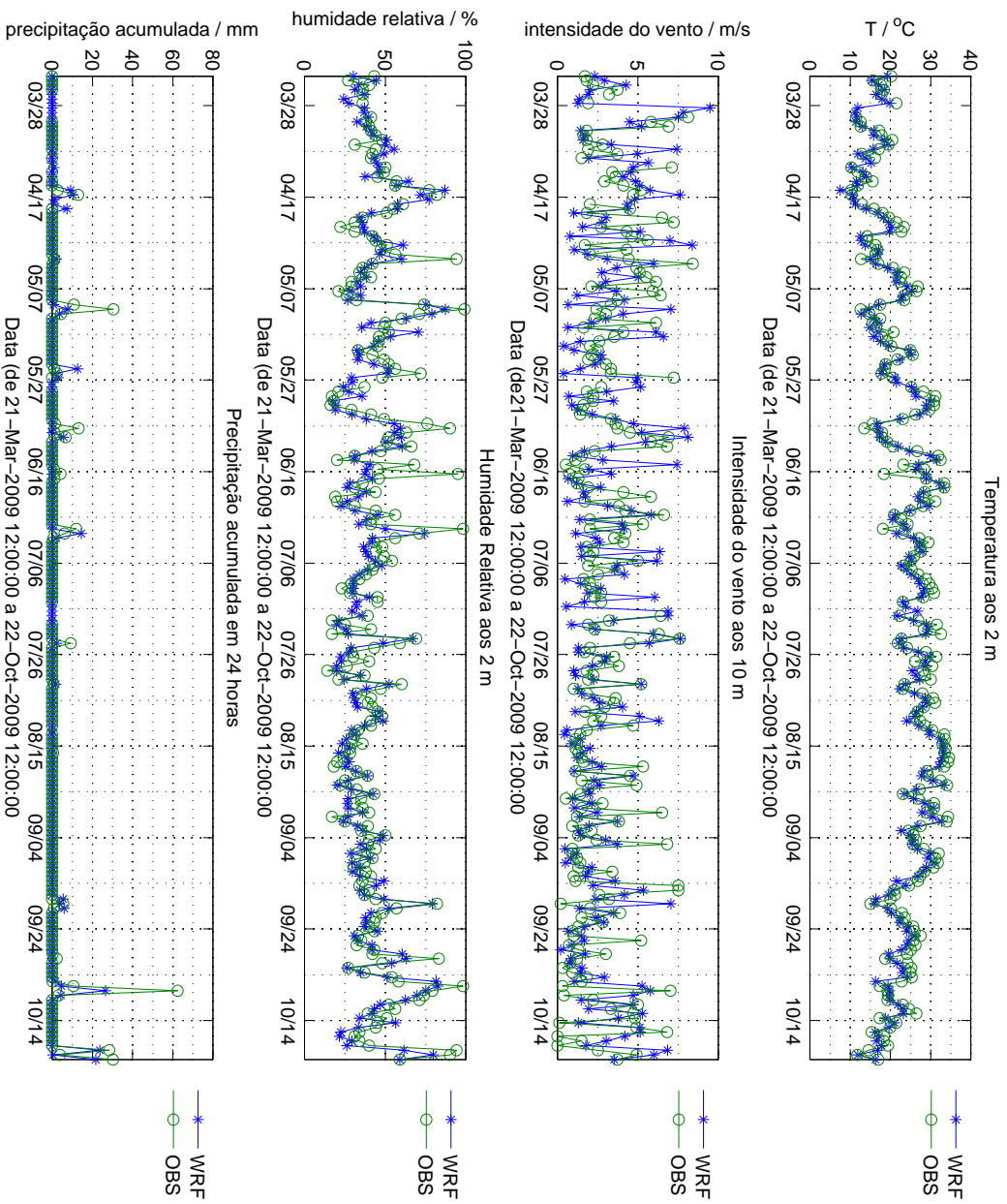


Figura E.34: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 687 (Covilhã/Aeródromo).

Apêndice F

Comparação entre dados observados e dados simulados, para 2010

Nas figuras que a seguir se representam, pretende-se ilustrar uma comparação directa entre os resultados simulados pelo WRF a 24 horas e os correspondentes dados observacionais, que estiveram na base do cálculo das medidas de erro apresentadas no capítulo 7. Assim, nas figuras F.1 a F.16 ilustram-se as comparações entre os dados de temperatura, intensidade do vento, humidade relativa e precipitação acumulada nas últimas 24 horas obtidos mediante previsão a 24 horas e respectivos dados observados. Nas figuras F.17 a F.32 apresenta-se a mesma comparação, a partir dos dados previstos pelo WRF a 48 horas.

EMA 535: Lisboa / Geofísico

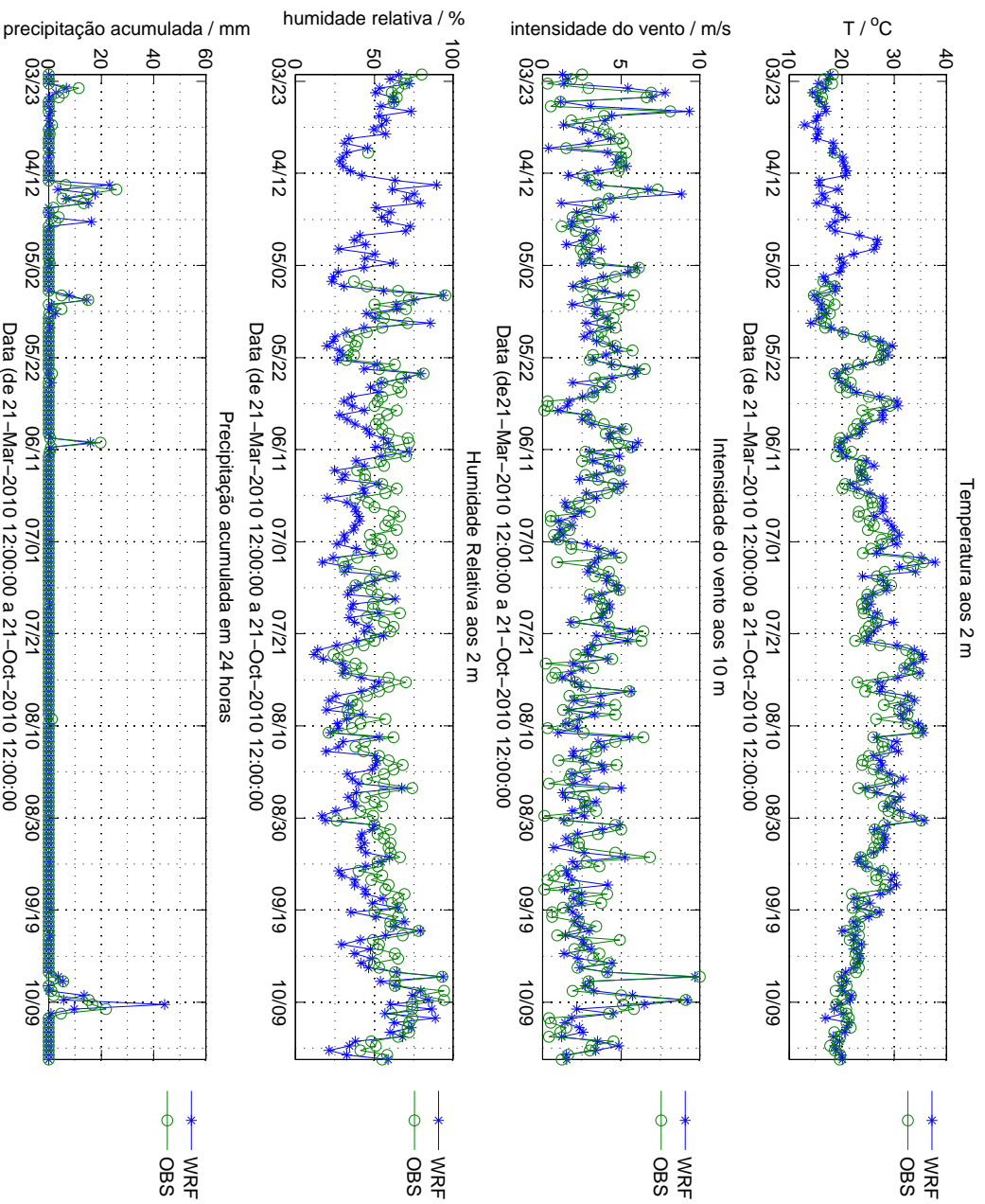


Figura F.1: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 535 (Lisboa / Geofísico).

EMA 541: Sines / Monte dos Chãos

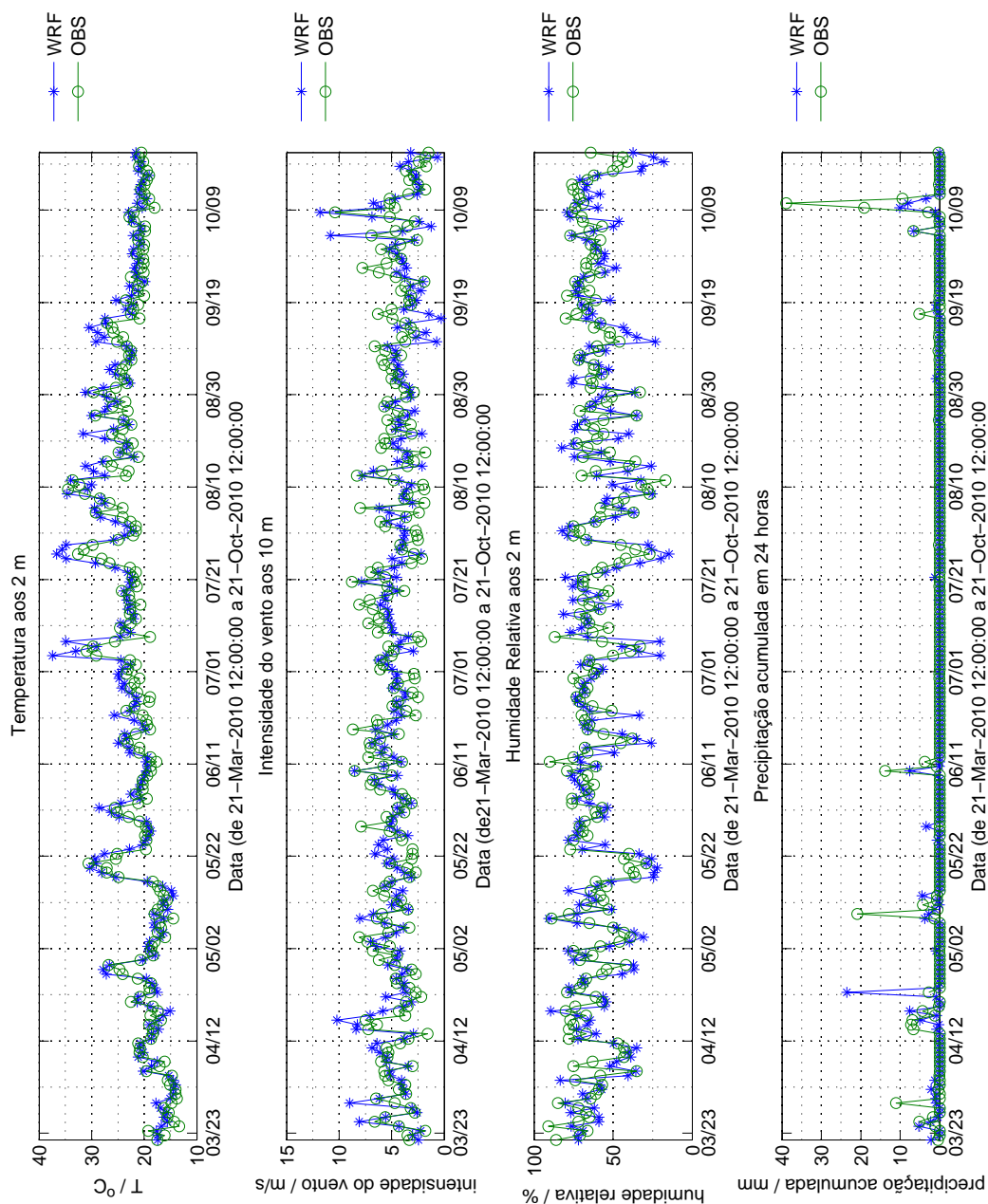


Figura F.2: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 541 (Sines/Monte dos Chãos).

EMA 545: Porto / Pedras Rubras (Aeroporto)

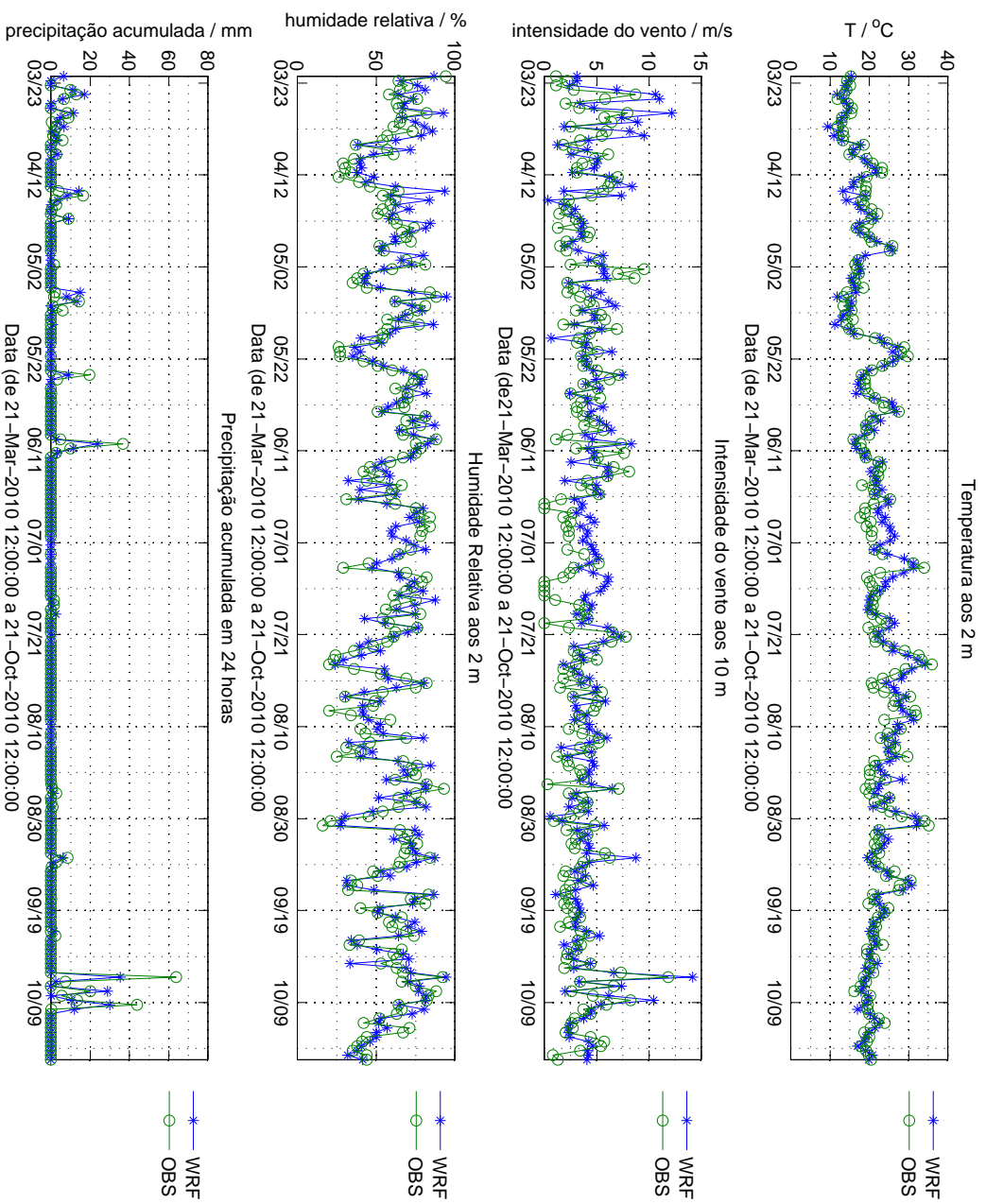


Figura F.3: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 545 (Porto/Pedras Rubras).

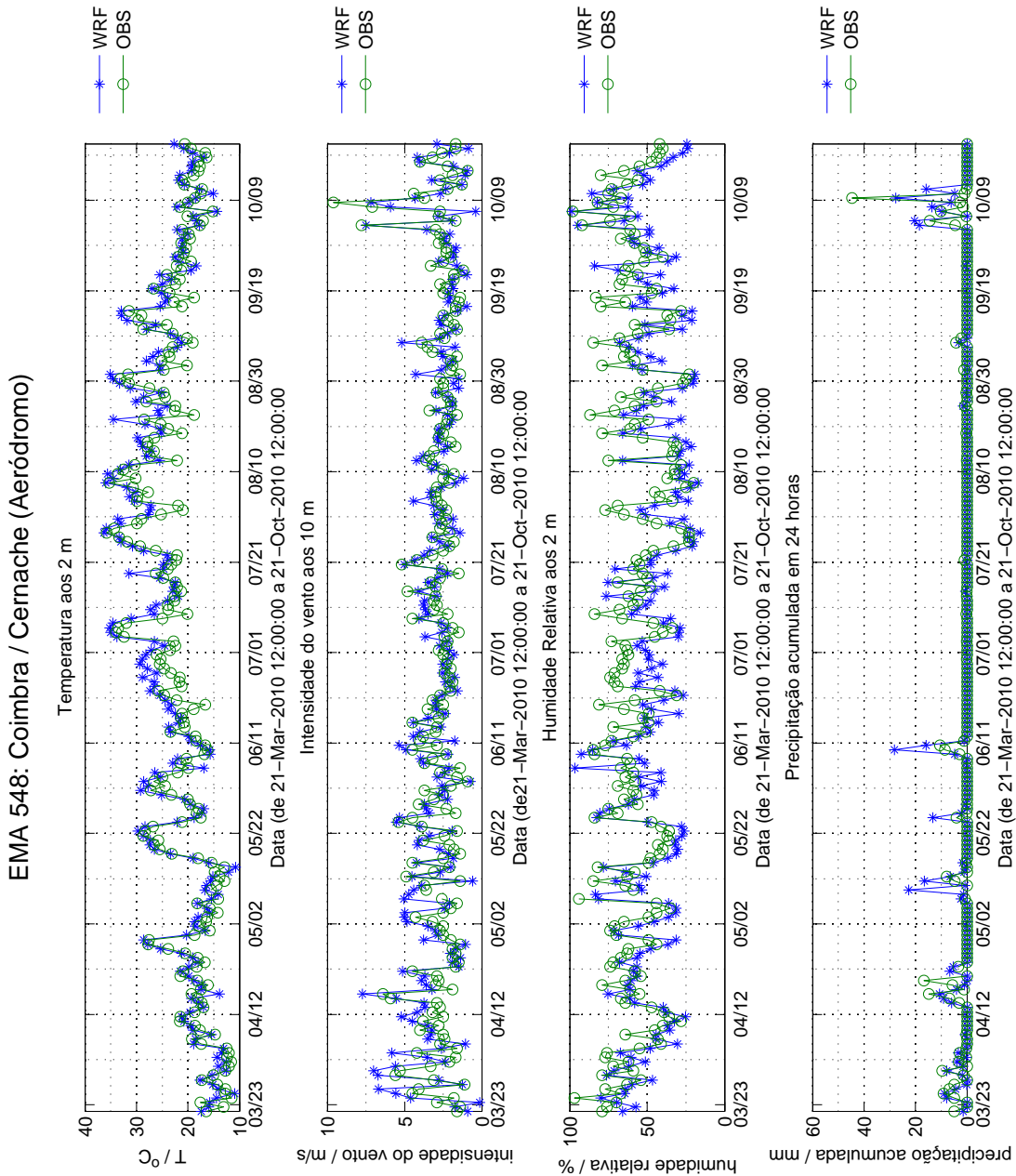


Figura F.4: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 548 (Coimbra/Cernache).

EMA 551 : Viana do Castelo / Chafé

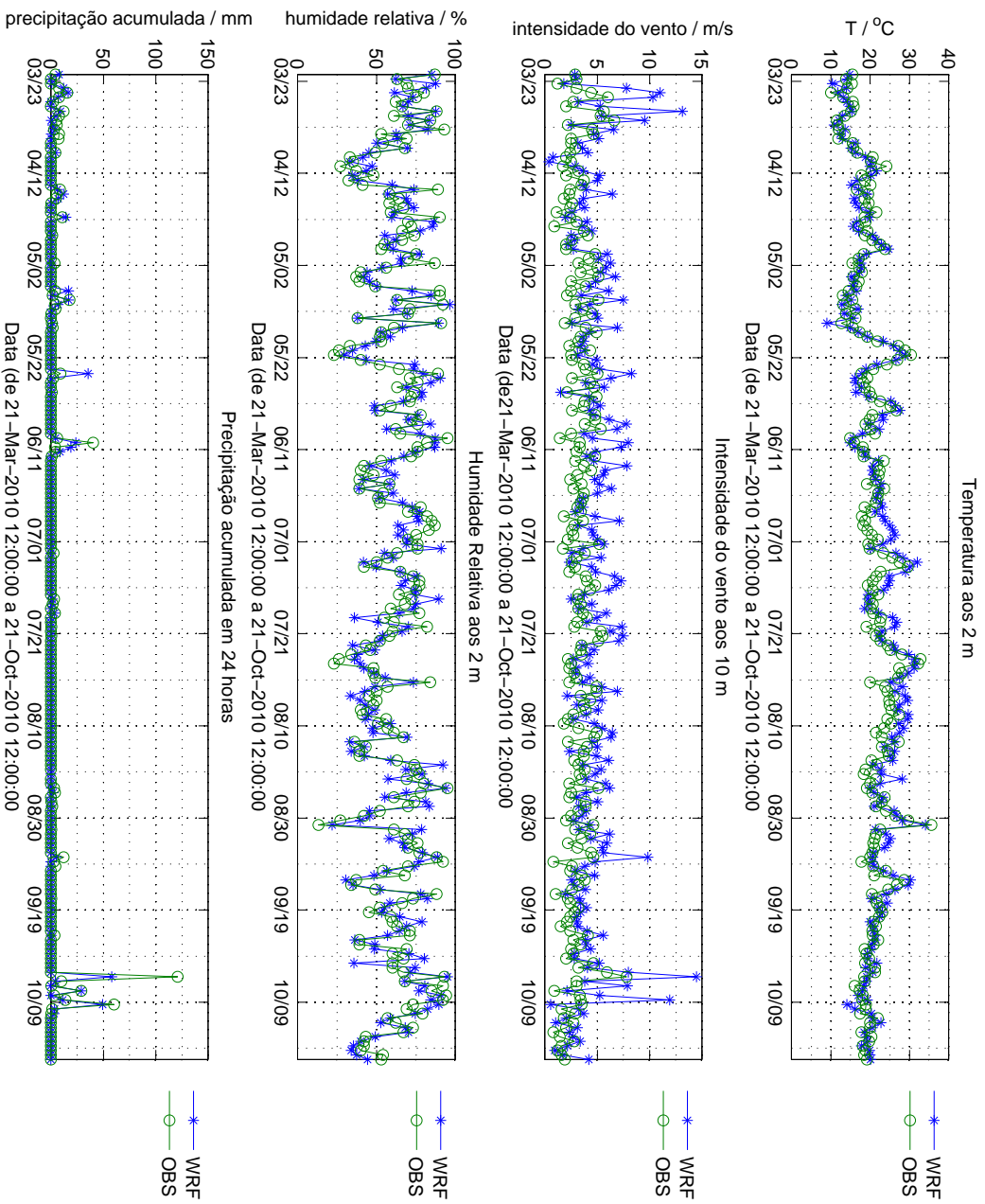


Figura F.5: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 551 (Viana do Castelo/Chafé).

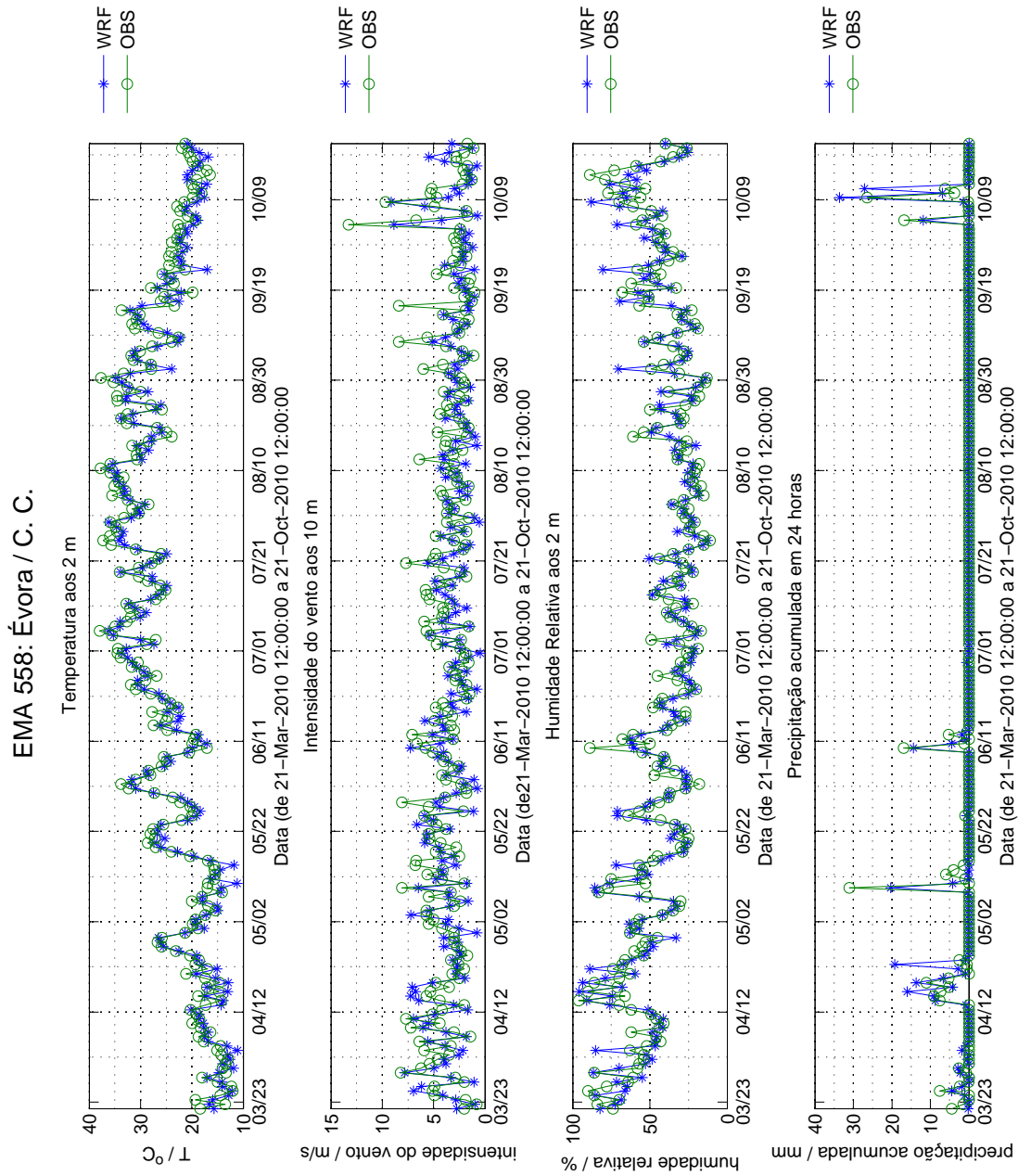


Figura F.6: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 558 (Évora/C.C.).

EMA 560: Viseu / C. C.

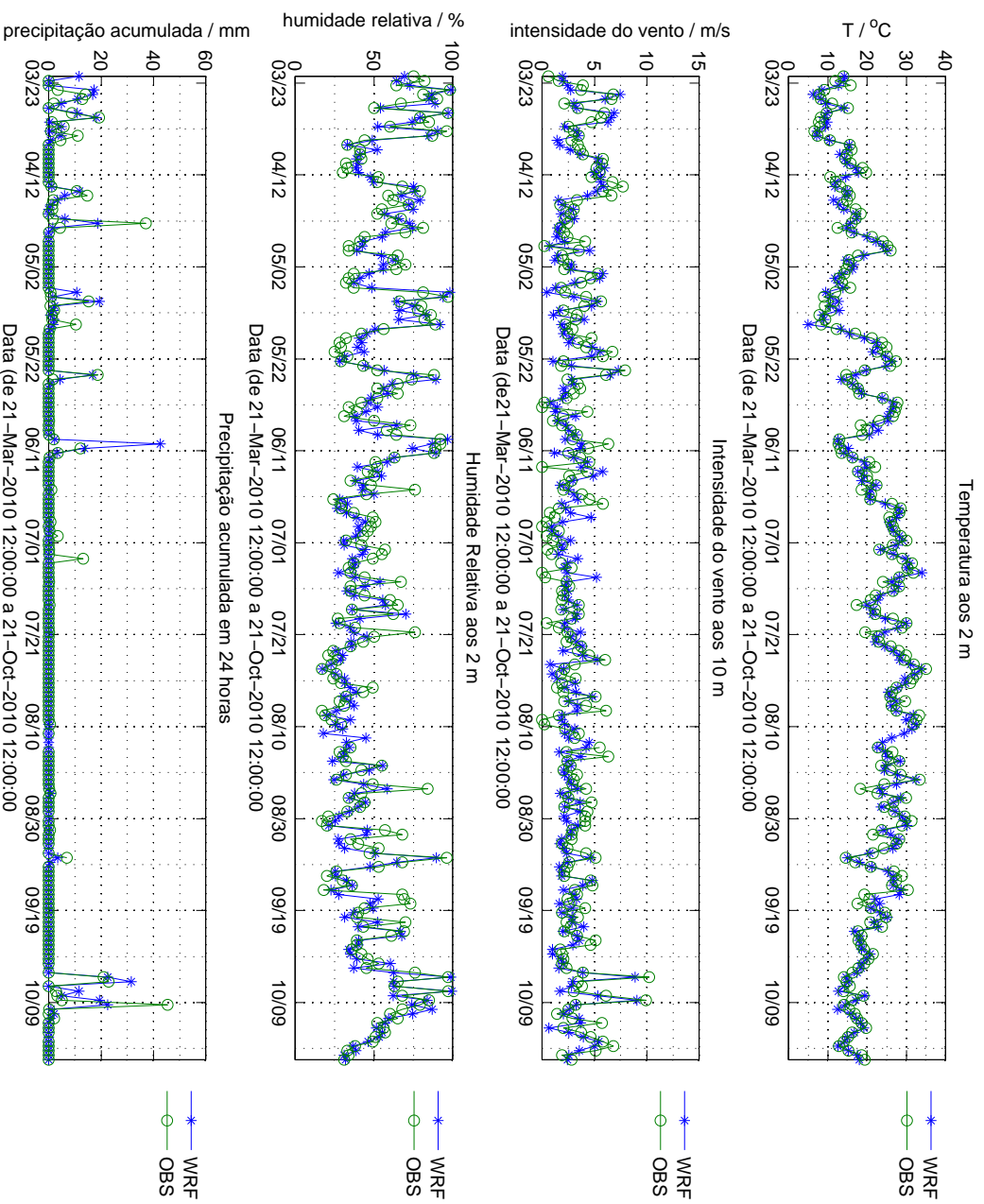


Figura F.7: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 560 (Viseu/C.C.).

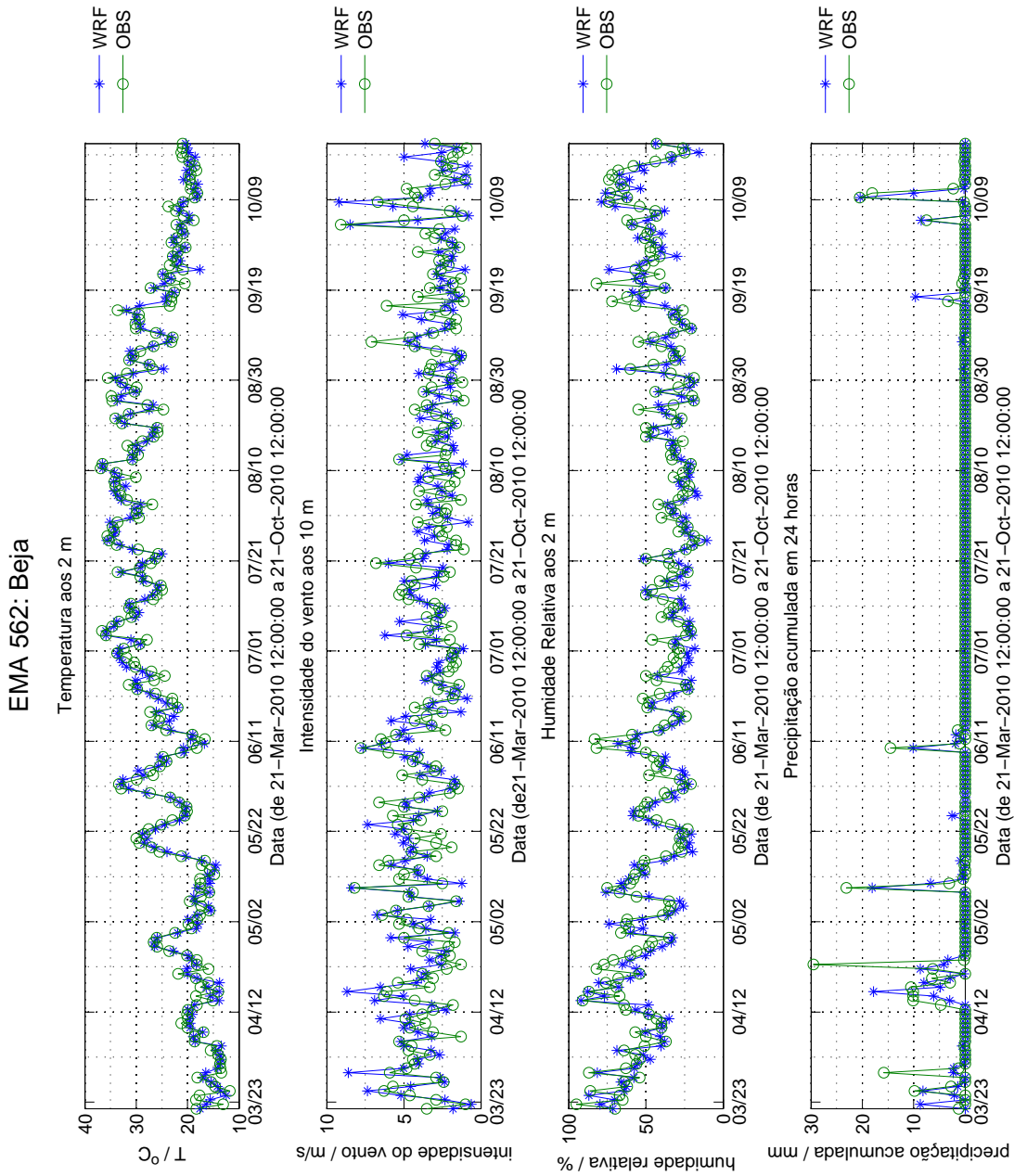


Figura F.8: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 562 (Beja).

EMA 567: Vila Real / C. C.

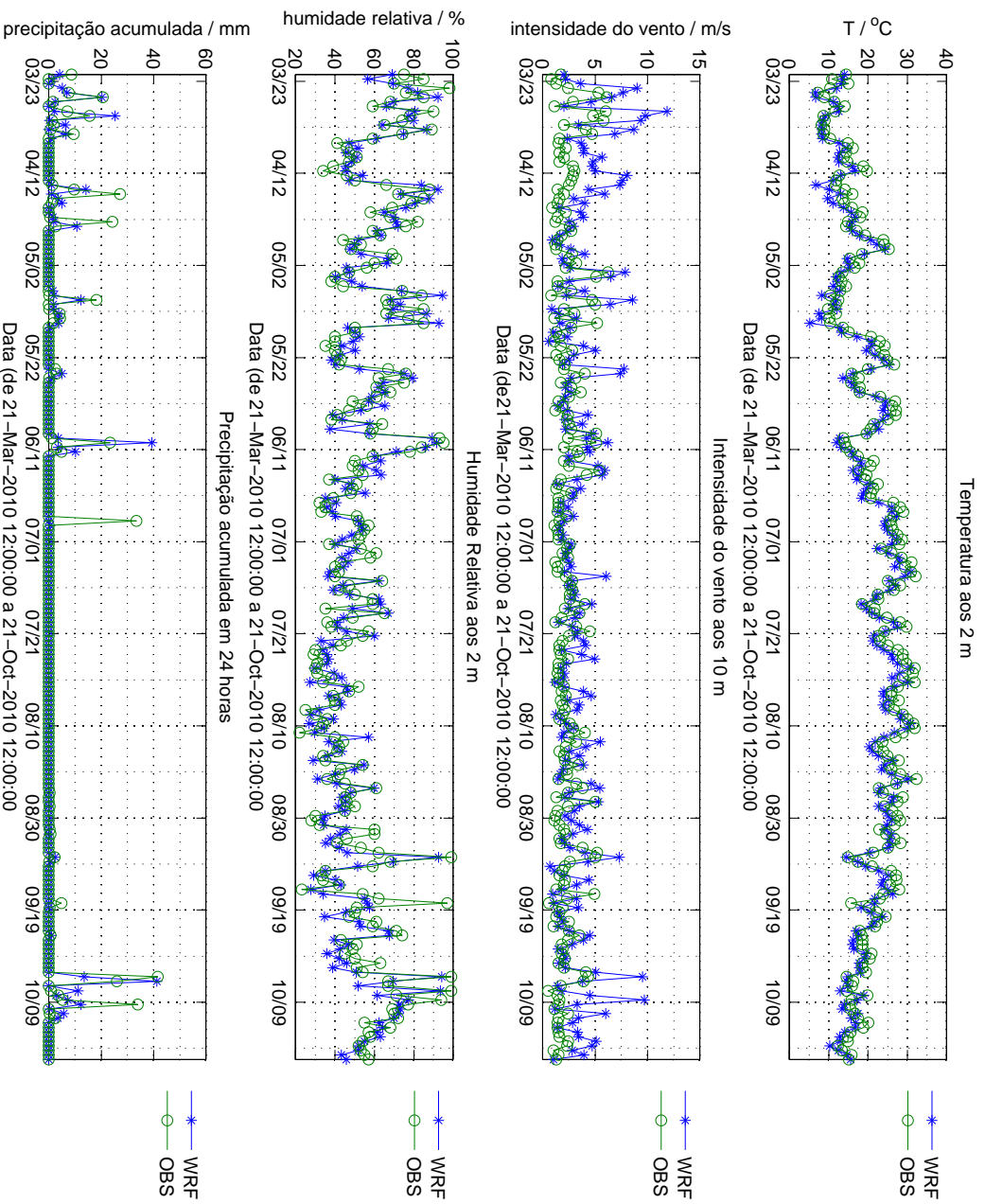


Figura F.9: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 567 (Vila Real/C.C.).

EMA 568: Penhas Douradas / Observatório

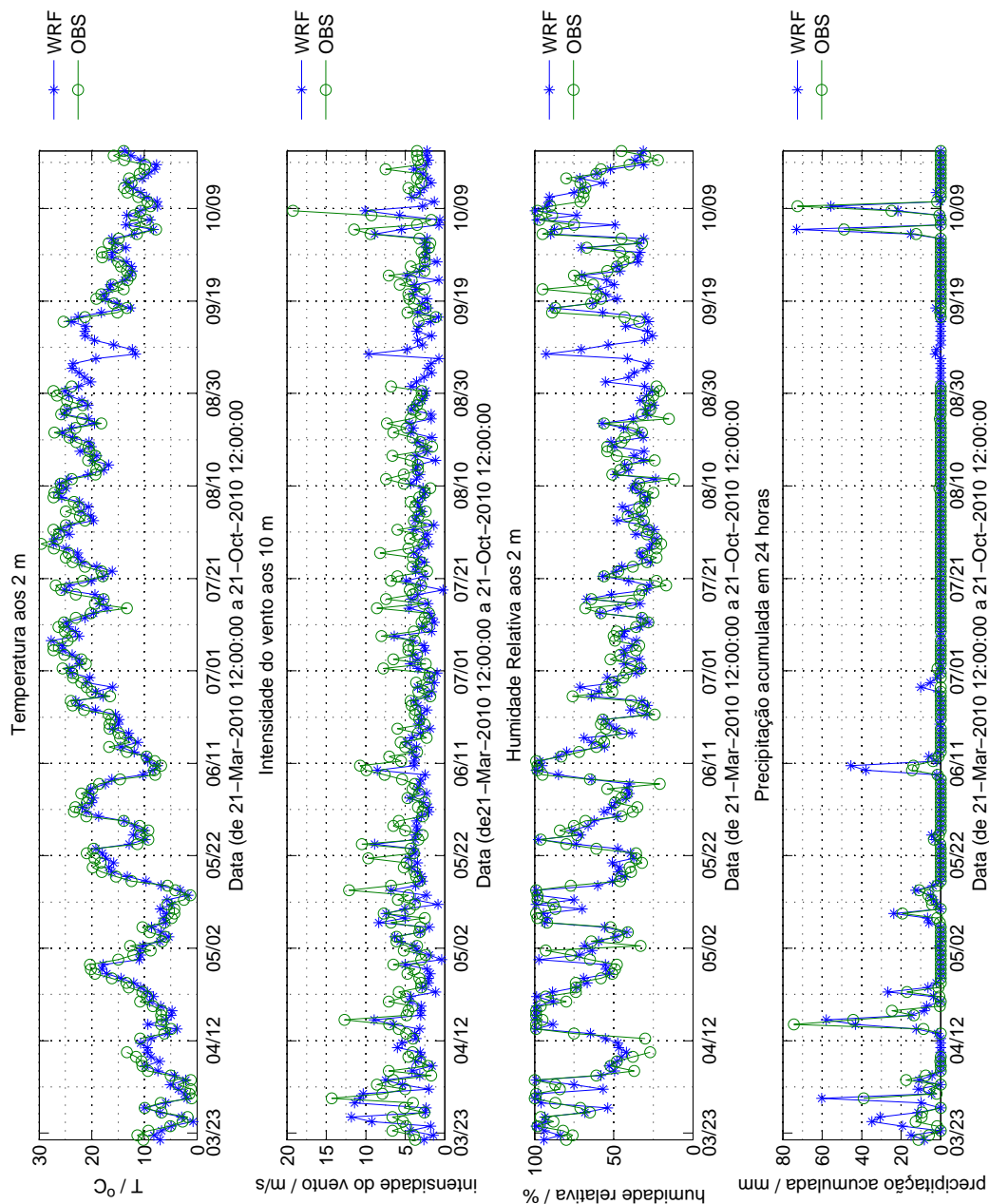


Figura F.10: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 568 (Penhas Douradas/Observatório).

EMA 570: Castelo Branco / C. C.

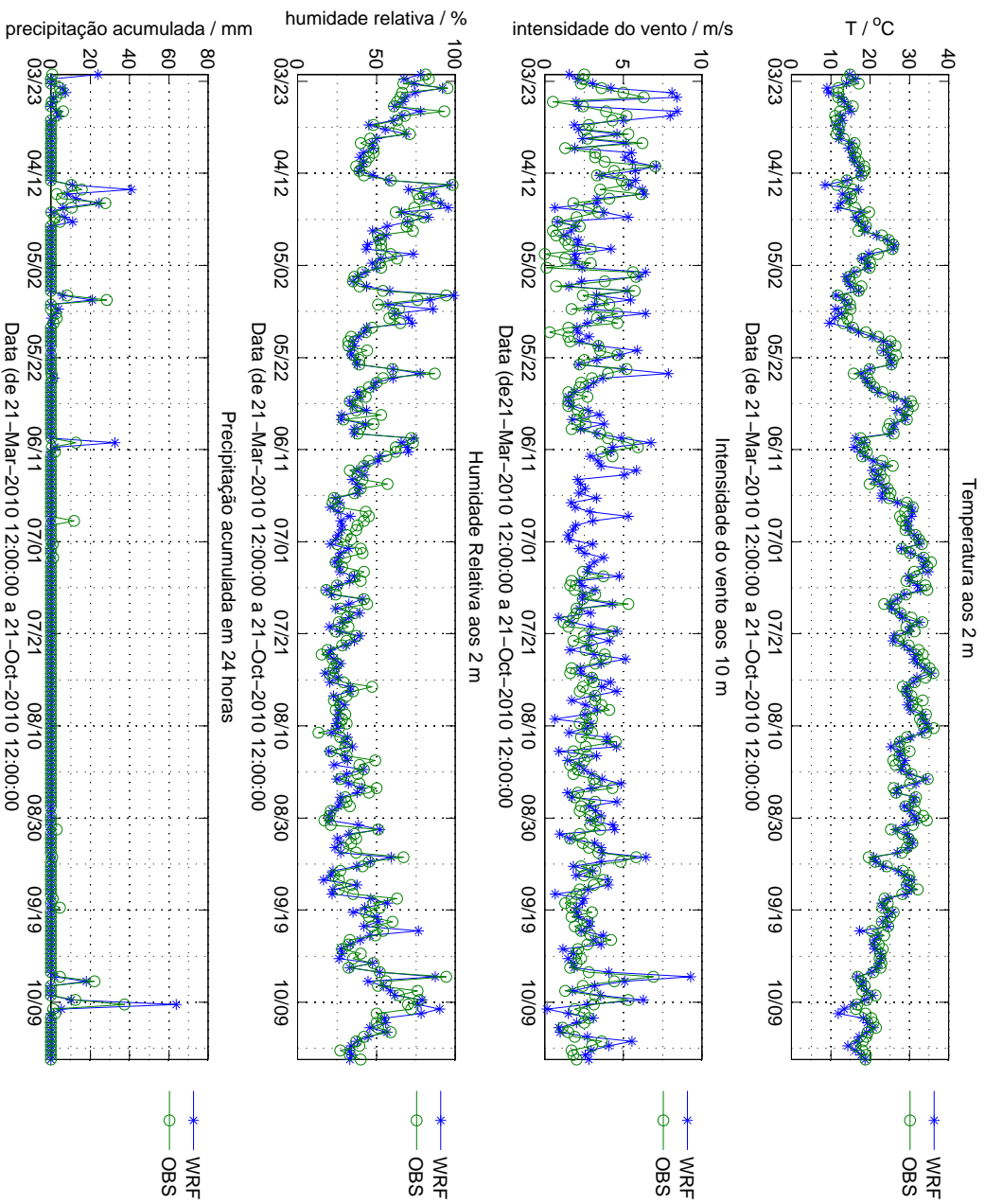


Figura F.11: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 570 (Castelo Branco/C.C.).

EMA 571: Portalegre / C. C.

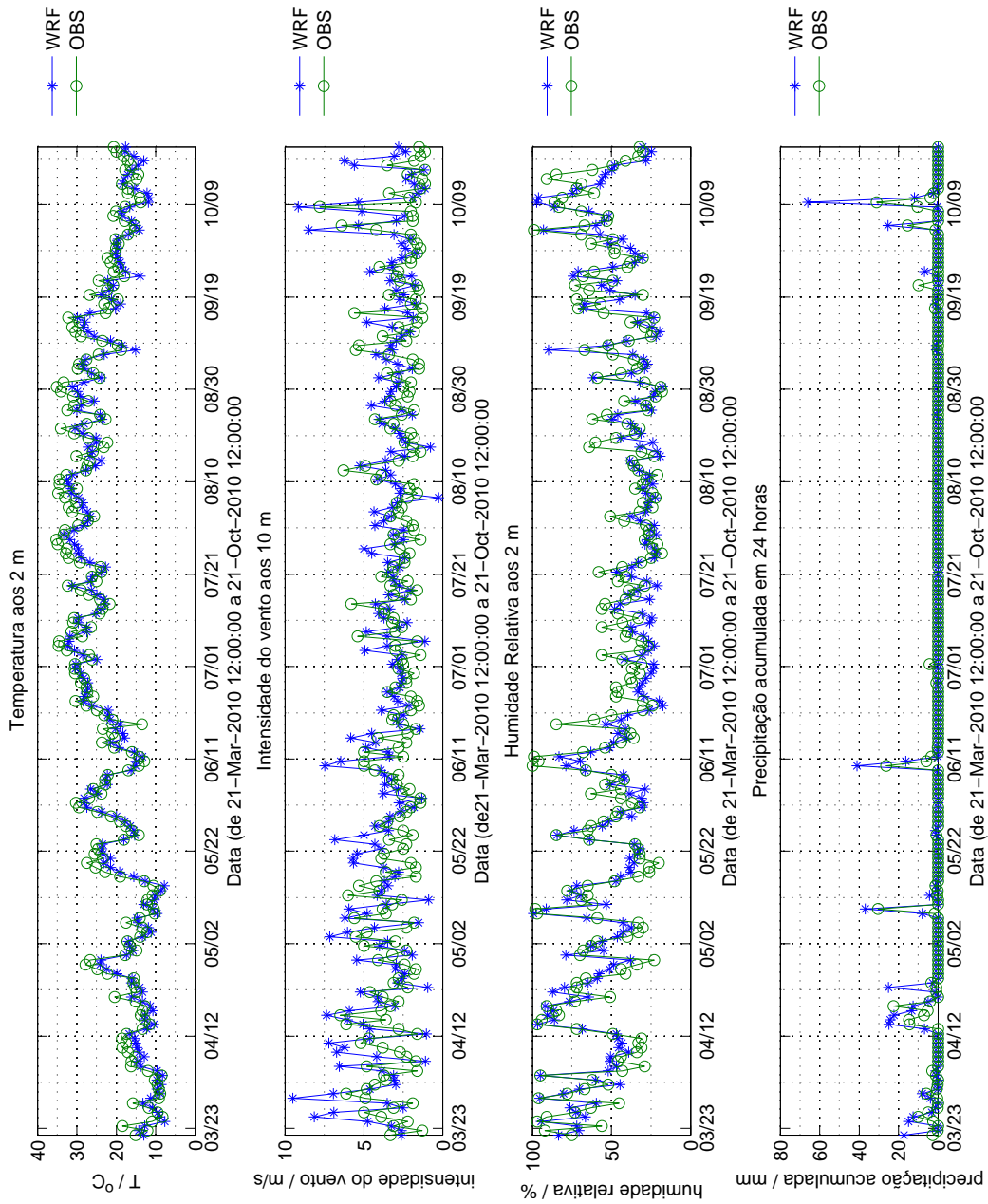


Figura F.12: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 571 (Portalegre/C.C.).

EMA 575: Bragança / C. C.

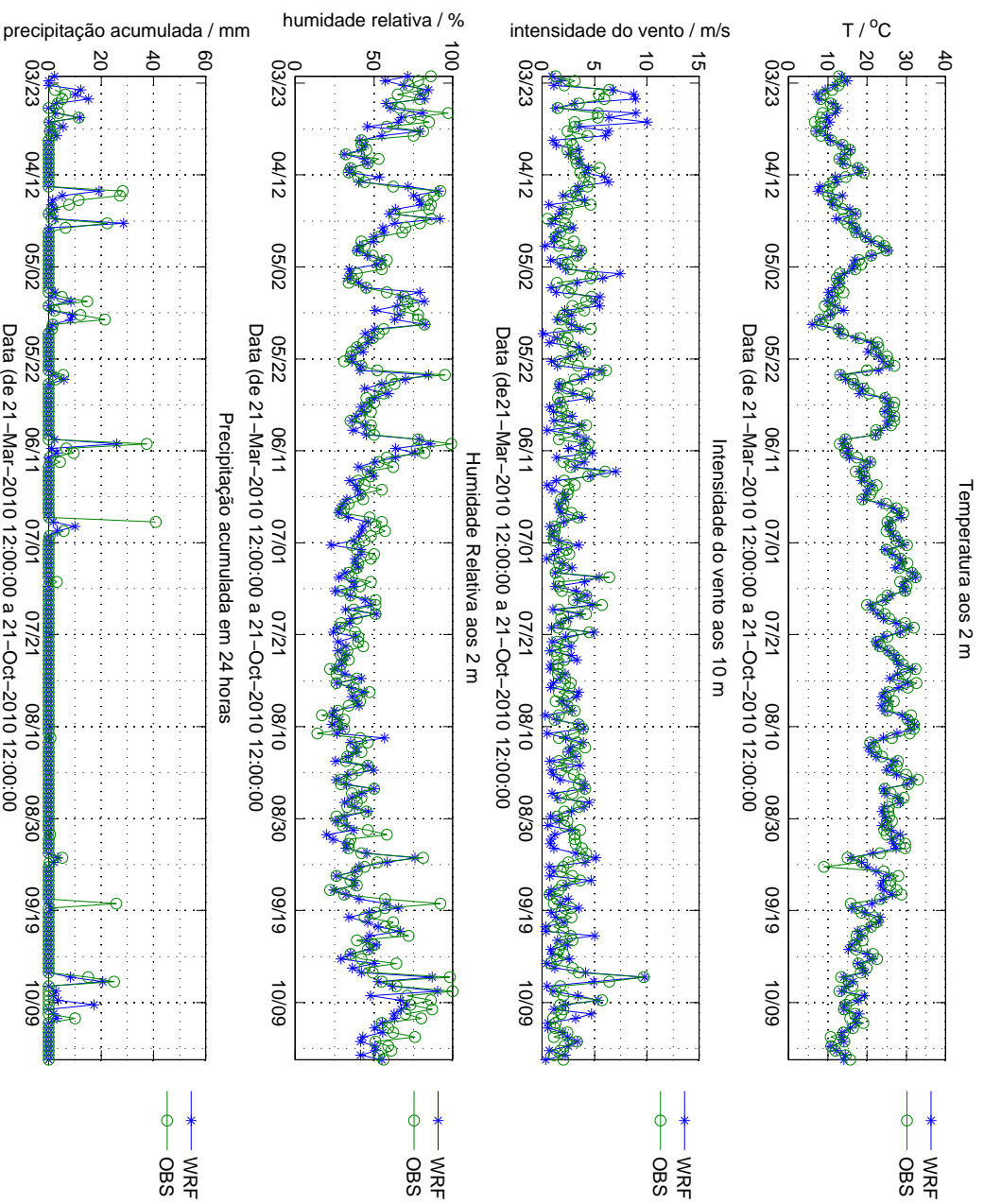


Figura F.13: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 575 (Bragança/C.C.).

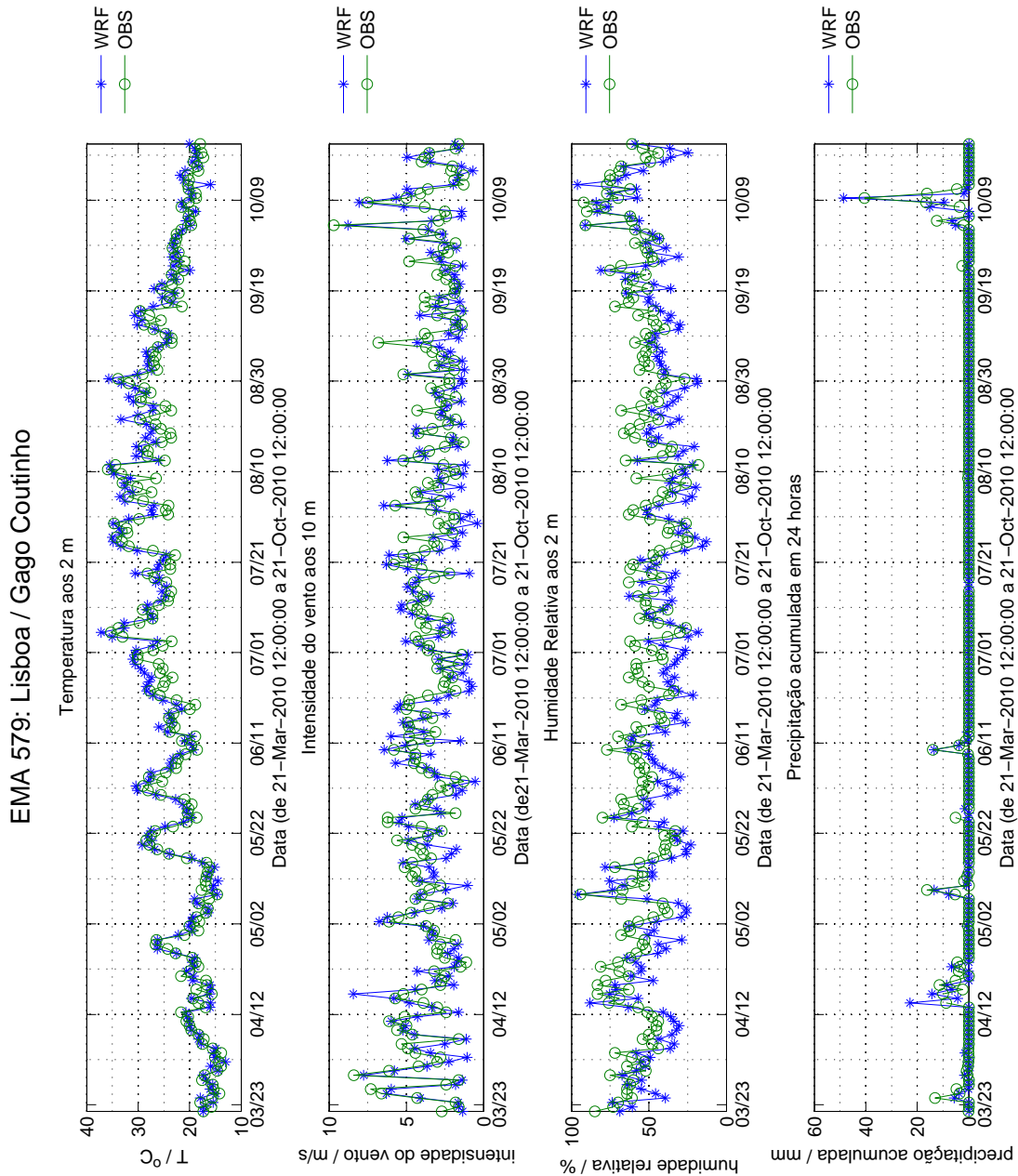


Figura F.14: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 579 (Lisboa/Gago Coutinho).

EMA 616: Chaves / Aeródromo

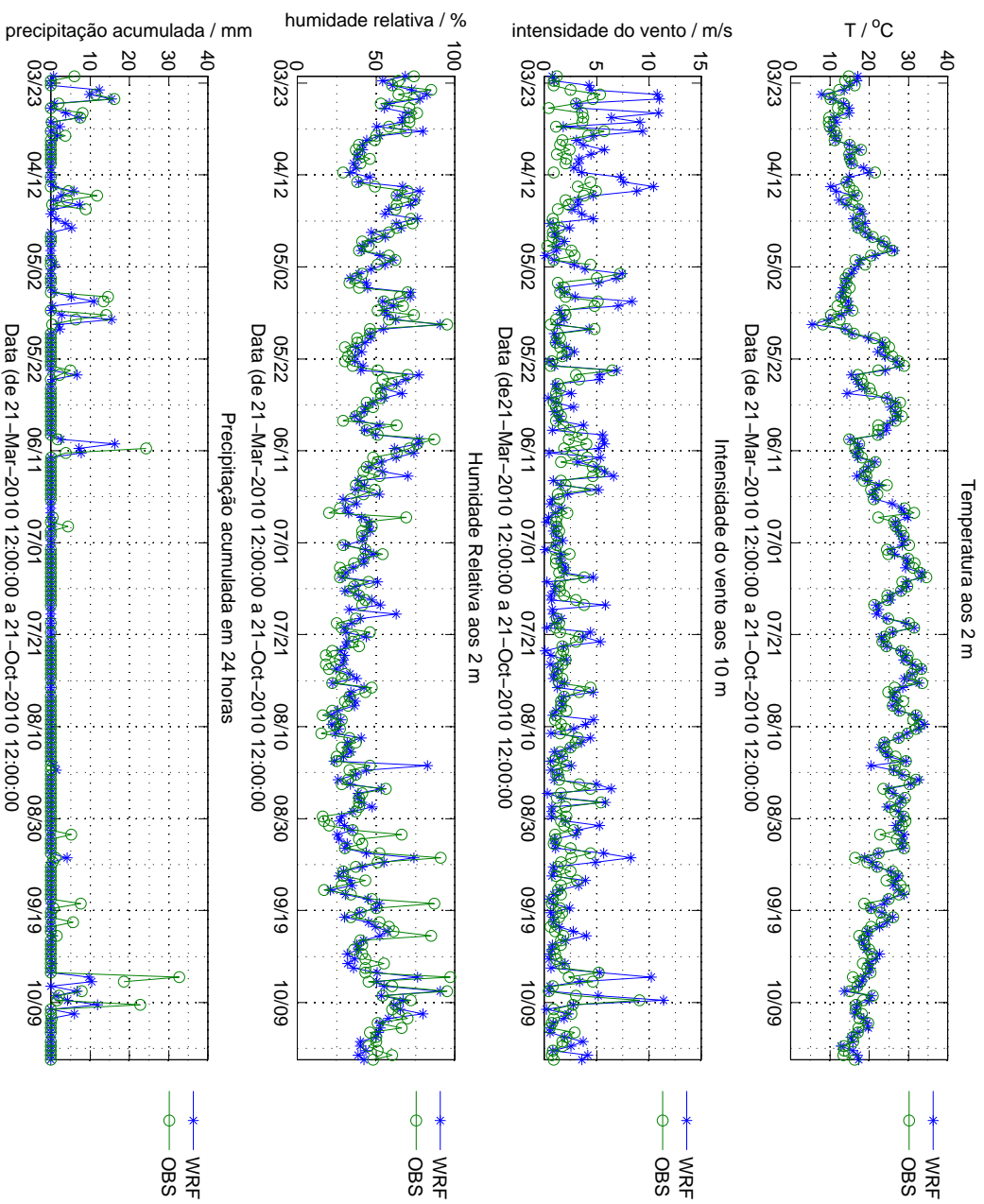


Figura F.15: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 616 (Chaves/Aeródromo).

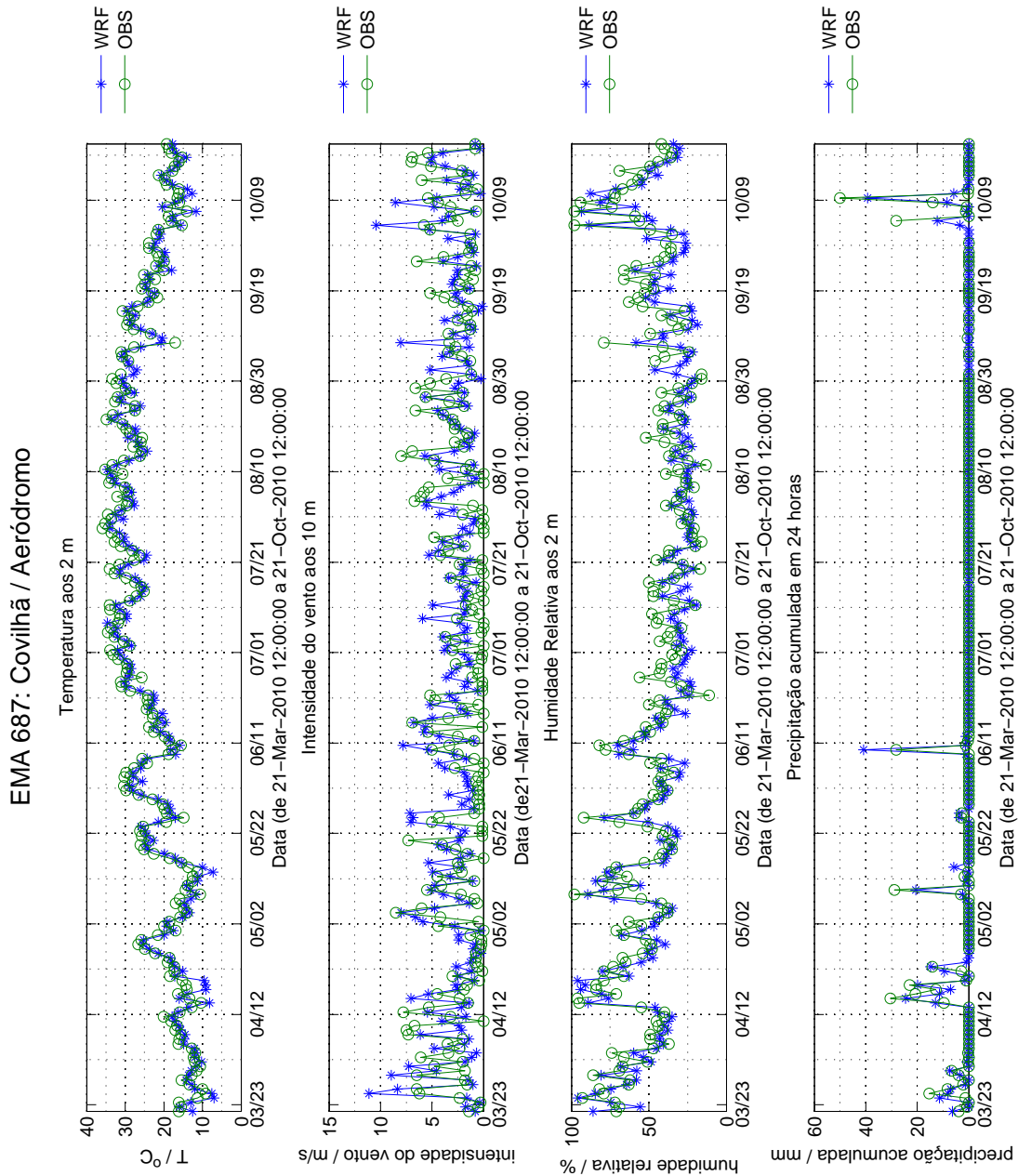


Figura F.16: Comparação entre dados observados e simulados a 24 horas, para a estação meteorológica automática 687 (Covilhã/Aeródromo).

EMA 535: Lisboa / Geofísico

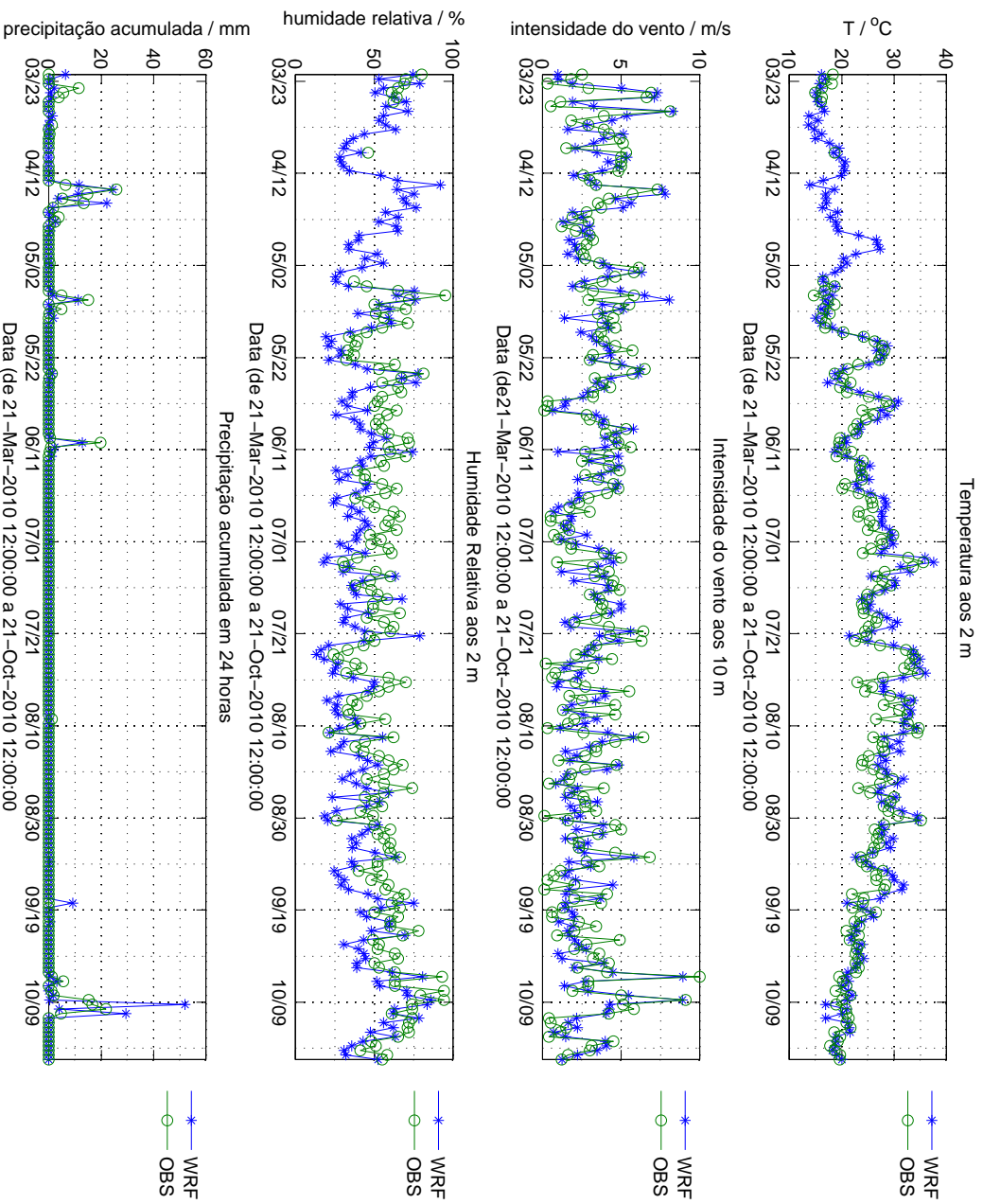


Figura F.17: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 535 (Lisboa / Geofísico).

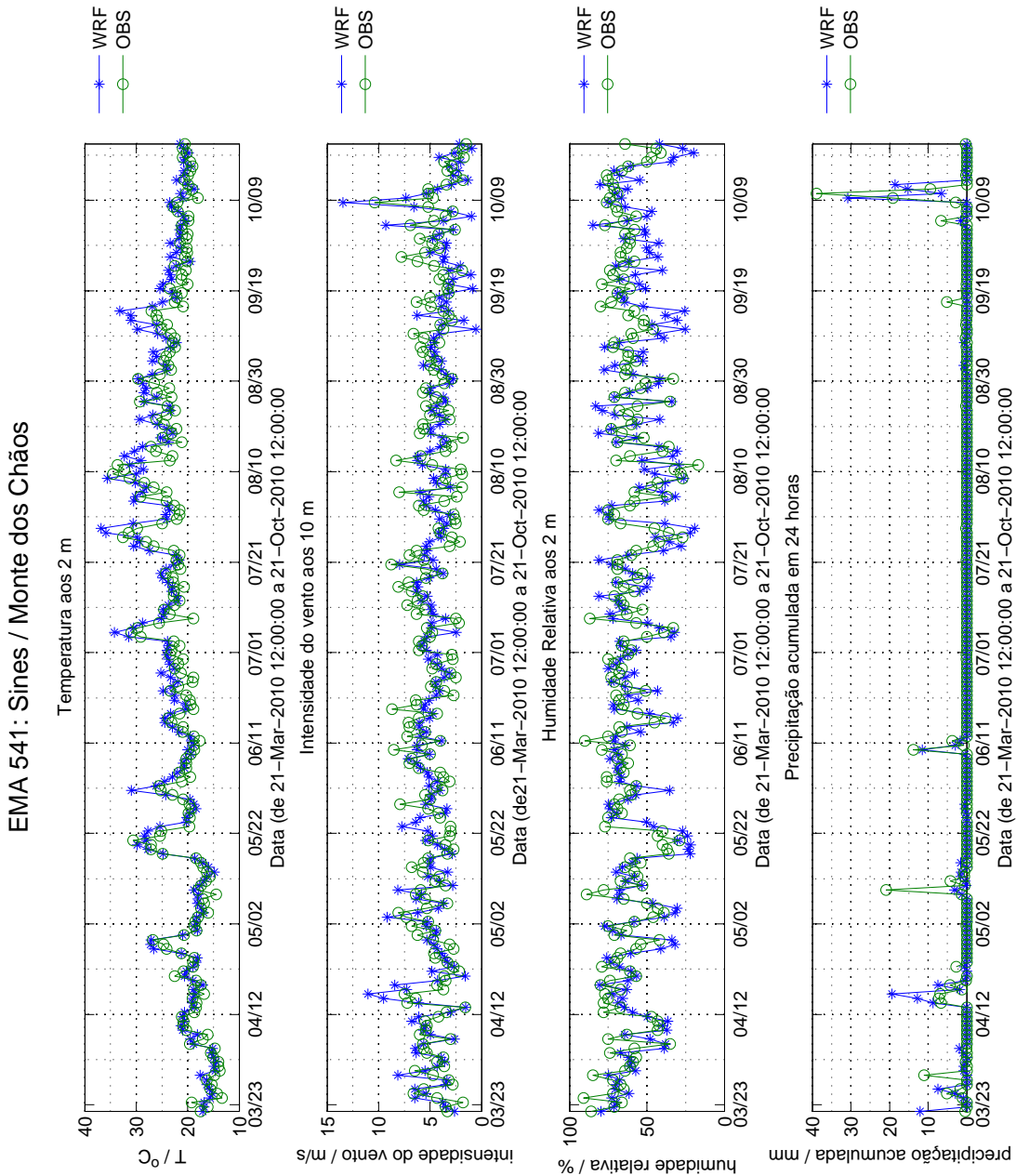


Figura F.18: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 541 (Sines/Monte dos Chãos).

EMA 545: Porto / Pedras Rubras (Aeroporto)

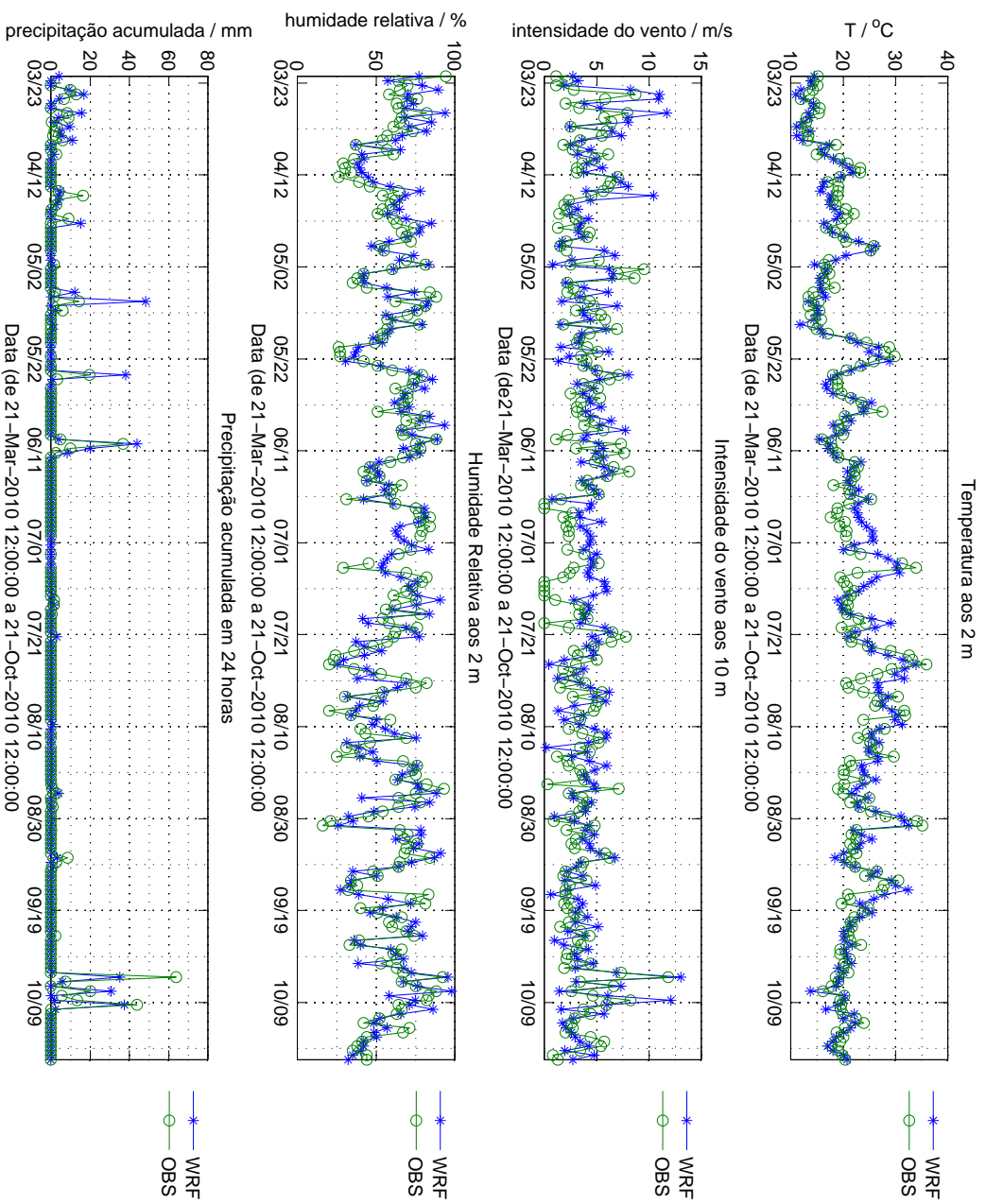


Figura F.19: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 545 (Porto/Pedras Rubras).

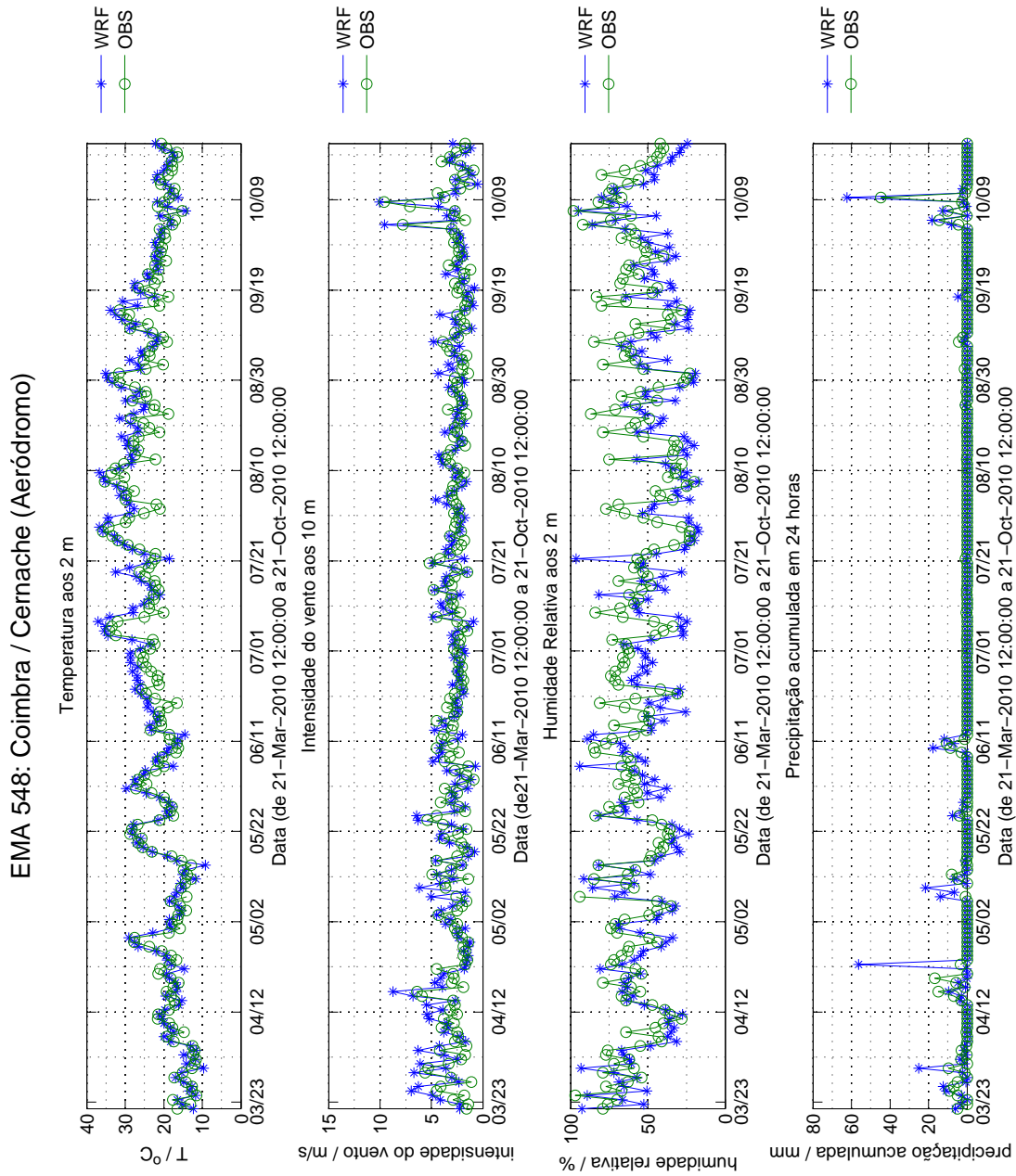


Figura F.20: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 548 (Coimbra/Cernache).

EMA 551 : Viana do Castelo / Chafé

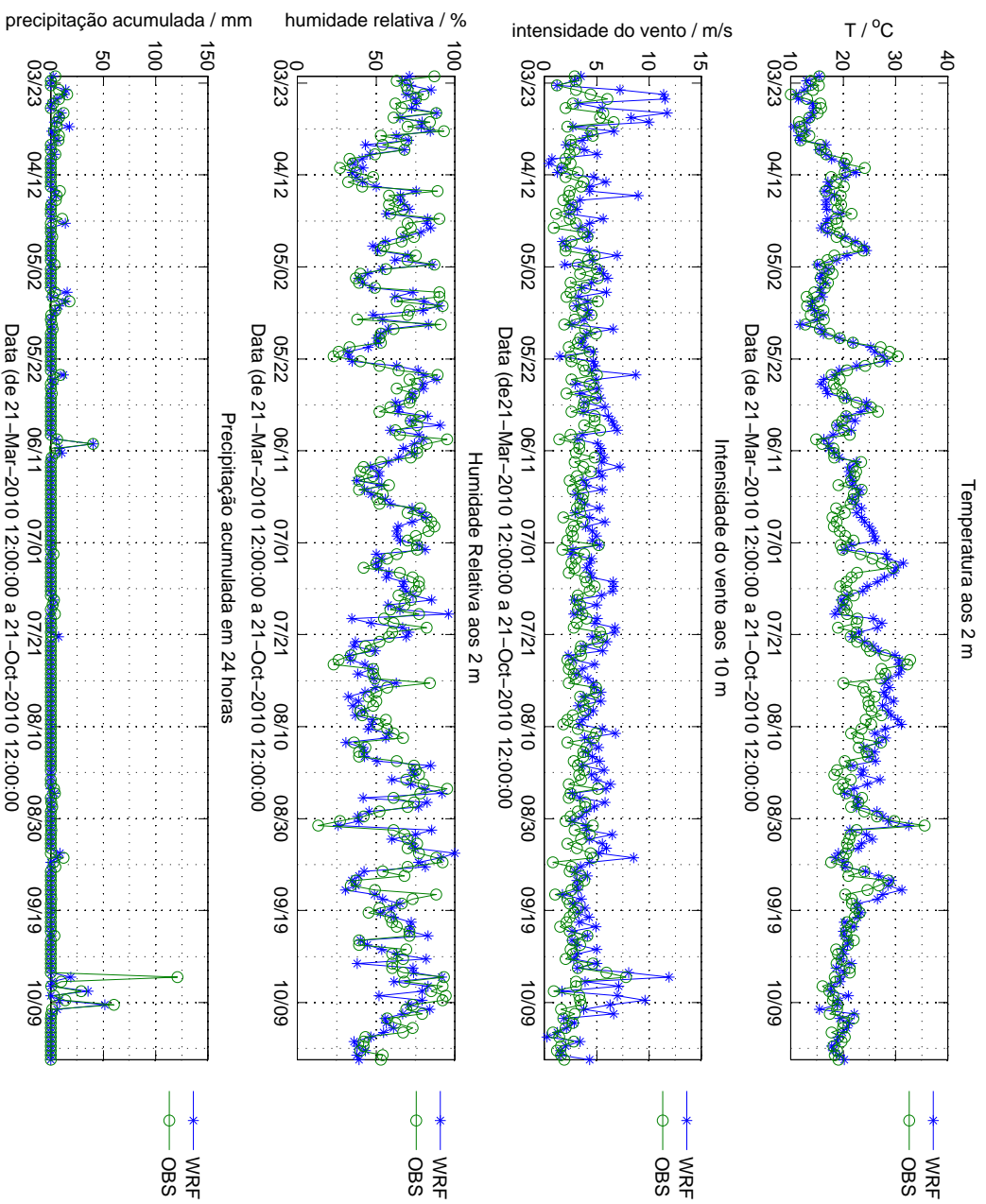


Figura F.21: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 551 (Viana do Castelo/Chafé).

EMA 558: Évora / C. C.

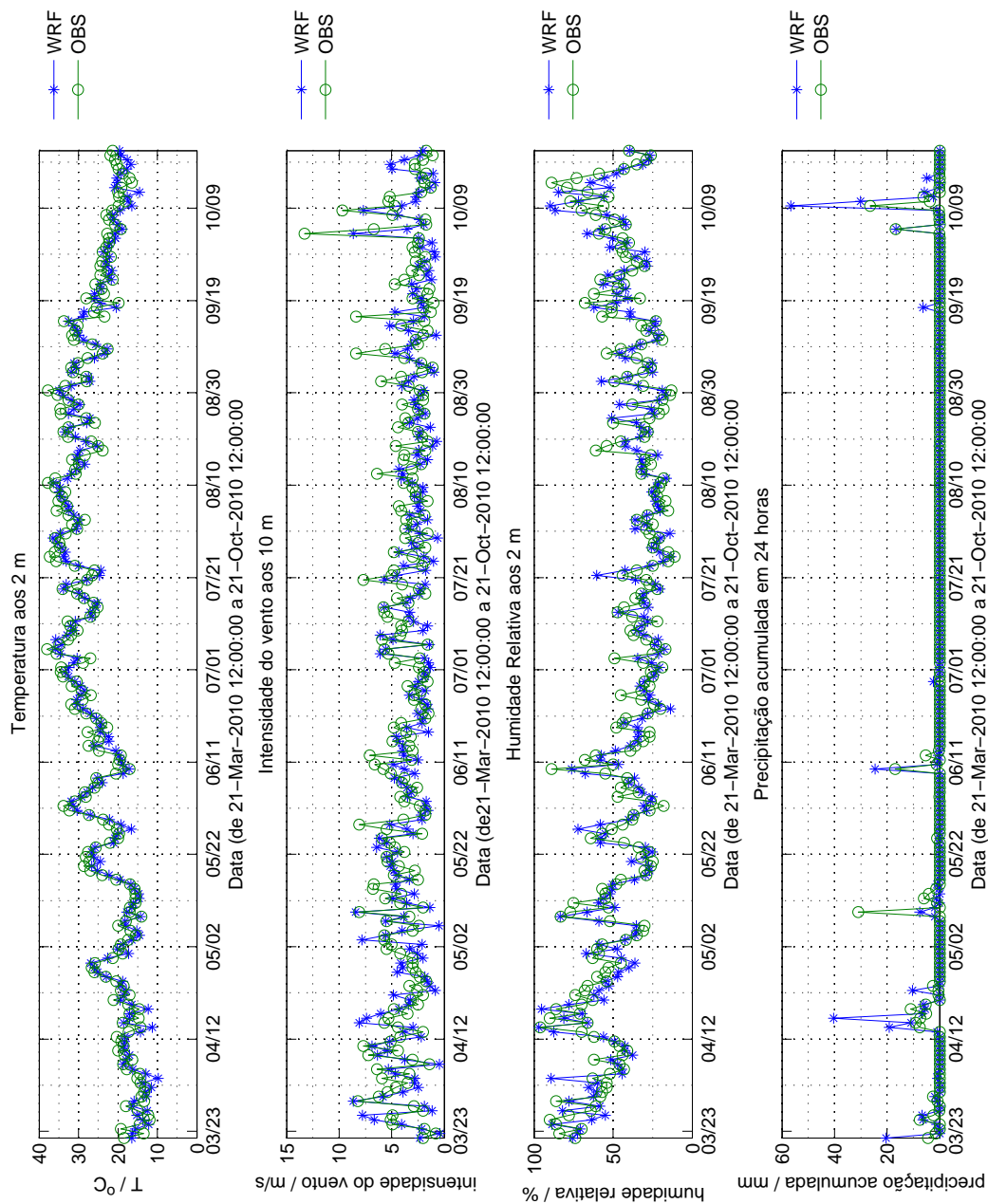


Figura F.22: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 558 (Évora/C.C.).

EMA 560: Viseu / C. C.

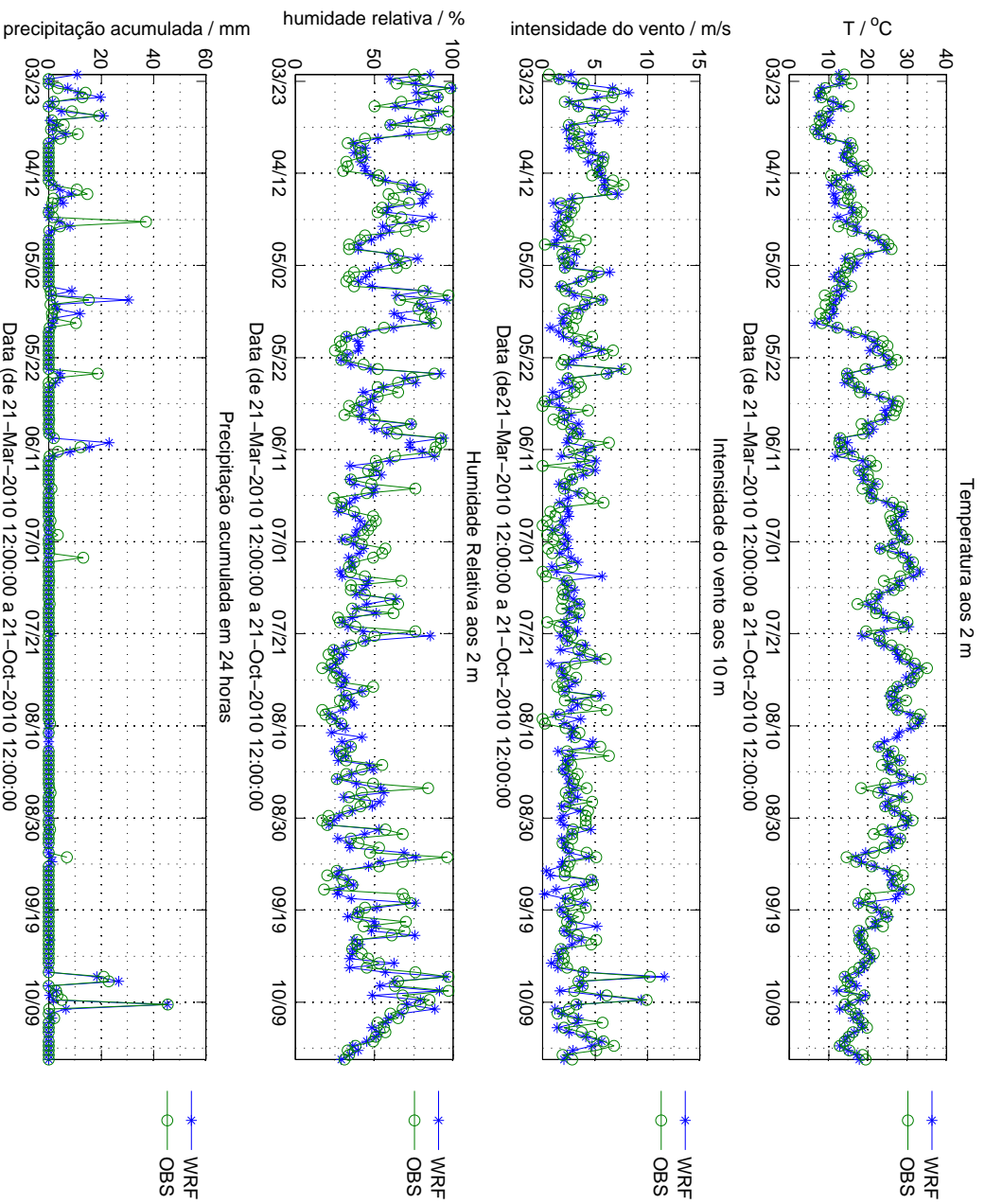


Figura F.23: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 560 (Viseu/C.C.).

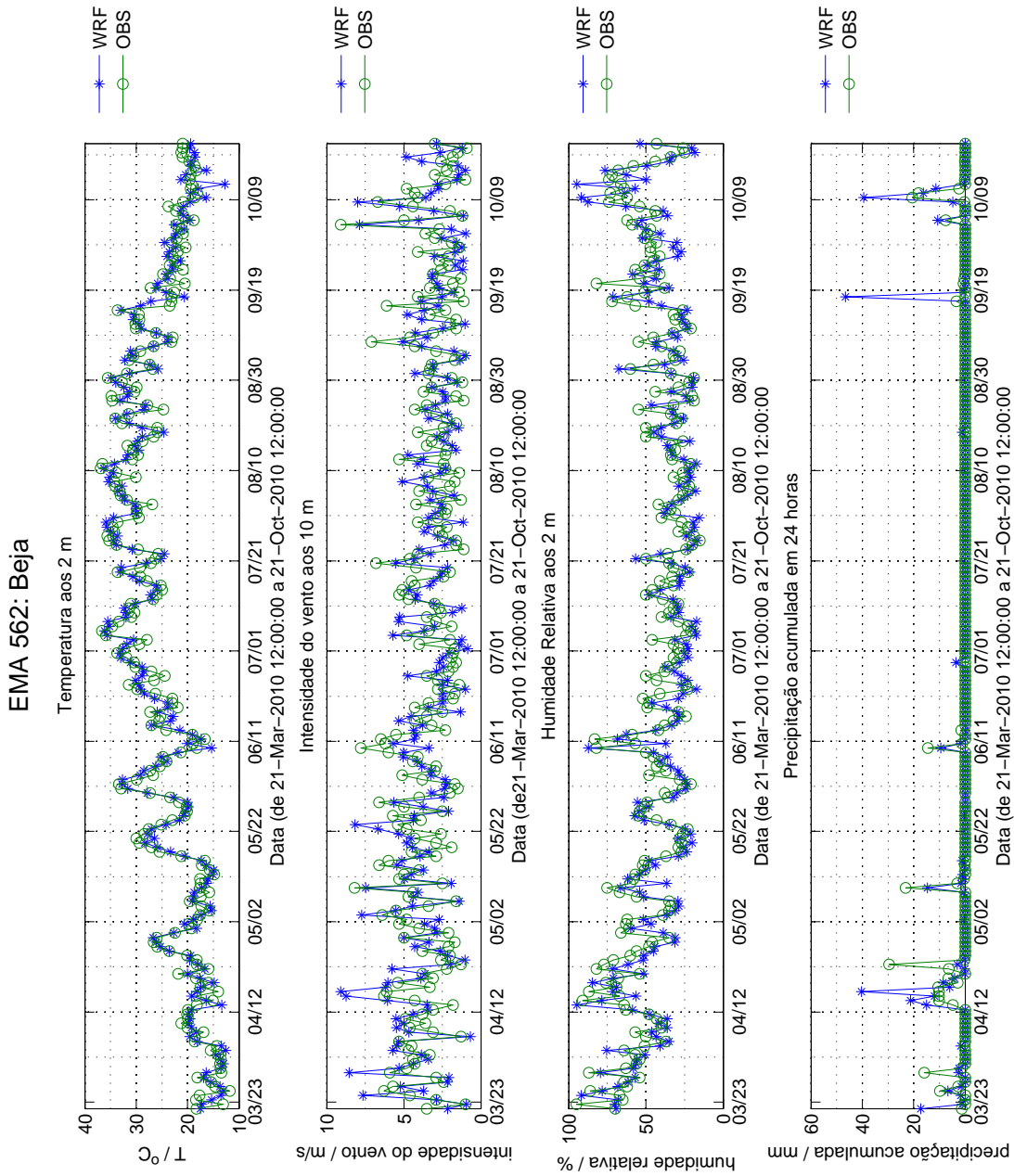


Figura F.24: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 562 (Beja).

EMA 567: Vila Real / C. C.

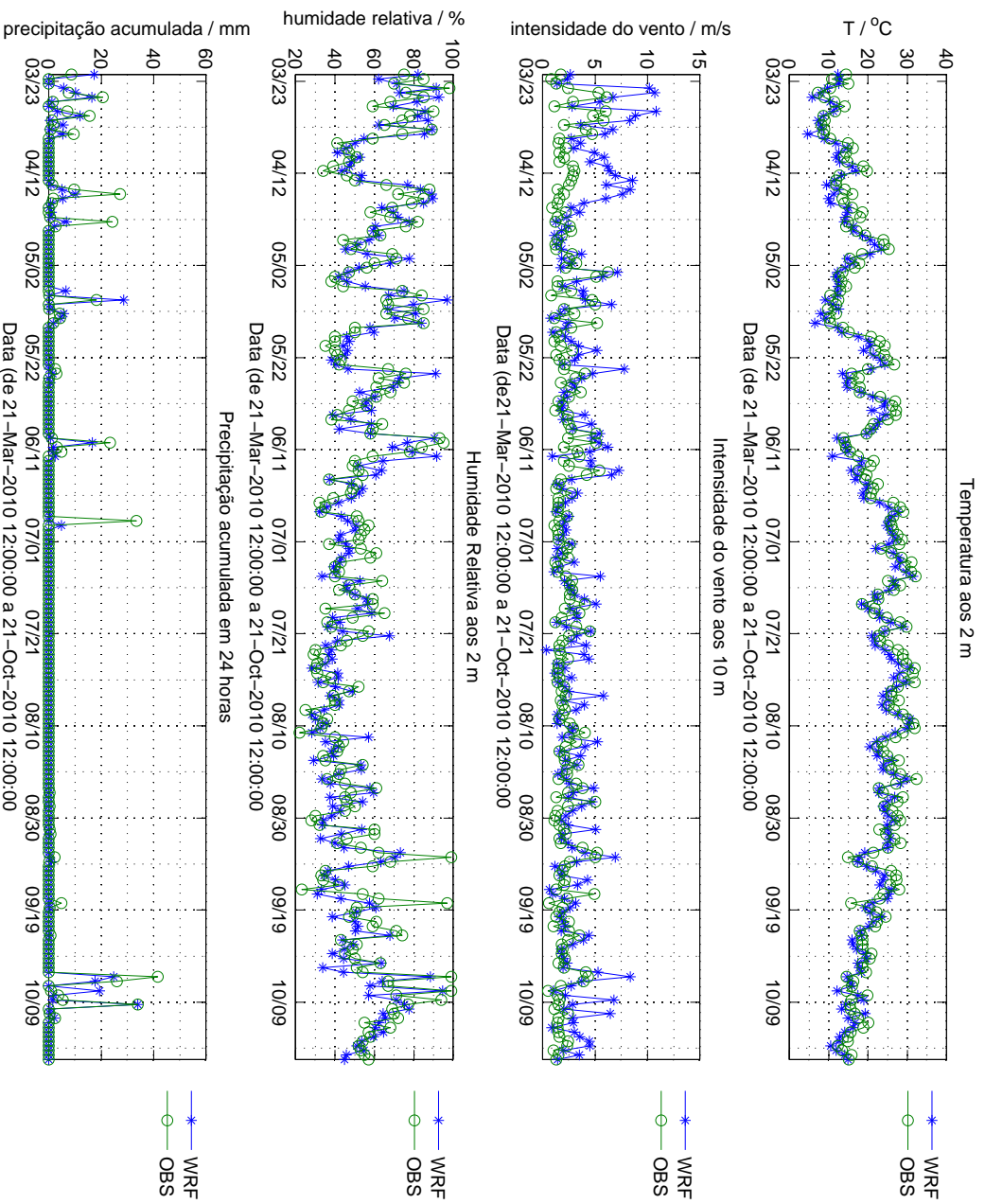


Figura F.25: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 567 (Vila Real/C.C.).

EMA 568: Penhas Douradas / Observatório

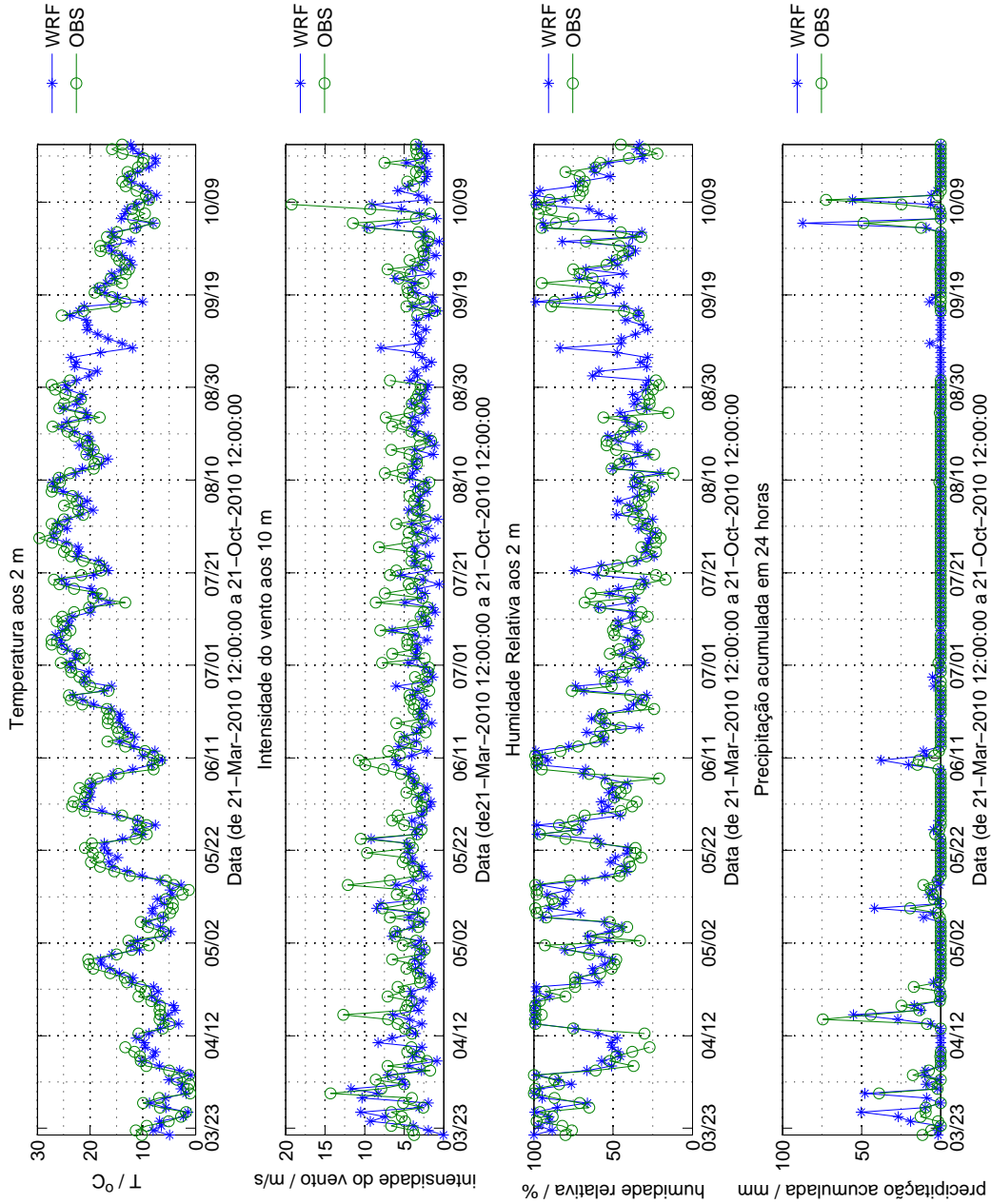


Figura F.26: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 568 (Penhas Douradas/Observatório).

EMA 570: Castelo Branco / C. C.

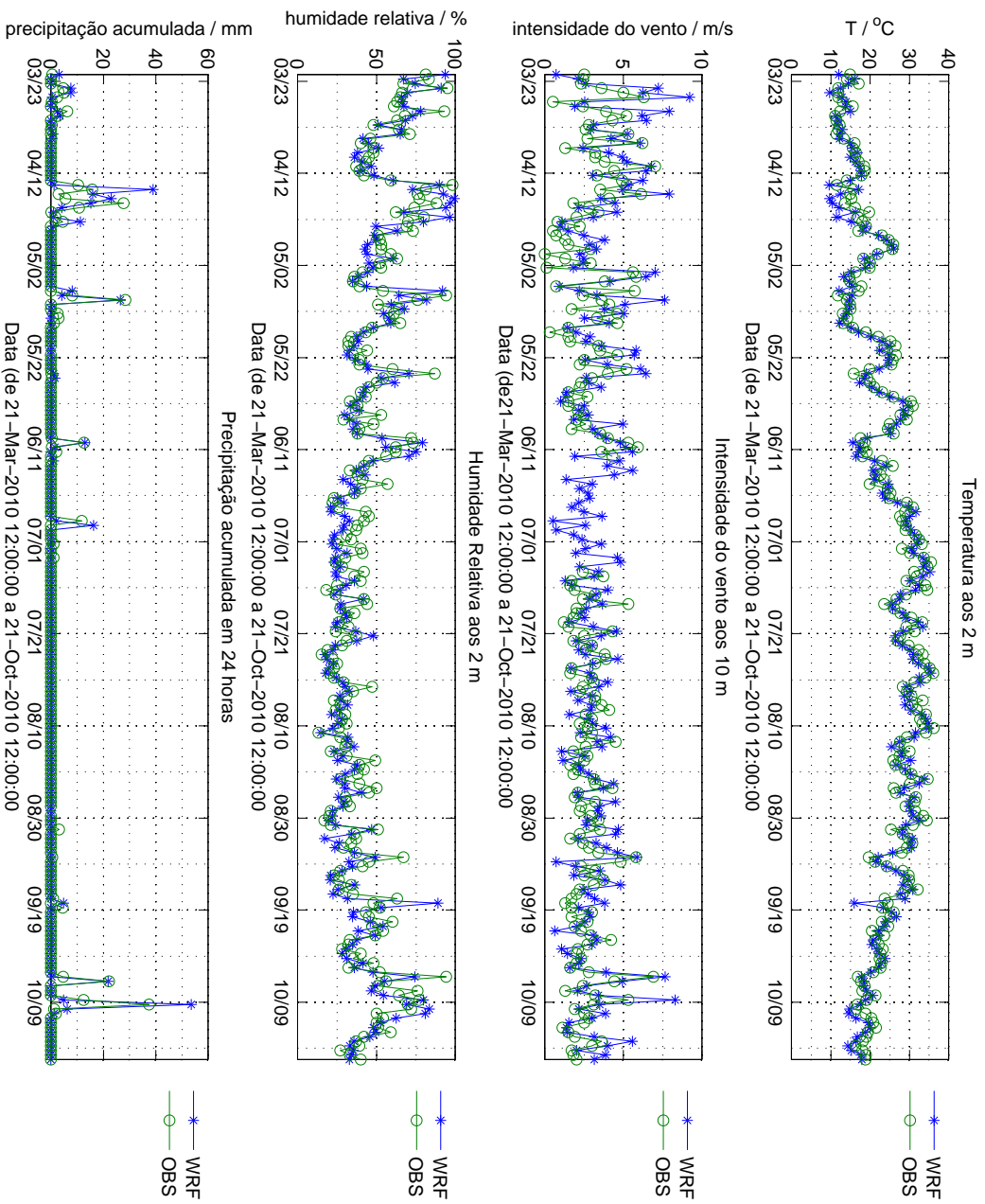


Figura F.27: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 570 (Castelo Branco/C.C.).

EMA 571: Portalegre / C. C.

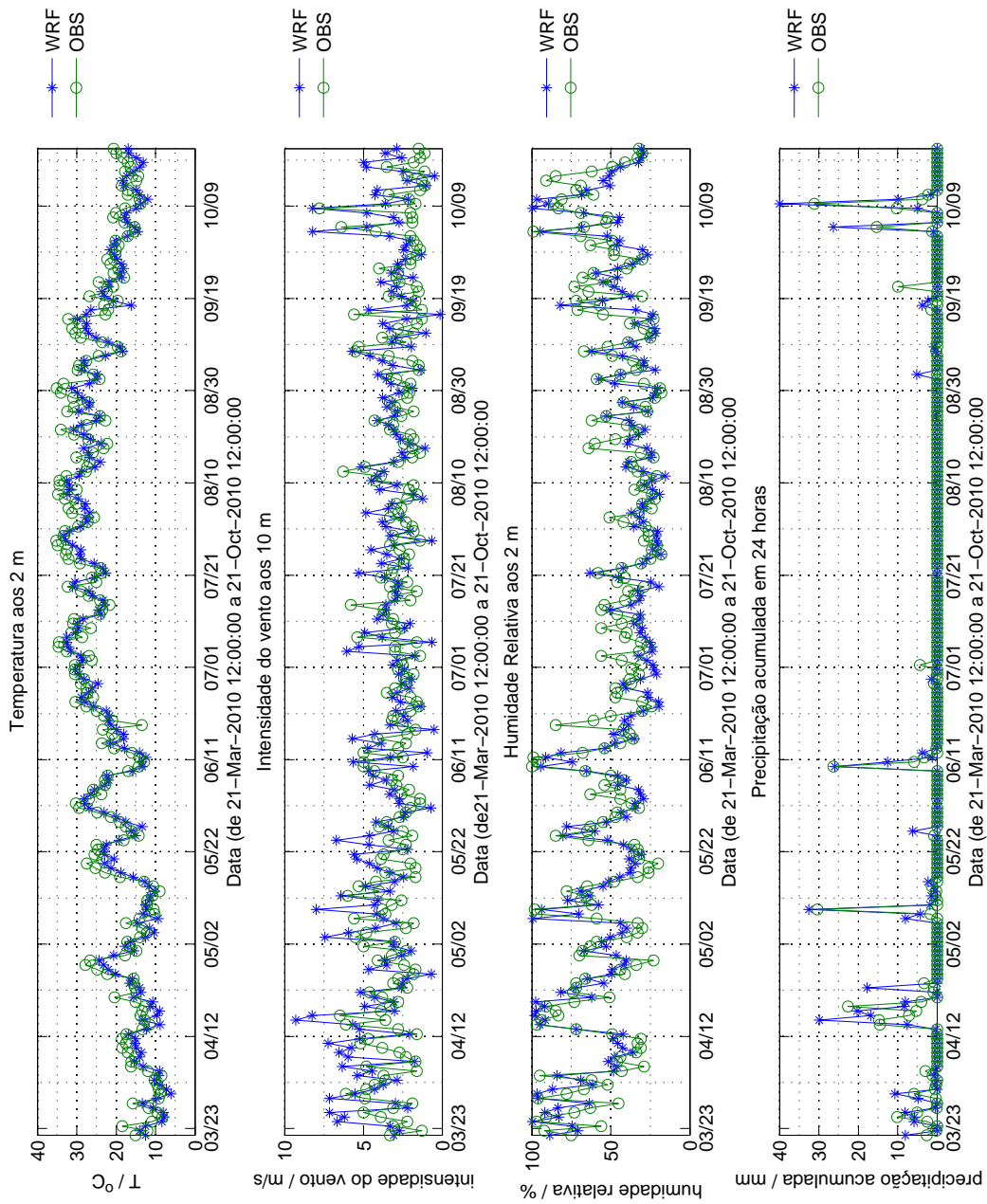


Figura F.28: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 571 (Portalegre/C.C.).

EMA 575: Bragança / C. C.

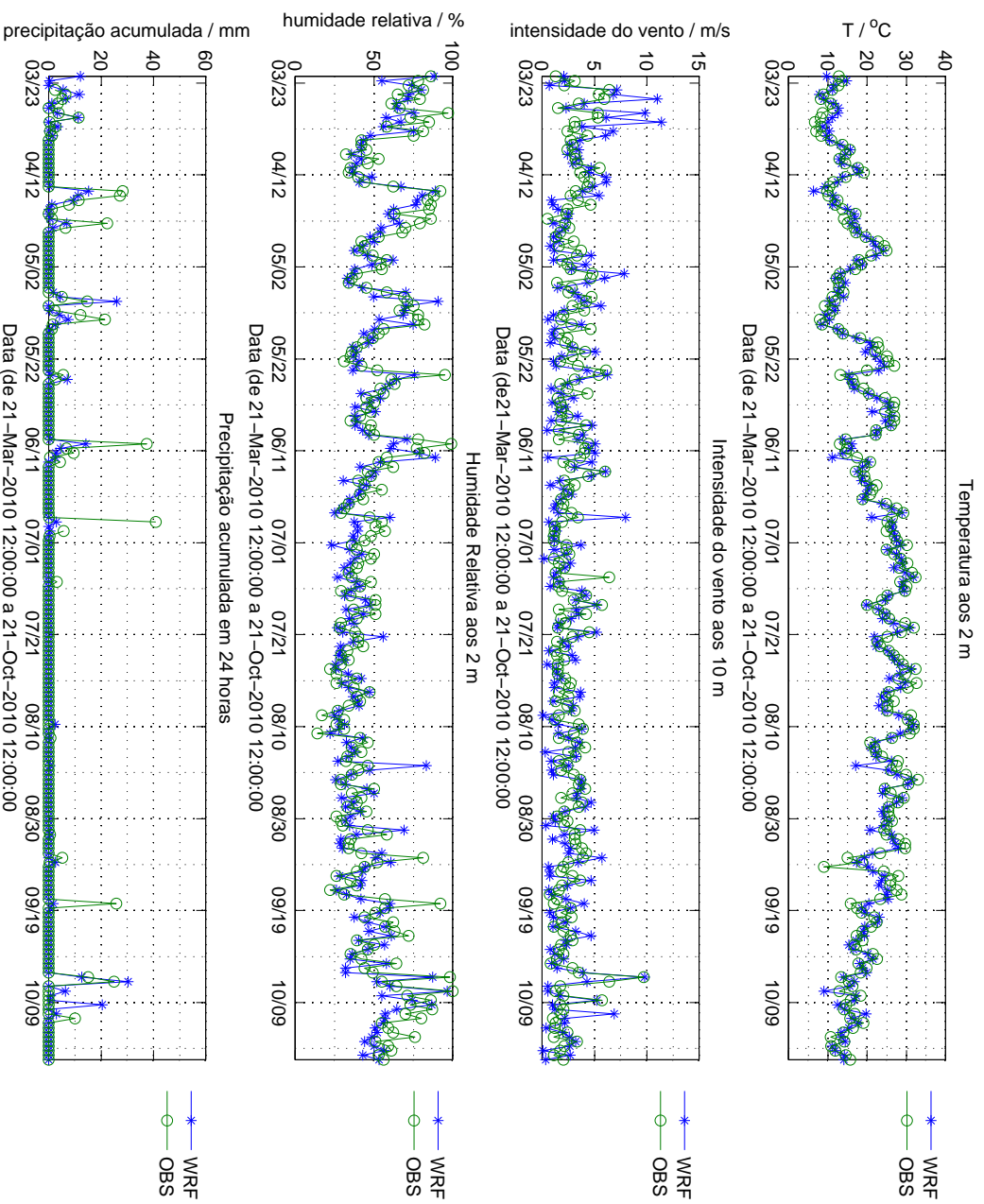


Figura F.29: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 575 (Bragança/C.C.).

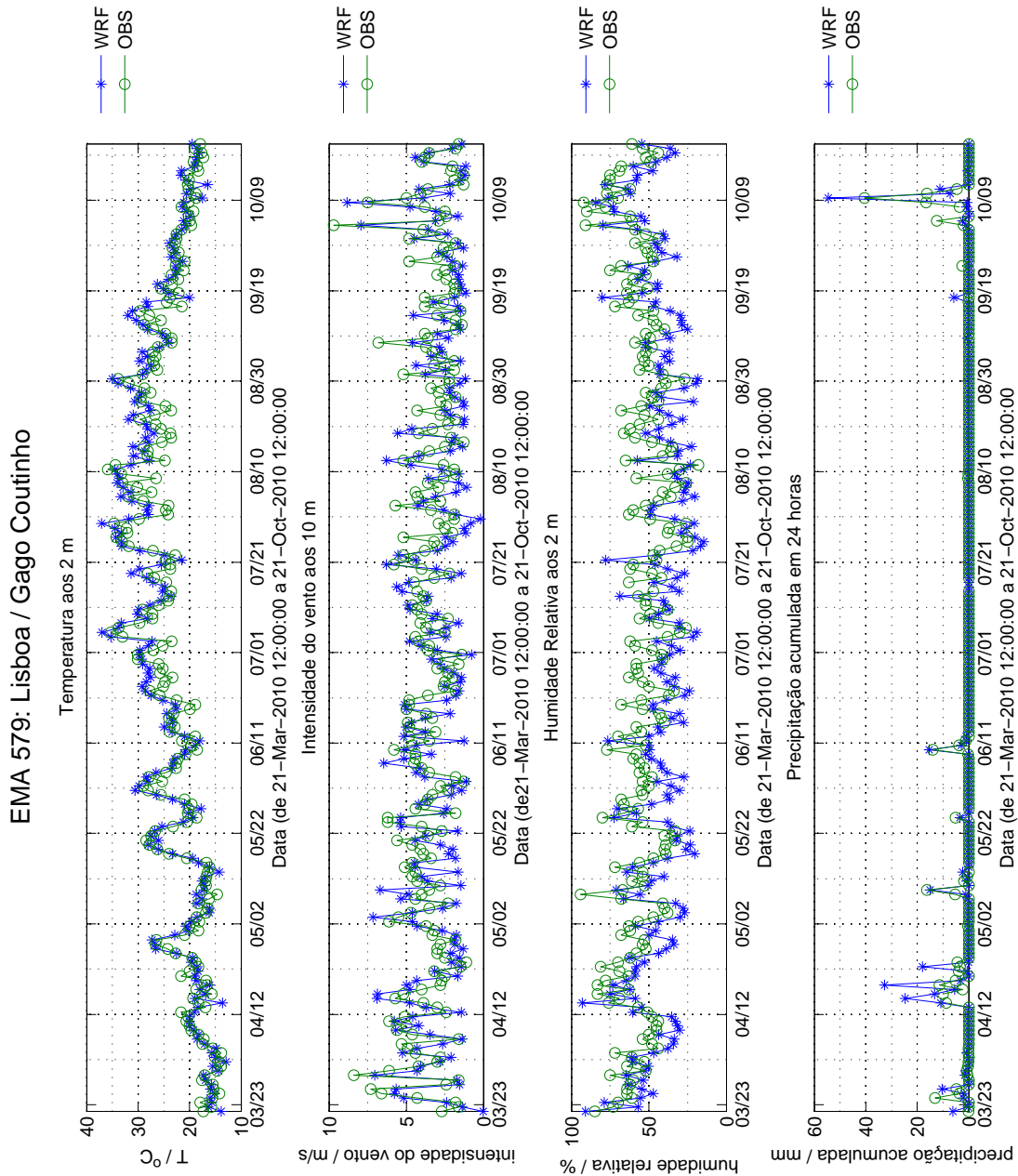


Figura F.30: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 579 (Lisboa/Gago Coutinho).

EMA 616: Chaves / Aeródromo

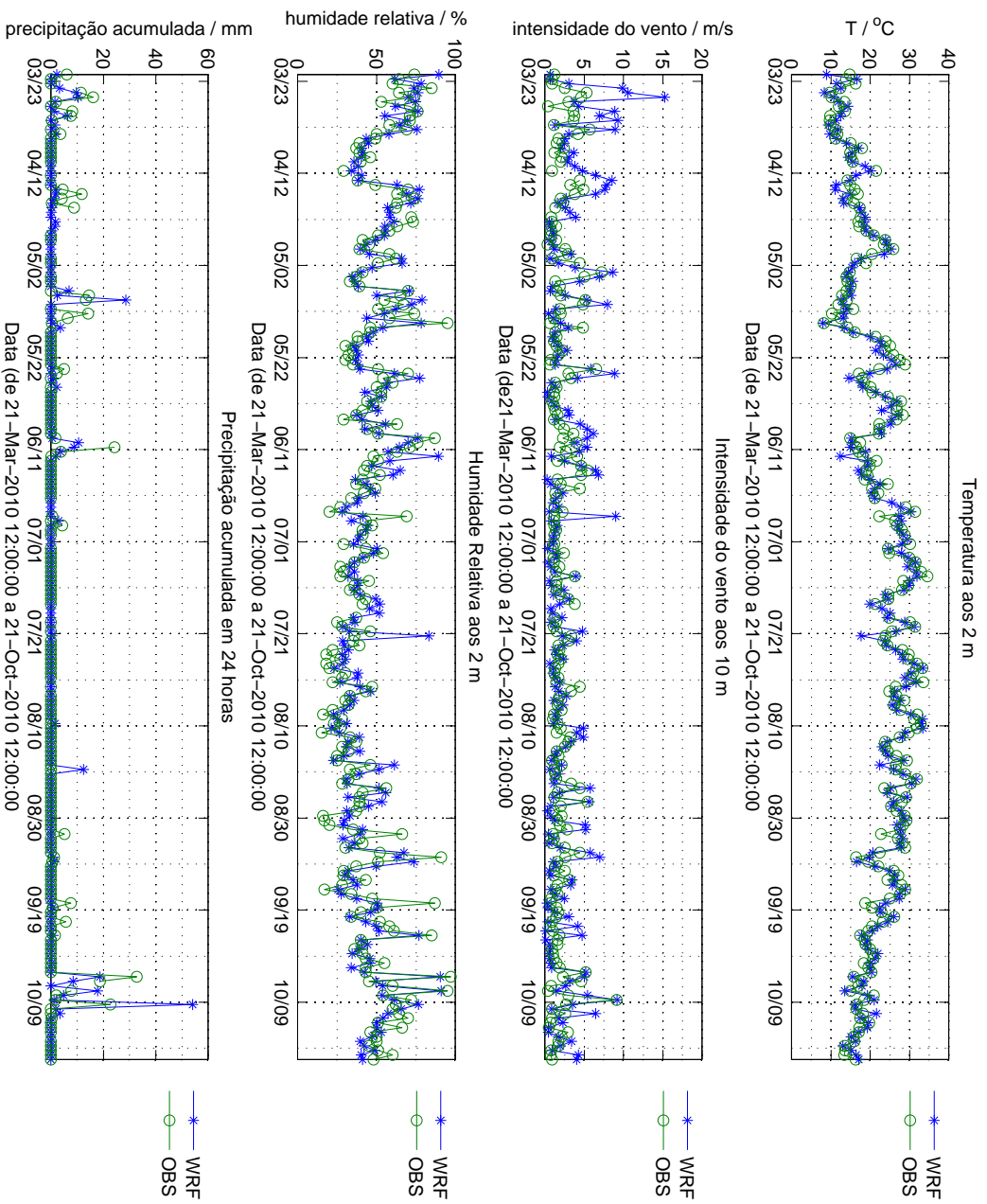


Figura F.31: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 616 (Chaves/Aeródromo).

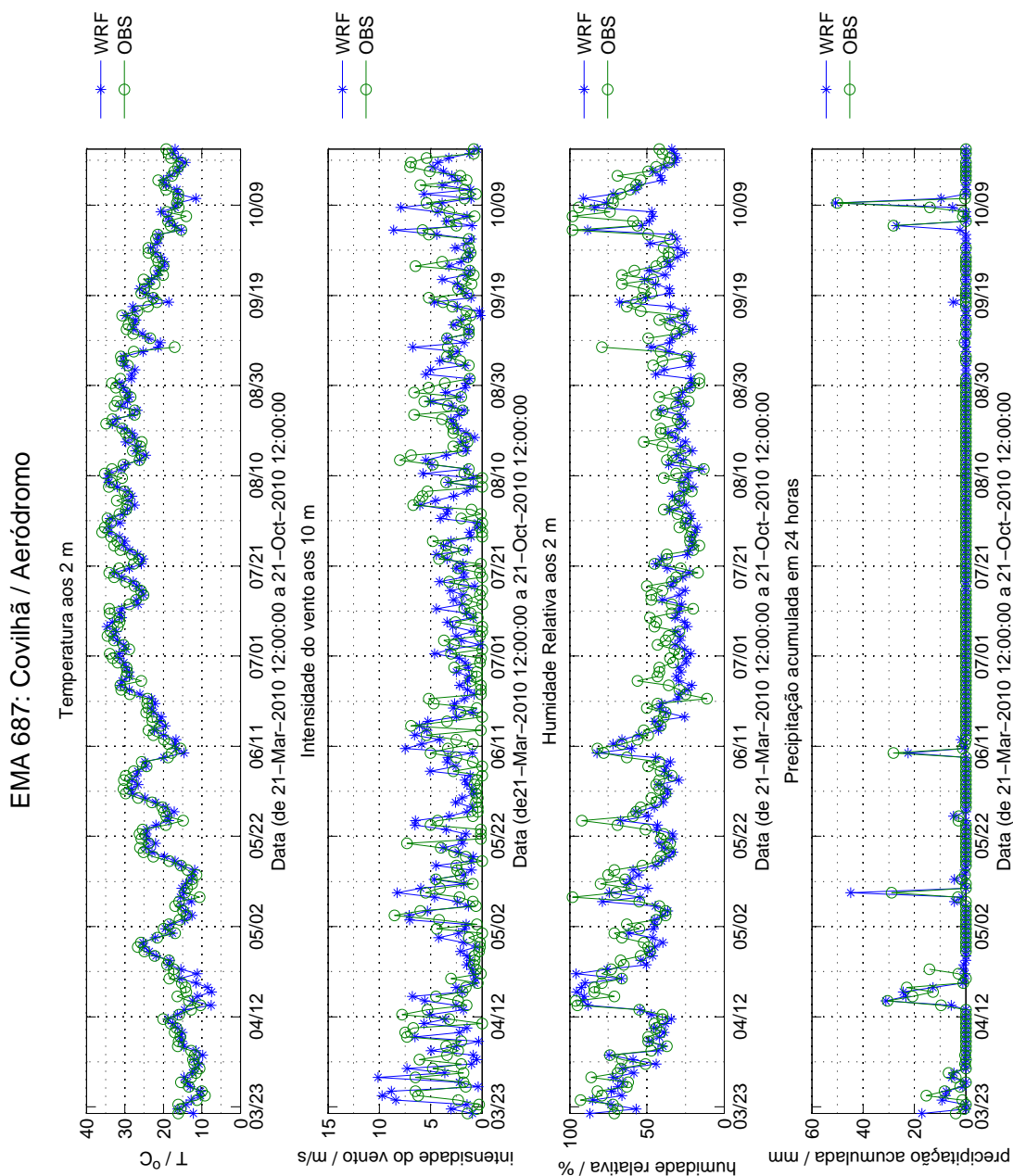


Figura F.32: Comparação entre dados observados e simulados a 48 horas, para a estação meteorológica automática 687 (Covilhã/Aeródromo).