



Universidade de Aveiro Departamento de Física  
2009

**Maria José Neves  
Chorro**

**Variabilidade Climática nas Diferentes Escalas  
Espaciais-Temporais**



Universidade de Aveiro Departamento de Física  
2009

**Maria José Neves  
Chorro**

## **Variabilidade Climática nas Diferentes Escalas Espaciais-Temporais**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Física Aplicada, realizada sob a orientação científica da Doutora Maria de los Dolores J. Manso Orgaz, Professora Associada do Departamento de Física da Universidade de Aveiro e do Doutor Eduardo Ivo Cruzes do Paço R. Alves, Professor Auxiliar do Departamento das Ciências da Terra da Universidade de Coimbra

o júri

Presidente

Professor Doutor João de Lemos Pinto  
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Vogais

Professora Doutora Liliana Do Carmo Santiago Fernandes  
Amado Caramelo  
Professora Auxiliar da Universidade de Trás-os-Montes  
Douro

Professora Doutora Maria de Los Dolores Josefa Manso  
Orgaz  
Professora Associada da Universidade de Aveiro

Professor Eduardo Ivo Cruzes do Paço Ribeiro Alves  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

## agradecimentos

Os grandes agradecimentos resumem-se em poucas palavras:

Aos Prof. Maria Dolores Manso e Eduardo Ivo Alves, pelo apoio e orientação e também pelo incentivo e amizade.

Ao Instituto Geofísico da Universidade de Coimbra que possibilitou a concretização deste trabalho.

À família, que mesmo nos momentos mais críticos, nunca deixaram de acreditar ser possível percorrer este caminho.

## palavras-chave

variabilidade climática à escala global, modelo de mesosescala, tendências, ondas de calor

## resumo

A realização deste trabalho constitui um estudo sobre a variabilidade climática a diferentes escalas espaço-temporais. Assim, na primeira parte deste trabalho, analisa-se, à grande escala espacial, o comportamento das variáveis temperatura e pressão atmosférica em termos comparativos nos planetas Terra e Marte. Conclui-se que o comportamento da temperatura média anual é semelhante nos dois planetas relativamente à variabilidade espacial (máxima no equador e mínima nos pólos), assim como a troca sazonal hemisférica, no entanto divergem nos valores absolutos. A variabilidade espacial da pressão mostra vários centros de altos e baixos valores em ambos os planetas.

Na segunda parte do trabalho estuda-se a variabilidade à grande escala temporal das séries climáticas de temperatura e precipitação atmosférica em Coimbra no período de 1865 a 2005. Conclui-se que a tendência das temperaturas máximas é mais acentuada do que a das temperaturas mínimas. Durante este mesmo período verificou-se uma tendência positiva para a evolução da precipitação. Usando o gerador estocástico *LARS-WG* projectam-se séries sintéticas futuras. Os resultados mostram que, no período de 2005 a 2100, as temperaturas em Coimbra vão aumentar significativamente.

Por fim, analisam-se eventos de ondas de calor. De forma a entender como as variáveis físicas extraídas de um modelo de mesoescala podem servir para observar situações em pontos onde possam não existir dados observados. Neste caso, recorrendo aos dados do Inst. Geofísico de Coimbra para validar a capacidade do modelo, foi usado o modelo de mesoescala *WRF* para dois eventos: um em Julho de 2005, e outro em Julho de 2008, tendo-se verificado que as temperaturas altas foram bem simuladas pelo *WRF*.

Deste modo, o estudo aqui apresentado contribui para o conhecimento das tendências passadas da temperatura e precipitação atmosféricas e para a implementação de simulações climáticas futuras para Coimbra. Conclui-se ainda que os modelos climáticos e de mesoescala podem ser considerados como bons predictores, cada um na sua escala.

Fica claro que um estudo de variabilidade climática nas várias escalas e para ambos os planetas não pode ser igualmente analisado. Contudo, acredita-se que a aplicação destes modelos é importante para o maior conhecimento sobre o clima, actual e passado, de Marte.

## keywords

climate variability at global scale, model mesoscale, trends, heat waves

## abstract

This work is a study on climate variability at different scales on space and time. In the first part, the comparative behaviour of the variables temperature and atmospheric pressure is analysed for Earth and Mars. It is concluded that the behaviour of the mean annual temperature is similar in the two planets within spatial variability (maximum at the equator and minimum at the poles), however the seasonal hemispheric exchange differ in absolute values. The spatial variability analysis shows the presence of various high and low pressures centres on both planets.

The second part of the study it is focuses at large-scale temporal variability of climate series of temperature and precipitation in Coimbra city for 1865 to 2005 period. It is concluded that the trend of maximum temperature is more visible in comparison to minimum temperature. During this period there was a positive trend for precipitation.

Using the stochastic generator LARS-WG it is projected climatic synthetic series for future. The results show that for the period 2005 to 2100, the temperatures will increase significantly in Coimbra.

Finally, this work analyzes events of heat waves, in order to understand how the physical variables from a mesoscale model can be used for domains with absence of recorded data. In this case, data from the Geophysics Institute of Coimbra was used to certify the ability of the mesoscale WRF model in two events: one in July 2005 and another in July 2008. It was noted that the high temperatures were well simulated for the WRF model.

Thus, the study presented here contributes to the knowledge and interpretation of past temperature and precipitation trends and to the assessment of future identical climate simulations for Coimbra. It concludes that the climate models (stochastic and WRF) at mesoscale can be considered good predictors, each one at its scale.

It is clear that a study of climate variability at different scales for both planets can not be analyzed at the same setting. However, we believe that this kind of studies is an important tool to obtain further assessment on the present and past climate of Mars.

## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Representação topográfica de Marte.....	9
Figura 2.2 - Longitude solar $L_s$ de Marte.....	17
Figura 2.3 - Variação espacial da temperatura média em Marte e Terra.....	19
Figura 2.4 - Variação espacial da temperatura média em Marte e Terra na estação de Primavera.....	19
Figura 2.5 - Variação espacial da temperatura média em Marte e Terra na estação de Verão.....	20
Figura 2.6 - Variação espacial da temperatura média em Marte e Terra na estação de Outono.....	20
Figura 2.7 - Variação espacial da temperatura média em Marte e Terra na estação de Inverno.....	21
Figura 2.8 - Variação espacial da pressão atmosférica média em Marte e Terra.....	24
Figura 2.9 - Variação espacial da pressão atmosférica média em Marte e Terra na estação de Primavera.....	24
Figura 2.10 - Variação espacial da pressão atmosférica média em Marte e Terra na estação de Verão.....	25
Figura 2.11 - Variação espacial da pressão atmosférica média em Marte e Terra na estação de Outono.....	25
Figura 2.12 - Variação espacial da pressão atmosférica média em Marte e Terra na estação de Inverno.....	26
Figura 2.13- Variação da temperatura horária ao longo do ano no ponto do hemisfério norte ( $45^\circ E; 45^\circ N$ ) e no ponto do hemisfério sul ( $45^\circ E; 45^\circ S$ ).....	29
Figura 2.14 – Variação da temperatura horária nas latitudes de $-60^\circ$ a $60^\circ$ no ponto de longitude de $45^\circ E$ .....	29
Figura 3.1- Séries das médias anuais da temperatura mínima (azul), temperatura máxima (amarela) e temperatura média (rosa) do ar em Coimbra, as correspondentes rectas de tendência e os respectivos declives $^\circ C/ano$ .....	36
Figura 3.2- Série de precipitação total mensal desde 1865 a 2005.....	39

Figura 3.3- Distribuição mensal da quantidade de precipitação para os períodos 1865-1976, 1976-2005 e 1865-2005.....	41
Figura 3.4- Desvio da quantidade de precipitação em relação às normais 1971-2000.....	42
Figura 3.5 - Anomalias para a temperatura máxima em relação às normais 1971-2000.....	44
Figura 3.6 - Anomalias para a temperatura mínima em relação às normais 1971-2000.....	44
Figura 3.7 - Anomalias para a precipitação em relação às normais 1971-2000.....	47
Figura nº 3.8- Anomalias para a quantidade de precipitação mensal em relação às normais 1971-2000.....	49
Figura 3.9 - Anomalias para a temperatura máxima em relação às normais 1971-2000.....	50
Figura 3.10 - Anomalias para a temperatura mínima em relação às normais 1971-2000.....	50
Figura 3.11 - Anomalias para a precipitação em relação às normais 1971-2000.....	52
Figura 3.12 - Anomalias para a precipitação mensal em relação às normais 1971-2000.....	52
Figura 3.13 - Diagrama de correlação entre os valores de temperatura máxima observados e simulados entre 2000 e 2005.....	55
Figura 3.14 - Diagrama de correlação entre os valores de temperatura mínima observados e simulados entre 2000 e 2005.....	55
Figura 3.15 - Diagrama de correlação entre os valores de precipitação observados e simulados entre 2000 e 2005.....	56
Figura 3.16 - Diagrama de correlação entre os valores da temperatura máxima observados e simulados entre 2000 e 2005.....	58
Figura 3.17 - Diagrama de correlação entre os valores da temperatura mínima observados e simulados entre 2000 e 2005.....	58
Figura 3.18 - Diagrama de correlação entre os valores da precipitação observados e simulados entre 2000 e 2005.....	59
Figura 4.1- Domínios computacionais definidos para o modelo WRF.....	
Figura 4.2- Temperatura máxima média anual no período de 1865 a 2005.....	65

Figura 4.3- Episódios de calor de 5 ou mais dias consecutivos de temperaturas máximas superiores a 35°C durante os meses de Verão de 1941 a 2005.....	66
Figura 4.4 - Distribuição da temperatura a 2 m e da pressão atmosférica simuladas pelo WRF para o dia 5 de Agosto de 2005 às 14:00 UTC.....	68
Figura 4.5- Valores de temperatura observados no dia 5 de Agosto de 2005 na estação do IGUC.....	69
Figura 4.6- Valores de pressão atmosférica observados no dia 5 de Agosto de 2005 na estação do IGUC.....	69
Figura 4.7-Concentrações ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) médias horárias de ozono ( $\text{O}_3$ ) e dióxido de azoto ( $\text{NO}_2$ ) para Coimbra (IGUC) no mês de Agosto de 2005.....	70
Figura 4.8 -Anomalias do geopotencial ao nível do mar no Hemisfério Norte.....	72
Figura 4.9 -Evolução da temperatura à superfície no dia 17 de Julho de 2008.....	74
Figura 4.10 Evolução da pressão ao nível do mar no dia 17 Julho de 2008 .....	75
Figura 4.11 Evolução do rumo e intensidade do vento à superfície no dia 17 de Julho de 2008.....	76
Figura 4.12- Variação temporal horária da temperatura do ar (Kelvin) e pressão atmosférica ao nível do mar (Pa).....	77
Figura 4.13- Variação temporal horária da temperatura máxima e mínima.....	78
Figura 4.14- Variação temporal horária do vento meridional e zonal.....	79
Figura 4.15- Variação temporal horária da humidade relativa.....	79

## Lista de Quadros

Quadro 2.1- Algumas características de Marte .....	9
Quadro nº 2.2- Composição química da atmosfera da Terra e de Marte.....	11
Quadro nº 2.3- Duração dos meses e estações do ano de Marte.....	18
Quadro nº 3.1- Médias, desvios padrão e tendências (avaliadas ajustando uma recta por mínimos quadrados das séries de temperatura máxima sazonais e anuais consideradas.....	37
Quadro 3.2- Médias, desvios padrão e tendências (avaliadas ajustando uma recta por mínimos quadrados das séries de temperatura mínima sazonais e anuais consideradas.....	37
Quadro 3.3 - Médias, desvios padrão e tendências (avaliadas ajustando uma recta por mínimos quadrados das séries sazonais e anuais consideradas.....	40
Quadro 3.4- Valores máximos, mínimos médias mensais de temperatura máxima e desvios padrão nos períodos considerados.....	45
Quadro nº 3.5- Valores máximos, mínimos e médias mensais de temperatura mínima e desvios padrão nos períodos considerados.....	46
Quadro nº 3.6 - Valores médios, extremos e desvio padrão de precipitação nos períodos 2005-2100 e 1971-2000.....	48
Quadro 3.7- Temperaturas máximas e mínimas médias mensais e desvios padrão nos períodos 2005-2100 e 1971-2000.....	51
Quadro 3.8- Temperaturas máximas e mínimas médias mensais e desvios padrão nos períodos 2005-2100 e 1971-2000.....	51
Quadro 3.9- Valores médios, extremos e desvio padrão de precipitação nos períodos 2005-2100 e 1971-2000.....	53

Quadro 3.10 – Coeficientes de correlação significativos para o nível de significância 0.05 entre valores de temperatura máxima e mínima observados e simulados.....	54
Quadro 3.11 – Valores das estatísticas para a temperatura mínima, máxima e precipitação, para os períodos considerados.....	57
Quadro 3.12-Coeficientes de correlação significativa para o nível de significância 0.05 entre valores de temperatura máxima, mínima e precipitação observados e simulados.....	57
Quadro 3.13 – Valores das estatísticas para a temperatura mínima, máxima e precipitação, para os períodos considerados.....	59
Quadro 4.1 - Parametrização física do modelo WRF.....	64
Quadro 4.2- Comparação entre valores de temperatura registados no Verão de 2005 e as normais climatológicas.....	66
Quadro 4.3-Valores extremos da temperatura máxima do ar que ultrapassam o registado do dia 5 de Agosto de 2005.....	67
Quadro 4.4- Valores médios mensais de temperatura máxima superiores a 32°C no período 1941-2005.....	67

1- Introdução.....	1
2. O sistema climático.....	4
2.1 O sistema climático na Terra.....	5
2.2 O sistema climático em Marte.....	7
2.3 Inter- relação variação do clima concentração de poeiras existentes na atmosfera.....	13
2.4 Dados e Metodologia.....	16
2.4.1 Variabilidade espacial a nível global.....	18
2.4.2 Variabilidade temporal Marte vs Terra.....	28
3- Variabilidade temporal das séries longas para Coimbra.....	31
3.1 Evolução histórica climática em Coimbra.....	33
3.1.1 Breve referência histórica sobre a localização da estação.....	33
3.1.2 Variabilidade da temperatura e precipitação.....	34
3.1.2.1 Temperatura.....	34
3.1.2.2 Precipitação.....	38
3.2 Projecção de geração de cenários regionais.....	42
3.2.1 Análise das Simulações a partir da série 1941-2005.....	43
3.2.2 Análise das Simulações a partir da série 1976-2005.....	49
3.2.3 Desempenho do modelo.....	54
3.2.3.1 Análise da série 1941-2005.....	55
3.2.3.2 Análise da série 1976-2005.....	57
4-Eventos extremos de temperatura ao nível de mesoescala.....	60
4.1 Aplicação do modelo WRF.....	62
4.2 Domínio de simulação.....	63
4.3 Análise de séries temporais de dados observados na estação do IGUC.....	64
4.4 Simulação do episódio: 5 de Agosto 2005.....	68
4.5 Análise de episódio: Julho de 2008; relação da circulação geral com temperatura.....	71
5- Conclusões.....	80
Referências bibliográficas.....	84

# Capítulo 1

## 1 Introdução

O clima sempre variou no decurso das épocas geológicas passando por alternâncias entre os períodos glaciários e interglaciários, mas a partir do século XX, com a intervenção do homem, o ambiente tem vindo a degradar-se, sendo evidente a convergência de indicadores que confirmam uma tendência das últimas décadas no sentido do aquecimento global, como a subida da temperatura média do Planeta e a maior frequência de eventos extremos como inundações e ondas de calor . Com a publicação do livro e do filme, “An Inconvenient Truth” da autoria de Al Gore (2006), a opinião pública foi sensibilizada para a possibilidade de mudança de clima. Em início de Fevereiro de 2007, a publicação do Quarto Relatório do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC, WGI, 2007), confirmou de modo mais acentuado as previsões do Relatório anterior (IPCC, 2001) e alertou para o perigo de aquecimento global.

O Painel Intergovernamental sobre Mudança de Clima - (IPCC ), foi criado em 1988, pelo programa das Nações Unidas para o meio Ambiente e pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), em resposta às diversas evidências científicas sobre a possibilidade de mudança de clima, trabalhando em conjunto com os governos. Este órgão é responsável por fornecer informações sobre ciência, os impactos e a economia, como também de opções para adaptação e mitigação da mudança do clima nas várias escalas

tanto global como regionais ao desenvolver metodologias a serem adoptadas pelos países na elaboração dos seus inventários de gases de efeito de estufa. Com os trabalhos de várias centenas de cientistas de muitos países, o IPCC compila todo o conhecimento científico e elabora três relatórios de avaliação de cinco em cinco anos, divididos em três grupos. Utiliza modelos globais acoplados Oceano-Atmosfera, estes modelos são elaborados em diferentes centros e com diferentes características no solo nas simulações e nas resoluções espaciais e nas suas integrações temporais (<http://www-pcmdi.llnl.gov/>).

Os modelos climáticos são uma representação numérica do sistema climático nas propriedades físicas, químicas e biológicas dos seus componentes suas interações e processos de *feedback*. O sistema climático pode ser representado por modelos de diferente complexidade, os modelos globais acoplados Oceano-Atmosfera dão uma representação aceitável do sistema climático. No entanto existe sempre uma incerteza resultante de simular exactamente os fenómenos a uma escala mais pequena como a um quilómetro, contudo tem vindo a desenvolver-se metodologias de parametrizações de modo a reduzir a dimensão horizontal da malha. Os modelos climáticos são sobretudo aplicados como ferramenta de investigação, para estudar ou simular o clima, mas também com objectivos operacionais de previsões.

As questões relativas ao aquecimento global referem-se à escala dos impactos regionais e às consequências para o futuro da sociedade. As suas implicações na mudança do clima são claras em termos de padrões de consumo e desenvolvimento, na queima de combustíveis fósseis, produzindo gases que comprovadamente contribuem para o aquecimento do planeta Terra, o que foi amplamente estudado por numerosos investigadores, como Broecker (1975), Watson *et al.* (2001) e, mais recentemente, Wallace *et al.* (2008).

O sistema de previsão numérica do tempo em mesoescala para regiões como Portugal, que apresentam uma grande heterogeneidade climática, devida tanto à sua posição com respeito à circulação Norte-Atlântico como à sua complexa orografia convertem-se num cenário ideal para analisar se os modelos de mesoescala conseguem uma simulação aceitável das condições observadas. Destacam-se os modelos de mesoescala MM5 (*Fifth Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model*) ou o WRF (*Weather Research and Forecast*).

Neste trabalho utilizou-se o modelo WRF, este é um modelo é um modelo meteorológico não hidrostático, destinado a simular ou prever circulações atmosféricas à escala regional para vários dias. Vários trabalhos foram realizados no sentido da previsão de situações extremas de precipitação e ou temperaturas, usando assimilação de dados 3D, 4D, etc como mostram os vários trabalhos do grupo (Yamsaki Y *et al.*, 2005, Yamazaki Y. *et al.*, 2006).

Olhando para as séries de temperatura e precipitação, vemos que são uma ferramenta preciosa, sobretudo quando se dispõe de séries longas, pois permitem acompanhar a evolução histórica do clima num determinado local, como determinar as relações existentes entre variáveis através de métodos de análise estatística. Existem muitos autores que na Península Ibérica investigam

a variabilidade climática com séries observadas longas, podemos citar os trabalhos de (Miranda *et al.*,2004; Frias *et al.*, 2005; Nieto *et al.*, 2006; Caramelo e Manso 2001).

A estatística é um dos métodos cada vez mais utilizados na análise de estudos de alterações climáticas a nível regional e local. Neste âmbito, os geradores estocásticos tornam-se muito úteis em muitas áreas, pois permitem, a um baixo custo, a obtenção de informação sobre o clima local.

Actualmente utilizam-se dados de temperatura e precipitação obtidos com modelos de simulação como atestam os trabalhos de Richardson C.W (1981 ) Semenov M.A, (1997) e Semenov M.A (1997).

Estes geradores, normalmente são desenvolvidos a partir de séries históricas disponíveis e são avaliados em função da capacidade que apresentam para gerar dados com estatísticas quase similares às observadas nos dados históricos. As séries de 145 anos de temperatura e precipitação do Instituto Geofísico de Coimbra servirão como base para aplicação de um gerador estocástico.

Olhando para o clima de Marte, foram desenvolvidos vários estudos em relação à variabilidade climática, onde podemos destacar os trabalhos efectuados por (Haberle, R.M, *et al.*, 2003, Wilson, R. J, *et al.*, 2007) e resultados de vários estudos compilados (Michael Carr, 2007).

O trabalho aqui apresentado está dividido em cinco capítulos de forma a investigar a variabilidade do clima nas diferentes escalas espaço-temporais. Assim, após o enquadramento introdutório aqui apresentado, no segundo capítulo analisa-se a variabilidade à escala global do clima nos dois planetas, Marte e Terra. No terceiro capítulo, estuda-se a variabilidade climática à escala temporal das series longas de precipitação e temperatura em Coimbra usando o gerador estocástico LARS-WG (Semenov *et al.*, 1998), com a finalidade de representação de projecções futuras. O quarto capítulo é dedicado à análise na mesoescala, onde se estudam vários eventos extremos de temperatura, usando o modelo WRF (*Weather Research and Forecast*). Por fim, as conclusões são apresentadas no capítulo quinto.

# Capítulo 2

## 2. O sistema climático

A atmosfera tem movimentos a diferentes escalas no espaço e no tempo. Relativamente ao espaço os movimentos variam entre a maior escala, comparáveis com as dimensões da Terra, passando pelas ondas de Rosby e as ondas cíclicas (1000 km). Os movimentos correspondentes a mesoescala 1000 a 100 km e 100 a 1km para os pequenos sistemas locais e ainda os vórtices da ordem de magnitude de cm a 1 mm. Podemos concluir que o espectro de movimentos atmosféricos tem um vasto leque que cobre várias ordens de magnitude. Encontra-se uma variação similar se encontra na escala do tempo. Aparte das flutuações anuais ou maiores, temos escalas de semanas correspondente à escala de maior espaço, uns poucos dias para as ondas de Rosby e ciclónicos e até, horas, minutos e segundos para o movimento de menor escala. Em conclusão é impossível observar de forma simultânea a dinâmica atmosférica em todas estas escalas.

Para compreender as variações do clima a diferentes escalas é necessário conhecer o sistema climático global, o modo como funciona assim como os seus mecanismos reguladores. Para dizer que existem alterações climáticas é necessário conhecer não apenas o clima contemporâneo, mas também as suas flutuações ao longo da sua evolução histórica.

O sistema climático é consequência e, ao mesmo tempo, a ligação entre a atmosfera, a hidrosfera, a criosfera, a biosfera, e a litosfera. Estes subsistemas

interagem, uma vez que são sistemas abertos, havendo entre eles fluxos de energia e massa. A alteração de um destes subsistemas, ou a intervenção de factores externos, irá provocar variações no clima (Peixoto e Oort, 1992).

Segundo vários estudos (Peixoto e Oort, 1992; Von Storch, H., 1999; Buchdah, J., 1999), o clima tem sofrido muitas alterações no passado e estas continuarão no futuro, pelo que deve ser encarado como uma entidade viva, pondo de parte o conceito errado de natureza constante do clima.

Nesta secção faz-se uma análise espacial e temporal do estado médio observado anual e sazonalmente da pressão atmosférica e temperatura do ar em Marte e na Terra.

Como o clima de Marte ainda não é bem conhecido e também por algumas semelhanças com o clima da Terra, optamos por incluir neste capítulo algumas das características de ambos os planetas.

## **2.1 O sistema climático na Terra**

As propriedades que caracterizam o estado climático estão interligadas por vários processos físicos que ocorrem no sistema e nos seus subsistemas, tais como a precipitação, a radiação, evaporação, o transporte de vapor de água por advecção, convecção e turbulência, etc.

A atmosfera, a camada gasosa que envolve o globo terrestre, é a parte de maior variabilidade do sistema climático. A sua capacidade de transferir calor tanto na vertical como na horizontal, ajusta-se à distribuição de temperatura à superfície do globo.

A hidrosfera, parte líquida do planeta, inclui os oceanos, os mares interiores, os lagos, os rios e a água subterrânea. Destes a maior parte é ocupada pelos oceanos, sendo o componente mais importante para o estudo do clima. Os oceanos absorvem a maior parte da radiação solar que atinge a superfície do globo e representam um reservatório enorme de energia, devido à sua grande massa e ao valor elevado do calor específico da água. As correntes oceânicas transportam grandes quantidades de calor das regiões equatoriais para as regiões polares e, por isso, são mecanismos essenciais no balanço planetário da energia. Os oceanos através da evaporação também contribuem para a humidade da atmosfera.

A criosfera é constituída pelas massas de gelo e coberturas de neve, incluindo as camadas de gelo e de neve continentais, os glaciares e o gelo dos oceanos, dos lagos e dos rios. Devido à sua grande massa, estes subsistemas desenvolvem uma dinâmica própria e apresentam variações significativas na massa e extensão em períodos que vão de centenas a milhares de anos.

A biosfera é composta pelos organismos vivos quer animais, quer vegetais. Ainda que tenham tempos de reacção muito variáveis, os elementos biológicos são muito sensíveis ao clima. Interferem com o clima através do ciclo hidrológico (evapotranspiração, etc), ciclo de carbono e fotossíntese. Devido às diferentes formas de cobertura vegetal, há variação de albedo, a rugosidade e a evaporação influencia a hidrologia.

A litosfera é a camada mais externa do planeta de 100 km de espessura, que incluem a crosta e parte do manto superior, é uma zona rígida que tem a capacidade de resistir durante imenso tempo sem se deformar a pressões elevadas. Os processos de deriva continental e a formação das grandes bacias oceânicas levaram ao aparecimento de montanhas no decurso de milhões de anos e correspondem a uma forma de interacção com os outros subsistemas do sistema climático (Peixoto e Ort, 1992).

Em resumo, o sistema climático é constituído pela ligação dos vários subsistemas: atmosfera, oceanos, continentes, criosfera e biosfera, nos quais ocorrem muitos processos físicos, químicos e biológicos de interacção numa grande gama de escalas tanto temporais como espaciais, fazendo com que o sistema seja extremamente complexo. Por exemplo, os ventos superficiais impulsionam as correntes oceânicas e criam ondas que provocam a mistura na camada superficial do oceano. Dos cinco componentes, a atmosfera é o elemento central do sistema climático, o de maior mobilidade e de maior variabilidade.

No sistema climático existem uma grande variedade de formas de energia, a energia radiante, a energia térmica, a energia mecânica, a energia química e a energia electromagnética. Como a energia tem a capacidade de se transformar de uma forma noutra, estas transformações ocorrem dum modo contínuo na atmosfera, na superfície do globo e em qualquer dos subsistemas.

Podemos dizer que o sistema climático é regulado por três leis fundamentais: a lei da gravitação, a primeira e segunda lei da termodinâmica. Um exemplo da lei da gravitação é a diferenciação da massa volúmica da atmosfera. A primeira lei da termodinâmica ou lei da conservação da energia, diz que em qualquer processo, a energia total do sistema, sob as várias formas possíveis permanece constante. A segunda lei da termodinâmica introduz o conceito de entropia como função de estado, é esta lei que faculta a determinação da relação entre as diferentes formas de energia e que descreve a direcção do fluxo de energia dentro dos sistemas (McIlveen, 1998).

O clima é modulado por factores internos e externos, dentre os internos constam as propriedades próprias da atmosfera, tais como a sua composição, os vários tipos de instabilidade e a circulação geral. Os factores externos dividem-se em dois grupos: factores gerais, como a radiação solar, a excentricidade da Terra, o movimento da Terra em torno do Sol, a rotação e a existência de continentes e oceanos; factores regionais e locais, como a topografia, tipo de superfície e cobertura vegetal.

Todavia, é conveniente considerar a escala temporal para os diferentes componentes do sistema climático, consoante o tempo de resposta de cada componente a um agente forçador. Os que apresentam escalas temporais mais curtas sejam considerados como sistema climático interno e os de resposta mais lenta, sistemas externos. Para escalas temporais de horas a semanas, a atmosfera pode ser o único sistema climático interno considerado, para escalas mais longas de meses a anos, os oceanos e a atmosfera deverão estar ambos incluídos no sistema climático interno.

O clima referente a um dado período, é a média das estatísticas dos estados da atmosfera nesse período, independentemente de qualquer estado meteorológico instantâneo. O clima só pode ser compreendido em termos de mecanismos meteorológicos, qualquer que seja a escala espacial, sendo, portanto, a síntese do tempo num dado local ou região, é um conceito e apenas uma generalização estatística e não uma realidade física (Peixoto, 1998).

Qualquer valor registado, situado acima ou abaixo daqueles, pressuporá uma perturbação em relação às normais, à maneira clássica, o clima é caracterizado pelos valores normais, representados pelos valores médios, referentes a um período de 30 anos. Acabamos de definir intuitivamente dois aspectos do estudo da atmosfera que estão intimamente relacionados: clima e tempo. O primeiro será simplesmente o conjunto de valores normais que dominam a nossa paisagem, designando-se por tempo as condições dominantes num momento determinado que são normalmente diferentes dos valores normais.

Sendo o clima caracterizado pela frequência de ocorrência de vários fenómenos meteorológicos pelos valores médios num determinado período, todas as estatísticas que se podem obter com as séries temporais dos elementos meteorológicos num dado lugar, constituem as características do clima desse local. Então os valores dos elementos meteorológicos usualmente observados, como temperatura, precipitação, humidade, pressão....etc, são características do clima, e assim poderemos falar de clima local tanto no planeta Terra como no planeta Marte.

## **2.2 O sistema climático em Marte**

O objectivo desta secção consiste em fornecer informação acerca do planeta Marte recorrendo a um estudo comparativo com a Terra.

Associada à variabilidade natural do sistema climático adiciona-se um certo nível de incerteza, particularmente no clima de Marte, assim torna-se necessário aumentar o conhecimento de todos os sistemas que compõem o sistema climático.

Inicia-se com uma exposição de conhecimentos acerca de ambos os planetas, especialmente de Marte de forma a situar o leitor nesta temática.

Marte faz parte do Sistema Solar e com algumas semelhanças com o nosso planeta, sendo por isso alvo de investigação por muitos cientistas e tendo suscitado um grande interesse sobre a possibilidade de existência de vida, passada ou presente, no planeta com várias teorias sobre o facto, não só pelos cientistas mas também pela sociedade de um modo geral.

Assim como na Terra, Marte é constituído pelos subsistemas atmosfera, litosfera, criosfera e hidrosfera, quanto à biosfera ainda não há informação suficiente sobre a sua existência.

Apesar do ainda pouco conhecimento sobre a criosfera e a hidrosfera pela insuficiência de dados, sabe-se que estes sistemas estão interligados. Na criosfera a água estando presente será na forma de gelo e a sua espessura depende da temperatura superficial, da condutividade térmica do material da crosta, da salinidade das águas subterrâneas e dos fluxos de calor, sendo a incerteza grande, uma vez que não existem medições e as estimativas variam consideravelmente (Carr, 2006). Segundo alguns estudos (Harrison *et al.*, 2008), existem fluxos de água líquida circulando sob a criosfera. A hidrosfera será a parte da crosta abaixo da criosfera, onde a água estando presente será líquida, dependente da porosidade e permeabilidade das rochas do subsolo. De facto, segundo o modelo hidrológico de Clifford (1993), a estrutura do subsolo de Marte está interligada pelo sistema criosfera/hidrosfera, dependente da pressão hidrostática exercida pelo solo, variando a espessura da criosfera assim como a quantidade de água existente no subsolo. Em relação à litosfera, esta também é diferente da Terra, uma vez que os fenómenos geológicos parecem estar inactivos, como a actividade vulcânica e a sismicidade, no entanto existem vestígios de intensa actividade vulcânica e a presença de água no estado líquido no passado de acordo com a composição dos materiais, como a ocorrência de sulfatos, hematite e outros minerais cuja origem depende da existência de água.

## **Um pouco de história**

Em Julho de 1965, a sonda Mariner 4, transmitiu as primeiras imagens de Marte. Foi a primeira sonda a chegar a Marte, revelando uma superfície com muitas crateras e vales naturais. Em 10 de Julho de 1976, pousou a Viking Lander 1 no ponto de coordenadas 22.5°N, 312°E na região de Chryse Planitia, em seguida a Viking 2, no ponto 48.0°N, 134.4°E. A partir daí várias missões têm sido efectuadas: a Mars Pathfinder, em 4 de Julho de 1997, que pousou a 800 Km da Viking 1. Em 2003, chegou a Marte a missão Mars Exploration, com dois robots, o Spirit e o Opportunity, com a finalidade de recolher elementos químicos e físicos da possível existência de água líquida no planeta. Estes últimos encontram-se ainda em funcionamento.

Todos estes módulos de pouso transportavam estações meteorológicas.

Marte é o planeta climatologicamente mais parecido com a Terra, apesar de ser consideravelmente menor e com algumas diferenças significativas, nomeadamente na temperatura e na pressão atmosférica, no Quadro 2.1 apresentam-se algumas características do planeta.

Quadro 2.1 – Algumas características de Marte (Carr, 2006).

Excentricidade	0.0934
Obliquidade	25.19°
Distancia Sol- Marte, periélio	1.3815 A.U.
Distancia Sol- Marte, afélio	1.6660 A.U.
Período orbital	686.98 Dias da Terra 669.60 Dias de Marte (sols)
Duração do dia	88775.2 s (24h 39 35.2s)
Massa	$6.4185 \cdot 10^{23}$ kg
Raio equatorial	3396.200 km
Raio polar Norte	3396.200 km
Raio polar Sul	3382.580 km
Área de superfície	$1.4441 \cdot 10^8$ km <sup>2</sup>
Pressão atmosférica média à superfície	5.6 mbar (560 Pa)
Temperatura de superfície	140-300 K

## Topografia de Marte

Na Figura 2.1 apresenta-se a imagem global do planeta Marte, obtida a partir do instrumento Mars Orbiter Laser Altimeter, (MOLA) a bordo da Mars Global Surveyor (MGS).

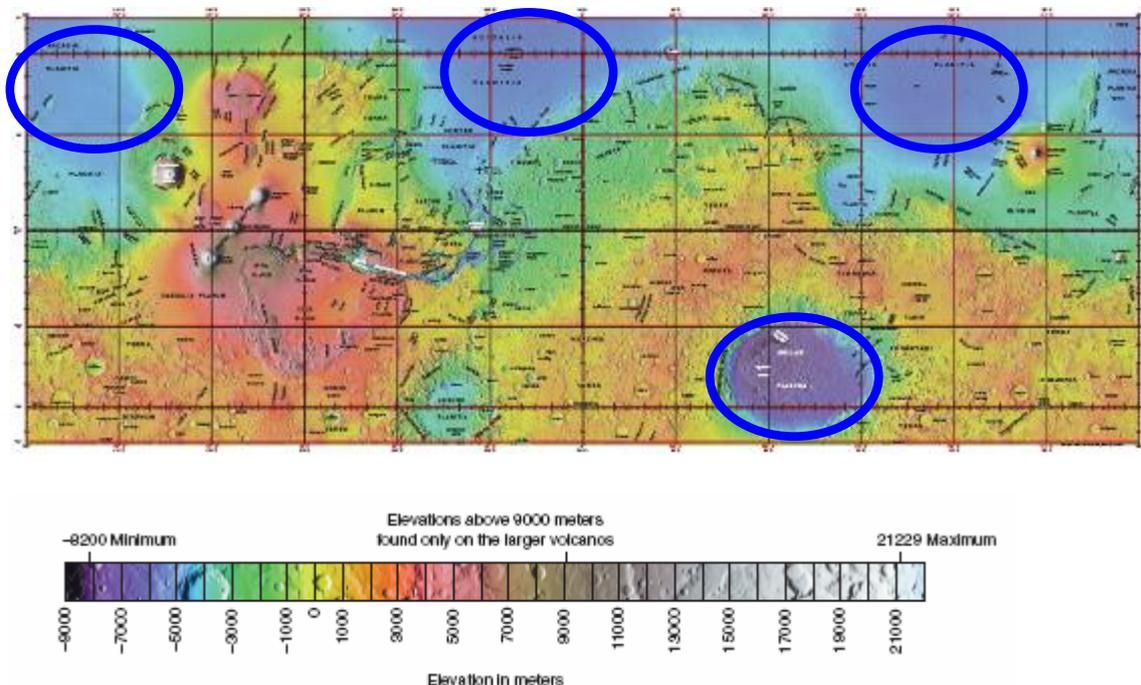


Figura 2.1 - Representação topográfica de Marte.

Apesar do menor tamanho, apenas 28% da superfície da Terra, Marte apresenta extremos de altitude maiores que os da Terra. O intervalo é de

29429 km, desde 8200 km abaixo da superfície, no ponto mais baixo de Hellas aos 21229 km, no topo do Monte Olimpo. Como em Marte não existe mar, foi decidido durante a missão Mariner 9, utilizar como ponto de referência a altitude em que a pressão atmosférica é 6.1 mbar, a pressão do ponto triplo da água.

A característica fundamental da topografia de Marte é a chamada dicotomia global. Como se pode verificar, pela imagem global do planeta (Figura 2.1) existe uma acentuada oposição entre o hemisfério Norte, com altitudes abaixo do ponto de referência e menos crateras e o hemisfério Sul, com altitudes acima do ponto de referência e mais craterizado.

Extensas áreas no hemisfério Sul estão cobertas por grandes crateras, algumas das quais são enormes, destacando-se a de Hellas Planitia, a maior cratera do Sistema Solar. As mais salientes estruturas de Marte são os vulcões, que são os maiores do Sistema Solar. A maioria dos vulcões concentra-se na chamada Cordilheira de Tharsis e o maior, denominado de Olympus Mons, localiza-se no hemisfério Norte, e tem 550 km de diâmetro e 21 km de altura. A norte de Tharsis, em Alba Patera, localiza-se o maior vulcão que tem aproximadamente 2000 km de diâmetro, mas escassos quilómetros de altura.

Os Valles Marineris são um grande sistema de vales profundos com margens escarpadas em forma de penhascos, que se estendem por 4000 quilómetros, ao longo do equador de Marte, entre os 8°S e os 78° E, atingindo mais de 8 quilómetros de profundidade.

## Atmosfera da Terra e Marte

Tal como referido anteriormente, os subsistemas climáticos são também caracterizados pela sua composição química. No caso da atmosfera, a sua composição influencia o seu estado termodinâmico. A atmosfera tem um papel central no sistema climático servindo como mediador do fluxo energético entre o Sol e a superfície do planeta tendo também desempenha um papel importante nos fluxos de energia e matéria entre os componentes do sistema.

A atmosfera é constituída por uma mistura de gases que não reagem entre si, e também por uma grande variedade de produtos sólidos e líquidos em suspensão, sob a forma de finíssimas gotas ou partículas, como matéria orgânica, iões, material radiativo e uma abundante gama de agentes contaminadores resultantes da actividade humana (considerando apenas a atmosfera do planeta Terra).

A capacidade da atmosfera da Terra em absorver de forma selectiva, a radiação solar e terrestre está associada à sua composição. Parte da radiação solar, nomeadamente a radiação ultravioleta, é absorvida no seu percurso até atingir a superfície terrestre. A Terra, ao aquecer, liberta energia sob a forma de radiação infravermelha, sendo de novo enviada para o espaço.No entanto, parte desta energia é absorvida pela atmosfera, resultando num incremento da

temperatura da atmosfera. Este fenómeno natural, habitualmente designado por efeito estua é essencial para a manutenção da vida no planeta, impedindo que a superfície da Terra se torne excessivamente fria. Atendendo às propriedades térmicas, distinguem-se várias regiões na atmosfera da Terra. Do solo para o espaço, são as seguintes: troposfera, estratosfera, mesosfera e exosfera.

A troposfera é a zona em que os fenómenos do tempo e a turbulência atmosférica são mais marcantes e contém cerca de 75% da massa total da atmosfera, praticamente todo o vapor de água e todos os aerossóis. De uma maneira geral, a temperatura decresce com a altura a um ritmo de 6.5°C/km. A estratosfera contém a maior parte do ozono atmosférico (máxima concentração aos 22 km). Na Mesosfera as temperaturas decrescem até atingir os -90°C ao redor dos 80 km. A Exosfera é a camada da atmosfera formada por átomos de oxigénio, hidrogénio e hélio, dos quais aproximadamente 1% estão ionizados.

Nos quadros 2.3 apresentam-se os componentes das atmosferas da Terra e de Marte presentes em maiores concentrações.

Quadro 2.2 – Composição química da atmosfera da Terra (Salby, 1996) e de Marte (Carr, 2006).

	Terra	Marte
Componente	Concentração	
N2	0,78 (%)	0.027 (%)
O2	0,2095 (%)	0.0013 (%)
H2Ob	≤0,030 (%)	0.0003 (%)
Ar	0,0093 (%)	0.016 (%)
CO2a	345 ppmv	0.9532 (%)
COb	70 ppbv	0.0007 (%)
O3a	10ppm vb	0.04 -0.2 ppm
NO	0,1 ppbv b	
CFC-11a	0,2 ppbv	
CFC-12a	0,3 ppbv	
CH4a	1,6 ppmv	
N2Oa	350 ppbv	
Ne	18 ppm	2.5 ppm
Kr	1.0 ppm	0.3 ppm
Xe		0.08 ppm

- a) radiativamente activos
- b) valor estratosférico

(ppm = partes por milhão)  
 (ppmv = partes por milhão em volume)  
 (ppbv = partes por bilião por volume)

Pela análise do Quadro 2.2 pode verificar-se uma composição quantitativa e qualitativa bem diferente em ambas as atmosferas. O componente com maior concentração na atmosfera de Marte é o CO<sub>2</sub> (95%), que desempenha um papel importante na emissão e absorção da energia solar, enquanto que na atmosfera terrestre o N<sub>2</sub> (78%) e O<sub>2</sub> (21%) são os gases dominantes além destes, contêm gases altamente reactivos.

Como a composição da atmosfera de Marte é diferente da Terra, também o perfil vertical da temperatura é diferente, sobretudo devido ao baixo teor de ozono e à existência de elevada quantidade de poeiras. Na parte inferior da atmosfera de Marte e quando não estão presentes poeiras, a temperatura decresce tal como na troposfera terrestre, porém não existe um gradiente de inversão como na Terra devido ao baixo teor de ozono. Até uma altitude de cerca de 45 km as temperaturas são controladas em grande parte pela troca de calor com o solo. Com a pequena quantidade de água, o calor latente é desprezável. Dos 45 aos 110 km, a temperatura continua a decrescer, sendo a absorção e a emissão radiativa efectuada através do CO<sub>2</sub>.

Embora rarefeita a atmosfera de Marte é, no entanto, suficientemente espessa para suportar extensas tempestades de areia que por vezes cobrem o planeta inteiro e podem durar meses, como ocorreu durante a missão da Mariner 9 em 1971 e durante a missão Viking em 1977 (Carr, 2006). Como a poeira absorve directamente a radiação solar, a transferência de calor entre a superfície torna-se menos importante no controle da temperatura. As tempestades de poeira são mais comuns no hemisfério sul, na Primavera e Verão, quando as temperaturas são mais levadas. Esta quantidade de poeira é o factor principal que governa a variabilidade da atmosfera de Marte, estas tempestades de poeira são variáveis de ano para ano e são um dos poucos processos geológicos que permanecem activos até ao momento actual.

## Estado da água

Um elemento que suscita polémica e incertezas é a possível existência de água líquida em Marte. Sabe-se que os parâmetros da estabilidade da água líquida requerem que a temperatura seja superior a 273 K e a pressão parcial superior a 6.1 mbar. A pressão parcial da água, à superfície, é normalmente 10<sup>-6</sup> mbar. Deste modo, nas condições actuais é pouco provável a existência de água pura no estado líquido, porém, observam-se vales formados possivelmente por água corrente num passado distante e recentemente surgiram mais dúvidas. Segundo (Renno *et al.*, 2009), a sonda Phoenix poderá ter mostrado imagens de gotas de água líquida. O objectivo da missão era determinar se Marte suportaria vida, sendo por isso essencial a existência de água líquida. Estas gotas de água serão o resultado da existência de sais no solo, e com o passar do tempo terão aumentado de tamanho ao absorver o vapor de água da atmosfera. De facto, na presença de grandes concentrações de sais com

grandes quantidades de perclorato, é possível manter-se água líquida salina nas temperaturas existentes em Marte, tanto na superfície como na subsuperfície.

Apesar da diferença da composição química das atmosferas terrestre e de Marte, existem semelhanças relativamente à dinâmica da atmosfera terrestre, tais como formação de nuvens, não existindo precipitação. Enquanto que na Terra, as nuvens representam a condensação do vapor de água, em Marte, as nuvens representam mais frequentemente a condensação de vapor de dióxido de carbono. Para a pressão atmosférica de 7 mbar, a temperatura do ponto de gelo do dióxido de carbono é de 148 K; abaixo dessa temperatura o CO<sub>2</sub> condensa, sendo por isso mais frequentes nuvens de gelo de dióxido de carbono. Também se identificaram nuvens sob a forma de gelo de água Richardson (2002), (Wilson *et al.*, 2008) .

Alguns trabalhos dentre os quais Wilson *et al.* (2007) indicam a importância das trocas radiativas que as nuvens de gelo de água têm no papel do ciclo hidrológico e da própria circulação atmosférica.

## **2.3 Relações entre as variações do clima e a concentração de poeiras atmosféricas**

Como foi referido, ocorrem frequentemente tempestades de poeiras em Marte, a maioria no hemisfério Sul durante a Primavera e o Verão. O vento movimenta partículas de rochas soltas ou mal coesas em toda a superfície, a sua capacidade depende do tamanho das partículas, da pressão atmosférica, da velocidade do vento e da rugosidade da superfície. Em Marte a velocidade do vento na atmosfera pode exceder 200 km/h (cerca de 100 Km/h). Os ciclos de transporte do vento são diferentes em Marte e Terra. Na Terra, a maior parte dos fragmentos de rochas mais facilmente transportados pelo vento são provenientes de rochas graníticas, estas areias são movimentadas pelo vento e posteriormente depositadas nos oceanos e incorporadas em rochas sedimentares. Através de processos tectónicos são reintroduzidas no ciclo eólico repetindo-se o processo. Em Marte os fragmentos depositados na superfície podem permanecer na superfície durante biliões de anos, assim as partículas movimentadas pelo vento actualmente podem ser provenientes da era Noachian em que a actividade vulcânica esteve bastante activa. Apesar de existirem bastantes tempestades de poeira, a maior quantidade depositada é equivalente a apenas alguns micrómetros de espessura, mesmo sendo a superfície coberta de material solto. No entanto, em regiões de baixa inércia térmica, tais como, Tharsis, Arabia e Elysium, a espessura pode atingir um ou dois metros de espessura na superfície. A inércia térmica é definida por  $(K\rho c)^{1/2}$ , em que  $K$  é a condutividade térmica,  $\rho$  a densidade e  $c$  o calor específico do material. Existem rochas com inércia térmica superior a 30 ( $1255 \text{ Jm}^{-2} \text{ s}^{-1/2}$ ), As inércias térmicas da superfície de Marte variam entre 1 ( $41.84 \text{ Jm}^{-2} \text{ s}^{-1/2}$ ) e 15 ( $627.6 \text{ Jm}^{-2} \text{ s}^{-1/2}$ ). As rochas sólidas possuem as maiores inércias térmicas; os materiais granulares soltos, porosos, têm baixa inércia térmica. As

tempestades de poeira provocam zonas mais escuras e mais claras na superfície, alterando os padrões do albedo, mais de um terço da superfície do planeta foi mais escuro ou mais claro pelo menos em 10 % durante as observações, Carr (2006).

De acordo com vários estudos efectuados (Fenton *et al.*, 2007), em Marte, tal como na Terra, também se detectam alterações do clima. Embora, não exista ainda um consenso sobre as causas dessas mudanças.

As variações do clima são devidas a diferentes agentes forçadores, que actuam em diferentes escalas temporais. Para a Terra, o IPCC reconhece duas origens para estes agentes forçadores a natural e a antropogénica. Constituem factores de forçamento natural, por exemplo, a variação da actividade solar e a introdução de gases de efeito de estufa e poeiras pela actividade vulcânica, ou, em maiores escalas temporais, as variações da órbita terrestre. Por outro lado, e numa escala temporal mais curta, a actividade antropogénica emite para a atmosfera gases de efeito de estufa (GEE) e aerossóis que perturbam o balanço radiativo. Estes factores alteram globalmente a composição da atmosfera e todo o balanço radiativo, em termos médios e de forma não linear.

Uma das causas da mudança climática em Marte pode ser a variação da obliquidade. De acordo com Carr (2006), as variações da obliquidade afectam a estabilidade do gelo que se encontra no solo. O gelo é estável abaixo da superfície com a obliquidade a 30° mas, é instável a menos de 20° nas latitudes inferiores a 60°. A deposição de camadas de gelo entre os 30° e 60° de latitude em ambos os hemisférios pode ser devida à variação da obliquidade. As variações da obliquidade também podem ser responsáveis pela deposição de gelo e poeiras nos pólos. Marte pode ter passado por uma idade do gelo, a 2 milhões atrás, em que a obliquidade atingiu os 35°.

Tal como referido, os aerossóis presentes na atmosfera perturbam o balanço radiativo, o aerossol atmosférico é normalmente designado como o conjunto de partículas, em suspensão na atmosfera, líquidas e sólidas, com dimensões inferiores a 100 µm e superiores às das maiores moléculas. Dependendo das suas dimensões e composição química, estas partículas podem atenuar significativamente a radiação solar que incide na superfície da superfície, perturbando o balanço radiativo e, conseqüentemente o clima.

As grandes erupções vulcânicas são uma das fontes emissoras de aerossóis. Na Terra, as grandes erupções vulcânicas ocorridas no passado tiveram efeitos significativos e quase imediatos no clima. No entanto, os vulcões são fontes esporádicas mas relativamente importantes de aerossóis. Estima-se que a actividade vulcânica seja responsável pelo lançamento para a atmosfera de 15 a 90 milhões de toneladas de partículas por ano (Jaenicke, 1993).

Uma fracção importante das partículas produzidas por estas fontes apresenta dimensões bastante reduzidas ( $\approx 1\mu\text{m}$ ), permanecendo por longos períodos na atmosfera. As erupções vulcânicas têm ainda como consequência o lançamento a elevadas altitudes de enormes quantidades de compostos sulfurosos, principalmente  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{H}_2\text{S}$  (Graf *et al.*, 1998). Em poucos dias este último oxida-se a  $\text{SO}_2$ , o qual é posteriormente revestido com gotículas de

ácido sulfúrico, num processo que se desenrola na estratosfera nas semanas e meses seguintes à erupção.

Os aerossóis assim formados constituem uma camada duradoura que se espalha por todo o Globo e funciona como filtro energético. Julga-se que o arrefecimento registado em 1993 na superfície terrestre tenha sido uma consequência indirecta da erupção do Pinatubo. Dados obtidos com satélites dois anos mais tarde permitiram concluir que a camada de aerossóis vulcânicos permanecia praticamente inalterada na estratosfera, interferindo desta forma no balanço radiativo terrestre (Grafe *et al.*, 1997). Calcula-se que as erupções das últimas décadas tenham provocado um arrefecimento global de 0.1 a 0.5°C (Salstein, 1995).

O efeito dos aerossóis no clima consiste nos mecanismos que afectam directamente o fluxo de radiação solar na superfície, podendo provocar tanto o aquecimento como o arrefecimento da superfície, dependendo das propriedades intrínsecas das partículas de aerossóis e da reflectividade da superfície. Quando ocorre uma alteração do fluxo de radiação solar, o perfil da temperatura da atmosfera é afectado. O tamanho do aerosol é um dos factores que controla a composição atmosférica, o tempo de residência e os mecanismos de remoção dos poluentes particulados da troposfera (Poster *et al.*, 1995).

Como se referiu, as tempestades de poeira são uma característica dinâmica da atmosfera de Marte. As partículas em suspensão que constituem as tempestades de areia são uma forma de aerosol atmosférico que contribui para a redução da radiação à superfície.

De acordo com Fenton *et al.* (2001), as variações de radiação verificadas na superfície de Marte são consequência de ventos fortes que por sua vez são responsáveis por provocar enormes tempestades de poeiras, aprisionando a radiação à superfície e elevando a temperatura da atmosfera.

Através da comparação de mapas térmicos elaborados pela sonda Viking entre 1976 e 1978 e duas décadas mais tarde pela sonda Mars Global Surveyor, entre 1999 e 2000, verificou-se que grandes zonas da superfície do planeta se converteram em mais escuras ou mais claras, ou seja, alteraram o albedo nas últimas três décadas; isto quer dizer que se alterou a percentagem de radiação reflectida pelo planeta.

Em consequência da absorção da radiação solar pelas partículas, geram-se gradientes de temperatura que, por sua vez, provocam mais ventos e em seguida mais partículas são levantadas para a atmosfera. Através do vento, estas poeiras circulam pela atmosfera dispersando-se por várias direcções do planeta e este ciclo repete-se. Os resultados obtidos por estes estudos sugerem que, as mudanças no albedo afectaram as recentes mudanças climáticas de Marte. Ainda segundo Fenton *et al.* (2001) este aquecimento está a diminuir, uma vez que as maiores tempestades de poeiras foram observadas na década de 70 do séc. XX.

## 2.3 Dados e metodologia

Os modelos climáticos de circulação geral (GCMs) permitem simular a circulação geral da atmosfera tendo em consideração os diferentes forçamentos. Os GCMs constituem uma ferramenta preciosa permitindo estimar, à escala global, valores de temperatura, pressão, entre outras variáveis para diferentes cenários. Os modelos produzem resultados diferentes consoante os cenários simulados e também, como estes resultados variam quando se simula o mesmo cenário com diferentes modelos.

A análise realizada para a temperatura e pressão em Marte utilizou dados da Mars Climate Database (MCD).

Mars Climate Database (MCD) (URL1) é uma base de dados estatísticos que descreve o clima e o ambiente da atmosfera de Marte. Foi construída através dos dados de um modelo de clima global (GCM) desenvolvido no Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS, France, em colaboração com a University of Oxford, UK, Agência Espacial Europeia (ESA) e Centre National d'Études Spatiales (CNES). O MCD pode ser usado como uma ferramenta para os planeamentos das missões na Europa e nos EUA.

O ambiente de Marte é altamente variável, apesar das novas observações disponíveis tanto do Mars Global Surveyor, como do Mars Express, é difícil prever as condições meteorológicas em determinada altura, sobretudo porque alguns parâmetros meteorológicos não são observados directamente tais como o vento, o vapor de água, a composição atmosférica, etc, o que torna mais difíceis as previsões Forget *et al.* (2008).

O modelo GCM de Marte foi validado usando dados observados disponíveis, que representam segundo Forget *et al.* (2008), o melhor conhecimento do estado actual da atmosfera de Marte, dadas as observações e as leis físicas que governam o ambiente atmosférico, assim como, as condições de superfície do planeta.

Neste contexto, o modelo quantificou diferentes simulações de cenários de acordo com a concentração de poeiras existentes na atmosfera, tendo em conta os fluxos radiativos associados ao dióxido de carbono e aos próprios aerossóis. O ciclo hidrológico é representado pela circulação atmosférica entre a superfície gelada e a formação de nuvens de gelo.

Neste caso de estudo, os dados referem-se a observações feitas pelo TES (Thermal Emission Spectrometer, 1999-2001) da missão Mars Odyssey e focalizam-se na variável temperatura e pressão atmosférica.

### Dados adicionais

Como ocorre na Terra, também em Marte há estações do ano. Sabemos que, as estações do ano na Terra devem-se à inclinação do eixo de rotação de 23.5° em relação a uma recta perpendicular ao plano de rotação da órbita que

o planeta descreve à volta do sol (obliquidade da Terra). Assim, a quantidade de radiação solar que chega aos hemisférios Norte e Sul varia ao longo do ano, originando as diferentes estações. O eixo de rotação de Marte também é inclinado, cerca de  $25.2^\circ$ , e assim, da mesma forma que acontece na Terra, os hemisférios Norte e Sul de Marte também não recebem sempre a mesma quantidade de radiação solar ao longo do ano.

Na Figura 2.2 e no Quadro 2.5 apresenta-se a duração dos meses e das estações do ano em Marte segundo (URL1), em que os meses são definidos como o tempo que Marte leva a percorrer 30 graus de longitude solar.

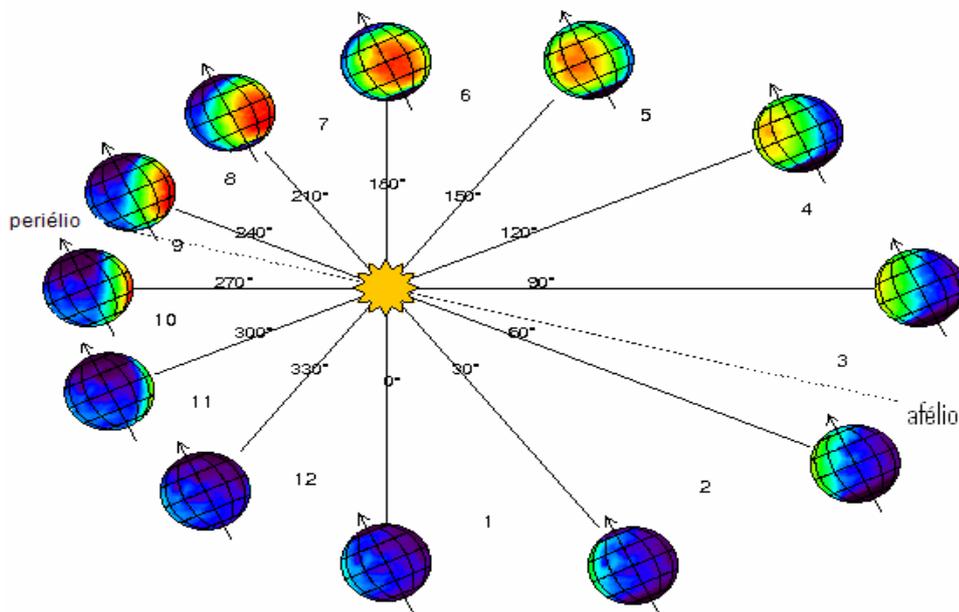


Figura 2.2– Longitude solar ( $L_s$ ) de Marte. (URL1)

Quadro 2.3 – Duração dos meses e estações do ano de Marte. (URL 1)

Número do mês	Intervalo de longitude em graus		Intervalo de dias		Duração de dias	Especificidades
1	0	30	0.0	61.2	61.2	Equinócio da Primavera no H. Norte em Ls=0
2	30	60	61.2	126.6	65.4	
3	60	90	126.6	193.3	66.7	Afélio (maior distância entre Sol e Marte) em Ls=71
4	90	120	193.3	257.8	64.5	Solstício de Verão no H. Norte em Ls=90
5	120	150	257.8	317.5	59.7	
6	150	180	317.5	371.9	54.4	
7	180	210	371.9	421.6	49.7	Equinócio de Outono no H. Norte em Ls=180 Início das tempestades de poeira
8	210	240	421.6	468.5	46.9	Tempestades de poeira
9	240	270	468.5	514.6	46.1	Periélio (menor distância entre Sol e Marte) em Ls=251
10	270	300	514.6	562.0	47.4	Solstício de Inverno no H. Norte em Ls=270 Tempestades de poeira
11	300	330	562.0	612.9	50.9	Tempestades de poeira
12	330	360	612.9	668.6	55.7	Fim das tempestades de poeira

Durante o periélio (Ls=250°), que ocorre relativamente próximo do solstício de Verão do hemisfério Sul (Ls=270°), o planeta recebe uma insolação 40% superior ao afélio. Isto ocorre devido a acentuada excentricidade da órbita de Marte. Por comparação, a Terra recebe apenas 3% a mais de insolação no periélio.

A órbita de Marte é mais elíptica que a da Terra. Devido a esta diferença de distância ao Sol, a superfície de Marte pode experimentar também maiores variações de temperatura no decorrer de um ano. As temperaturas superficiais dependem da latitude e da estação do ano bem como do albedo e da inércia térmica da superfície.

### 2.3.1 Variabilidade espacial a nível global

Como já foi anteriormente referido, a metodologia usada relativamente ao estudo da caracterização das variáveis climáticas de Marte baseou-se na aplicação dos resultados das simulações efectuadas pelo modelo de clima global (GCM). Os resultados obtidos foram utilizados para a construção de uma base de dados utilizada na representação dos mapas de temperatura e pressão com o programa *Surfer*. Para a Terra, a metodologia baseou-se igualmente na construção de mapas extraídos das reanálises do NCEP (URL 2).

Para facilitar a comparação da variação espacial das variáveis climatológicas entre Marte e a Terra, elaboraram-se mapas da variação anual e sazonal da temperatura e pressão em função das coordenadas geográficas.

Para efeitos comparativos e tendo em conta que os dados de Marte se referem ao período 1999 a 2001, foram elaborados mapas de temperatura e pressão na atmosfera da Terra referentes ao mesmo período.

Na Terra, nas latitudes médias, verificam-se temperaturas relativamente baixas sobre os continentes e temperaturas mais elevadas sobre os oceanos. Estas diferenças resultam da diferença do calor específico entre os continentes e oceanos e da libertação de calor latente, que é maior sobre os oceanos.

Para efeitos comparativos, apresentam-se nas Figuras 2.3 a 2.7 as distribuições espaciais das temperaturas anuais e sazonais em Marte e na Terra.

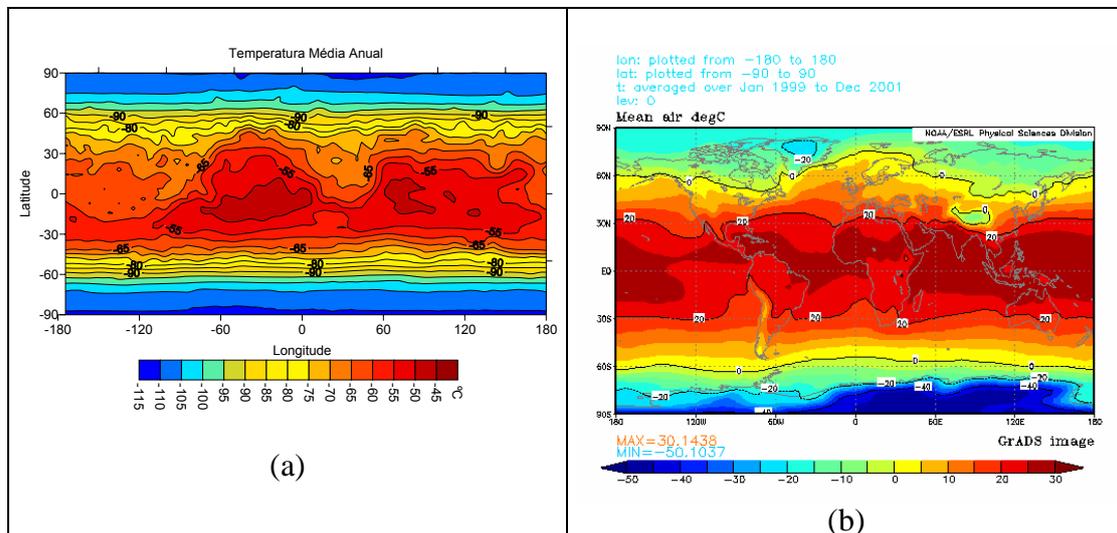


Figura 2.3 - Variação espacial da temperatura média em Marte (a) e Terra (b).

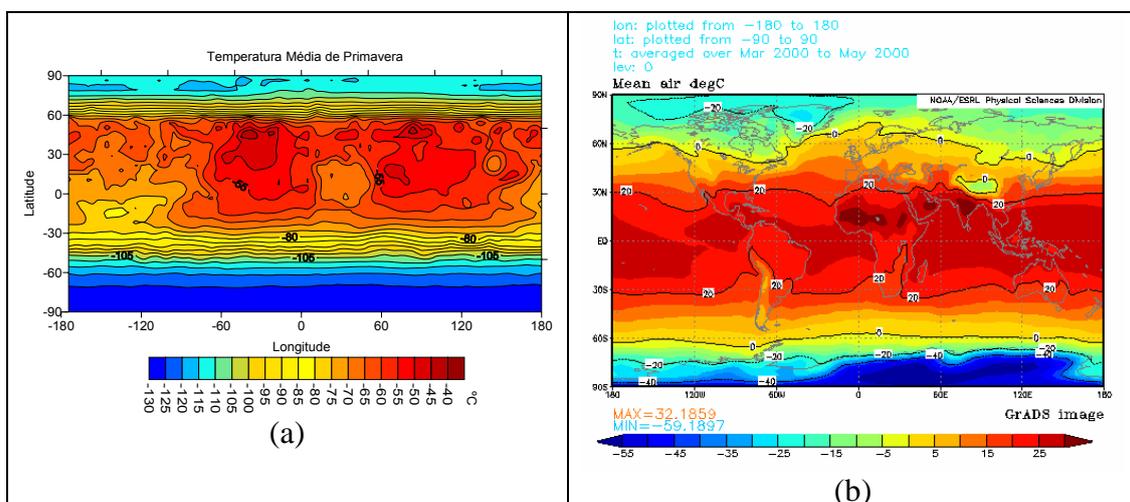


Figura 2.4 - Variação espacial da temperatura média em Marte (a) e Terra (b) na estação de Primavera.

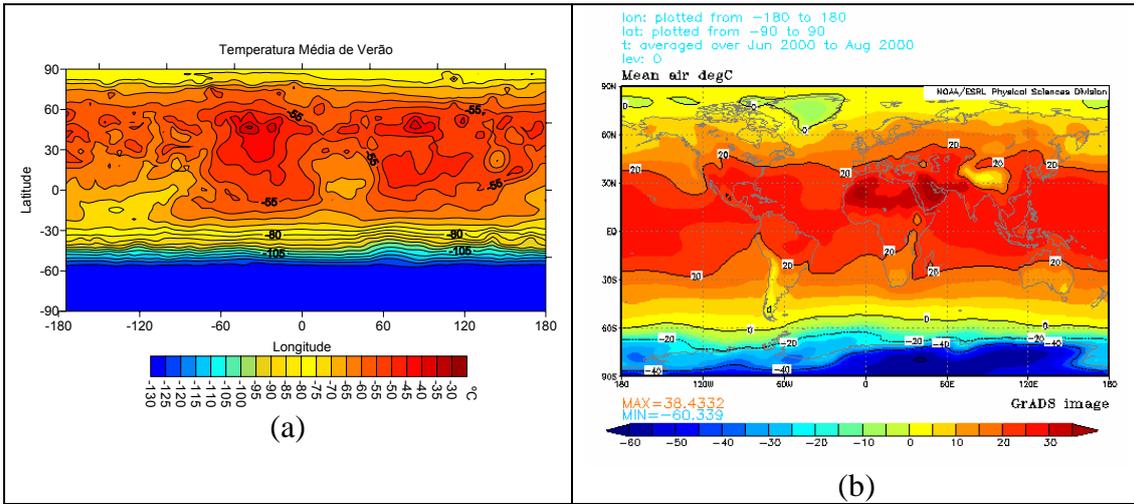


Figura 2.5 - Variação espacial da temperatura média em Marte (a) e Terra (b) na estação de Verão.

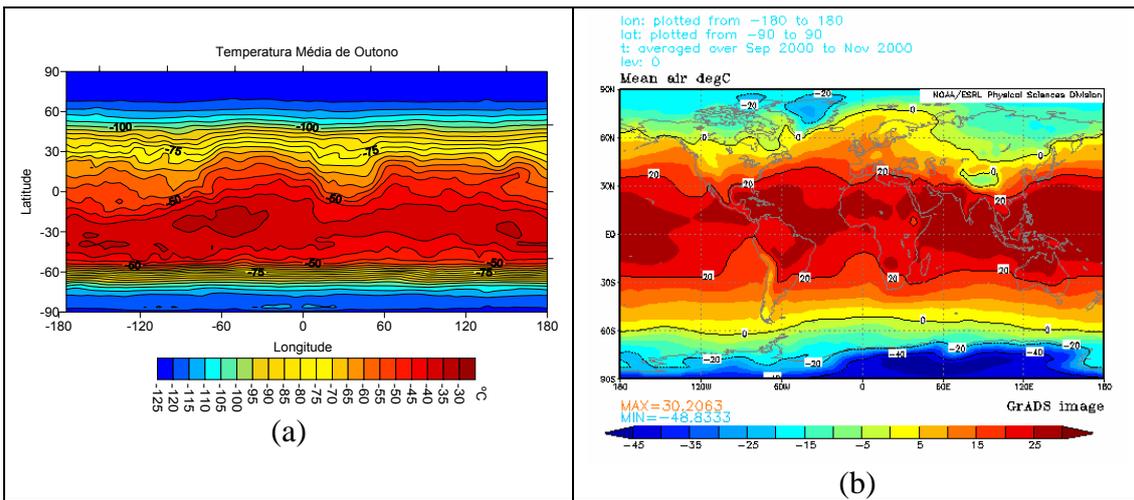


Figura 2.6 - Variação espacial da temperatura média em Marte (a) e Terra (b) na estação de Outono.

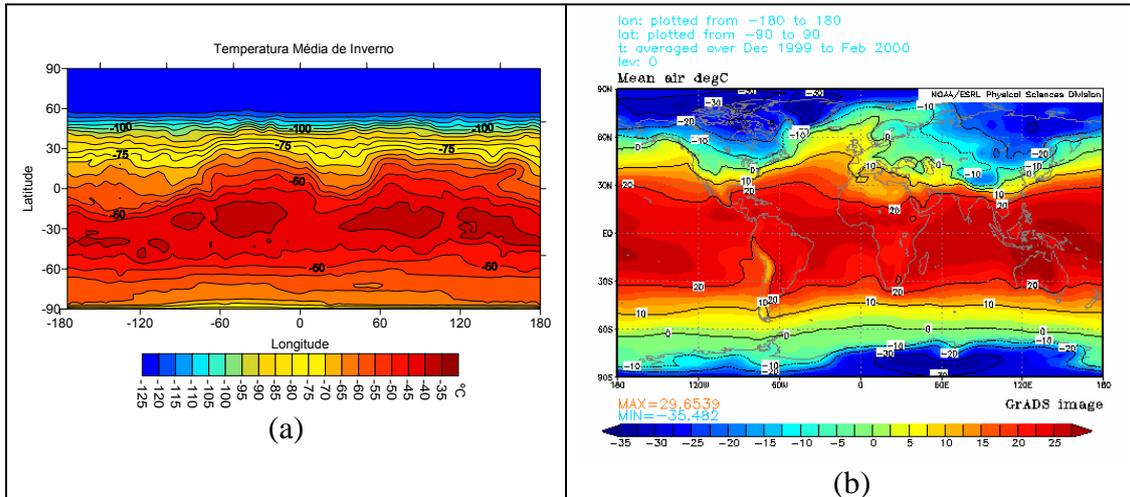


Figura 2.7 - Variação espacial da temperatura média em Marte (a) e Terra (b) na estação de Inverno.

Pela observação da Figura 2.3, desde logo se pode constatar que, as temperaturas médias anuais em Marte são negativas. A sua distribuição apresenta mínimos nos pólos e máximos no equador, da mesma forma que na Terra. Contudo, na Terra os mínimos absolutos verificam-se no hemisfério Sul aproximadamente entre os 75° e 90°S e os 30°W e 150°E, e em Marte, verificam-se entre os 0° a 60° de latitude em ambos os hemisférios.

No que diz respeito aos máximos absolutos, encontram-se em redor do equador em ambos os planetas. No entanto em Marte existe uma simetria em relação ao eixo centrado sensivelmente na longitude de 20° E.

Analisando a Figura 2.4 verifica-se que, em Marte, os máximos absolutos deslocam-se para o Norte para aproximadamente os 30° de latitude, verificando-se conseqüentemente um aumento de temperaturas no Hemisfério Norte relativamente às médias. Abaixo dos 30° S verifica-se uma homogeneização nas isotérmicas.

Na Terra observa-se uma diminuição das temperaturas, no hemisfério Sul, a distribuição das mínimas centra-se nas longitudes de Este. As máximas absolutas mantêm-se deslocando-se para o deserto do Sahara e Índia.

A análise da Figura 2.5 mostra padrões semelhantes na estação de Verão tanto na Terra como em Marte. Os mínimos absolutos centram-se no hemisfério Sul nos dois planetas. Observa-se um aumento de temperatura no Hemisfério Norte em ambos os planetas, em relação aos valores anuais. No entanto mantêm-se as mesmas temperaturas negativas no Hemisfério Sul mais acentuadas entre sensivelmente os 30° W e 150° E.

Tal como acontece na Primavera, em Marte os centros de máximos encontram-se centrados aproximadamente nos 30° de latitude do hemisfério Norte.

O gradiente térmico aumenta, mantendo-se as mínimas absolutas e diminuindo as máximas.

Em relação à estação de Outono (Figura 2.6), em Marte, observa-se uma homogeneização das isótermicas acima dos 40° de latitude e um deslocamento dos centros de máximas para o Sul, para os 30° de latitude. Além disso verifica-se uma intensificação das temperaturas nos dois centros de máximos.

No que diz respeito à Terra pode constatar-se que, em termos gerais o padrão é muito semelhante à estação de Primavera (Figura 2.4).

Da análise da Figura 2.7, verifica-se em Marte um aumento da temperatura no Hemisfério Sul relativamente aos valores anuais acompanhado de um deslocamento dos dois centros de máximas para o Sul, para aproximadamente os 30° de latitude.

Na Terra, observa-se que a área fria avança no hemisfério Norte até aos 60° de latitude enquanto que no hemisfério Sul as temperaturas negativas se mantêm na Antártida. Além disso verifica-se uma intensificação das temperaturas na Austrália.

Em Marte, nas altas latitudes durante o Inverno as temperaturas superficiais são controladas principalmente pela condensação e sublimação do CO<sub>2</sub>. Sendo o dióxido de carbono, o maior constituinte da atmosfera, congela de modo a formar uma imensa calote polar de gás carbónico sólido ("gelo seco"), em cada pólo, alternadamente.

O dióxido de carbono também forma uma grande cobertura de neve e evapora-se novamente com a chegada da Primavera, em cada hemisfério. No Outono, com temperaturas à volta dos -120 °C, o CO<sub>2</sub> começa a condensar. Durante o Verão, as temperaturas atingem aproximadamente os -70 °C e forma-se gelo de água, na calota norte; na calota sul, o CO<sub>2</sub> não sublima completamente.

A análise das figuras anteriores permite verificar diferenças significativas entre os dois planetas. Estas diferenças acentuam-se essencialmente na distribuição sazonal: enquanto na Terra, os máximos absolutos centram-se à volta do equador, em Marte tal não acontece. Em Marte verifica-se, uma subida dos centros de máximos para os 30° de latitude, nas estações de Primavera e Verão e uma descida no Outono e no Inverno.

De salientar ainda que, as calotes polares apresentam variações muito nítidas e periódicas. No Inverno de um hemisfério a camada de gelo torna-se bastante extensa atingindo sensivelmente metade da latitude entre o pólo e o equador e no Verão, acontece o contrário. Com temperaturas desta ordem de magnitude, o CO<sub>2</sub> condensa, o que significa que os pólos são revestidos por CO<sub>2</sub> sólido.

De modo a tentar melhorar a avaliação em termos comparativos de Marte com a Terra, foi efectuada uma comparação com a distribuição dos valores de pressão atmosférica nos dois planetas. Nas Figuras 3.4 a 3.5 estão representadas as distribuições da pressão atmosférica média anual e média sazonal, em Marte e na Terra.

A distribuição da energia solar e as características da atmosfera são factores essenciais para a existência de vários tipos de climas, influenciando ainda a circulação geral atmosfera. Considerando apenas os movimentos de larga escala planetária, os movimentos sinópticos e o movimento dominante da

camada de atmosfera junto ao solo, dividimos os hemisférios Norte e Sul em faixas bem diferenciadas Peixoto(1983):

- Faixas zonais de alta e baixa pressão.

Baixas pressões: é uma região em que o ar relativamente quente se eleva e favorece a formação de nuvens e precipitação.

Altas pressões: é uma região em que o ar subside aquecendo e ficando muito estável, impedindo a formação de nuvens e precipitação.

- Próximo ao equador, o ar convergente de ambos os hemisférios é associado a uma região de baixas pressões equatorial, região de maior precipitação;
- Nas faixas em torno de 20° a 35° de latitude (norte e sul), estão localizadas as zonas subtropicais de alta pressão. São regiões de subsidência e vento divergente;
- Na região em torno de 50° a 60° de latitude, na zona da frente polar, os ventos polares de leste e os ventos de oeste de latitudes médias se encontram para formar uma zona de convergência conhecida como baixa subpolar;
- Finalmente, junto aos pólos estão as altas polares das quais se originam os ventos polares de leste.

Existe uma "quebra" da distribuição zonal causada pela distribuição dos continentes.

A distribuição zonal de pressão que existe, na realidade está na região de baixas pressões subpolar no hemisfério sul, onde o oceano é contínuo.

No hemisfério norte, como há uma proporção maior de massas continentais, esta distribuição zonal é substituída por células semi-permanentes de alta e baixa pressão.

Em ambos os hemisférios, os subtropicais (~30°latitude) são dominados por células de alta pressão.

Estas células são limitadas por uma zona contínua de baixa pressão perto do equador.

Esta distribuição é ainda complicada por grandes variações sazonais de temperatura, que servem para fortalecer ou enfraquecer estas células de pressão.

Tal como se observou com as temperaturas, também a diferença entre a pressão atmosférica na Terra e em Marte é marcante.

Quando a Viking 1 aterrou na superfície de Marte, a pressão atmosférica registada variou de 6.9 a 9 mbar, menos de um centésimo da pressão ao nível do mar na Terra.

Como referido anteriormente, o componente maioritário da atmosfera de Marte é o dióxido de carbono. O ciclo anual deste gás através das trocas entre a atmosfera e a superfície reflecte-se na variabilidade de pressão atmosférica Smith *et al.*( 2003). A dissipação sazonal do dióxido de carbono congelado nos pólos (gelo seco), provoca mudanças de pressão, tornando a atmosfera mais densa. Além disso, devido à própria topografia também a pressão assume valores bastante diferentes consoante uma determinada região do planeta.

A altura da atmosfera em que a pressão diminui para  $\frac{1}{e}$  ou (0.3678) do seu valor original é aproximadamente 10 km. Aquando da aterragem da Viking 1, num local de -2km de elevação, a pressão registada foi de 7.5 mbar e no topo do Olympus Mons a pressão variou de entre 0.7 mbar e 14 mbar, na parte mais profunda de Hellas (Carr, 2006).

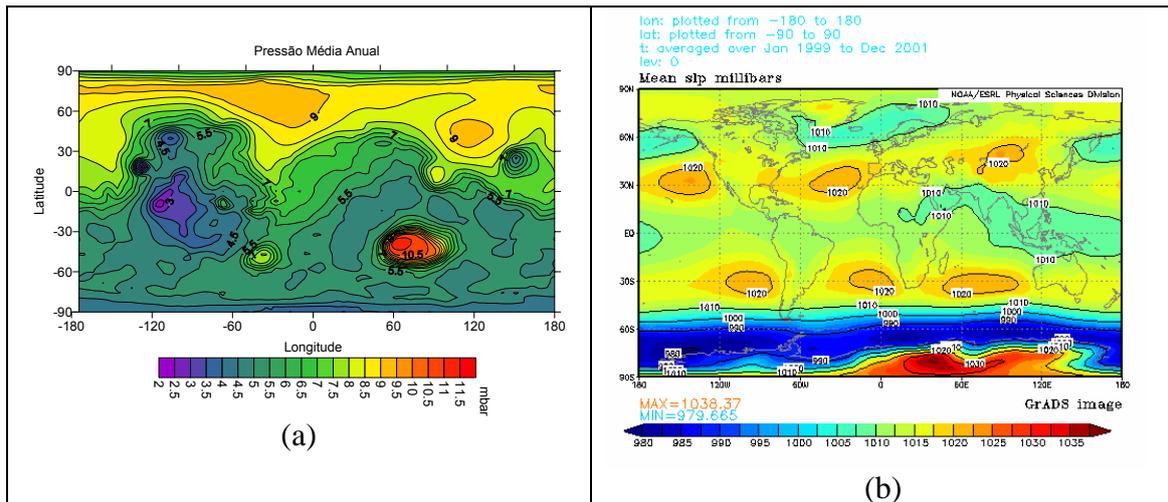


Figura 2.8 - Variação espacial da pressão atmosférica média em Marte e Terra.

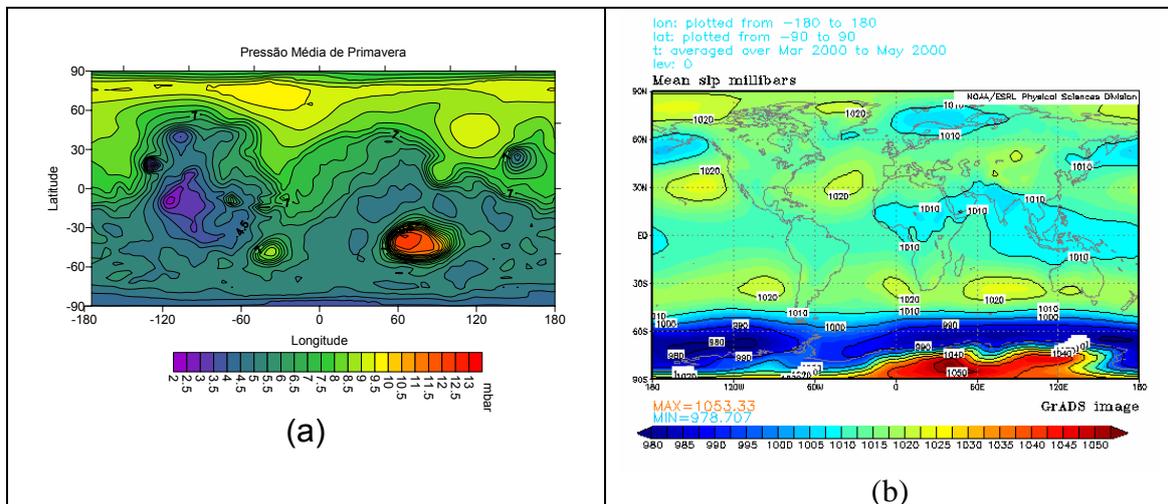


Figura 2.9 - Variação espacial da pressão atmosférica média em Marte e Terra na estação de Primavera.

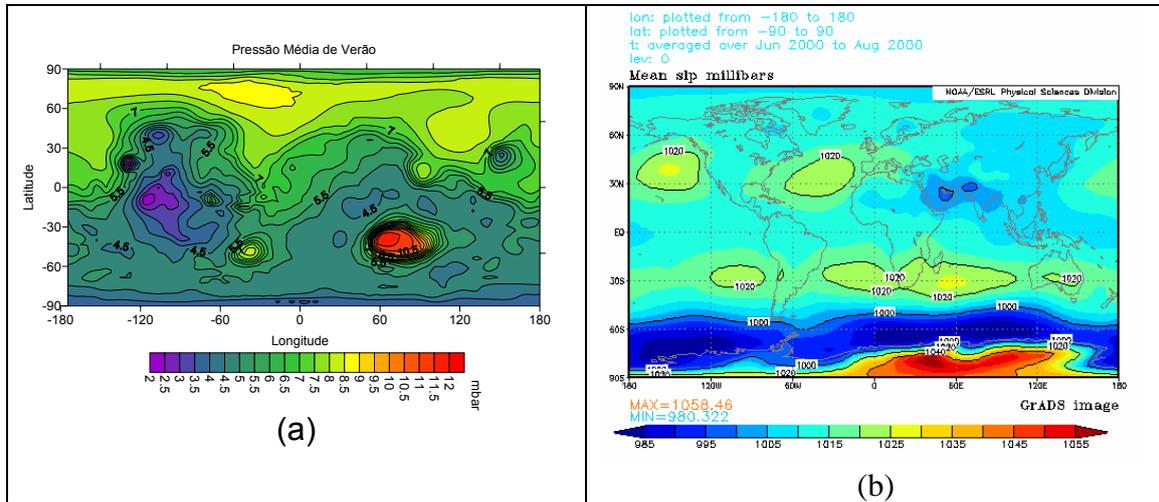


Figura 2.10 - Variação espacial da pressão atmosférica média em Marte e Terra na estação de Verão.

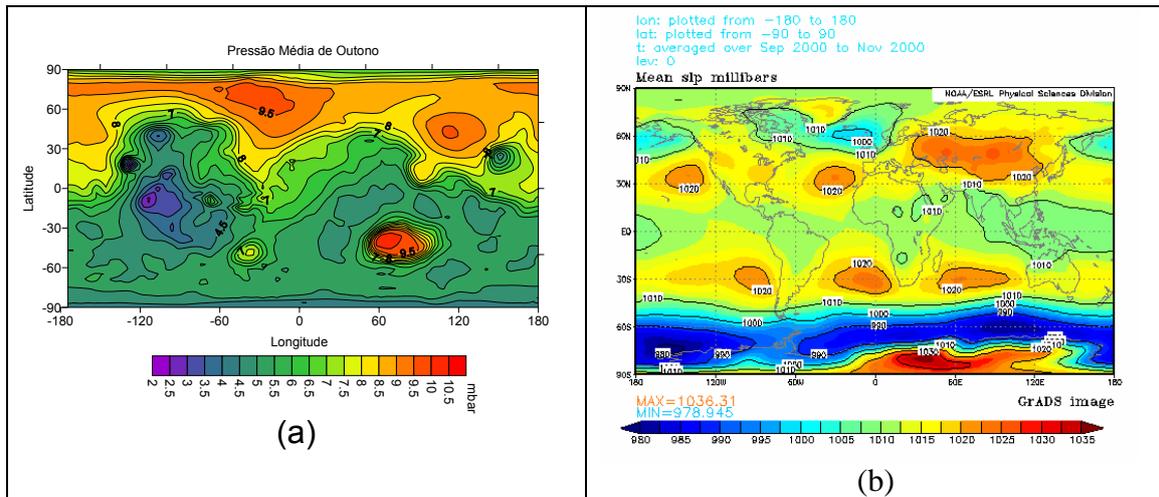


Figura 2.11 - Variação espacial da pressão atmosférica média em Marte e Terra na estação de Outono.

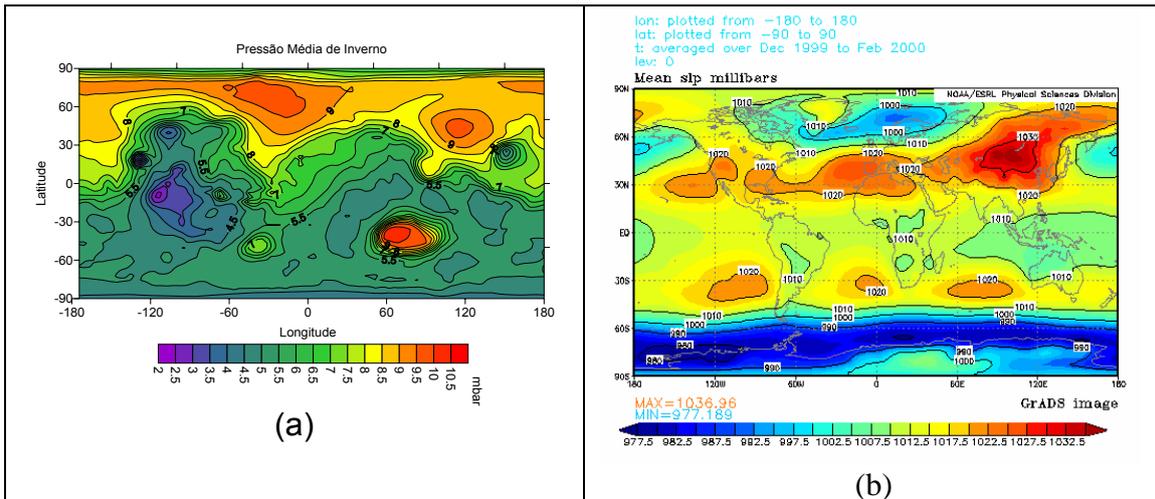


Figura 2.12 - Variação espacial da pressão atmosférica média em Marte e Terra na estação de Inverno.

Desde logo se pode constatar pela análise das Figuras 2.8 a 2.12, que os valores da pressão atmosférica em Marte e Terra são de grandeza bem diferente. Enquanto que na Terra oscila entre os 979.7 e 1038.4 mb em Marte oscila entre os 3.5 e os 10.5 mb.

Em Marte são visíveis duas ciclogéneses, um anticiclone localizado entre os 75°E e 45°S e uma depressão localizada entre os 120°W e 15°S. Estes centros de altas e baixas pressões correspondem aos pontos mais baixos, nas bacias mais profundas e aos mais altos, na região da cordilheira de Tharsis, nesta região encontram-se os maiores vulcões (Figura 2.1).

Pelo facto de os hemisférios Norte e Sul da Terra serem bastante diferentes em relação à sua fisiografia também a pressão média de cada hemisfério é diferente, sendo de 983.6mb e 988.0 mb para os hemisférios Norte e Sul respectivamente. A pressão média global é de aproximadamente 958.8mb (Peixoto, 1983).

No Hemisfério Sul, na Terra, durante o verão formam-se três centros de alta pressão subtropical localizados sobre o Atlântico, Pacífico e Índico, respectivamente. Estes centros quase se “tocam”, caracterizando uma faixa subtropical de altas pressões.

A depressão verificada na Ásia é provocada pelo rápido aquecimento provocado pelo sol intenso sobretudo em Julho, nas áreas do Norte de África e Ásia.

Durante o Verão, principalmente em Julho, a zona de convergência intertropical geralmente encontra-se ao norte do equador. Esta troca de posição acontece porque a altitude do sol é agora mais alta no Hemisfério do Norte.

No hemisfério norte, durante o Inverno formam-se duas células ciclónicas. A pressão destes centros é intensa e estão localizados por cima dos oceanos,

junto ao sul de Gronelândia. Estas áreas de baixa pressão são responsáveis por gerar elevados ciclones, nas latitudes médias.

Também durante o Inverno, no hemisfério norte existe uma “forte” alta pressão sobre a Eurásia, conjunto da Europa e da Ásia e uma alta mais “fraca” sobre a América do Norte.

No Inverno, observa-se que a faixa subtropical de altas pressões apresenta os centros mais intensos sobre o Atlântico, o Pacífico e o Índico.

As altas pressões observadas particularmente no Norte da Índia e Sudoeste dos Estados Unidos são substituídas pelas baixas pressões verificadas durante o Verão (Figura 3.9), em consequência das elevadas temperaturas registadas na superfície dos continentes.

Da análise das Figuras 2.8 a 2.12, verifica-se que os sistemas de baixas e altas pressões mantêm-se no decorrer das estações, embora sofram intensificações. De facto, durante as estações de Outono e Inverno, os centros de altas pressões do hemisfério Norte intensificam-se. Os valores de pressão média em todo o planeta situam-se entre os 3.5mb e os 10.5 mb. Salienta-se ainda que, a diferença sazonal é mais evidente no hemisfério Norte.

Tal como seria esperado, a comparação da visualização do mapa de Marte (Figura 2.1), com as Figuras 2.8 a 2.12, permite concluir que as regiões mais altas e mais baixas correspondem a sistemas de baixas e altas pressões.

Na Terra é visível a diferença entre os dois hemisférios, de valores extremos de baixa pressão no hemisfério Sul, na ordem de 985 mb na região da Antártida. Por outro lado, é constante a formação de altas pressões nos subtrópicos em ambos os hemisférios (~30°latitude), salientando-se no entanto uma diferença sazonal mais evidente no hemisfério norte.

As células de pressão são configurações mais ou menos permanentes, como as altas subtropicais, que se observam tanto no Verão como no Inverno. Todavia, outras são sazonais, como a baixa pressão no Inverno localizada na América do Sul, mais particularmente no Brasil Central.

Assim como em Marte, também na Terra, os sistemas de baixas e altas pressões mantêm-se no decorrer das estações, apesar de também sofrerem intensificações. Os anticiclones subtropicais em cada hemisfério durante o Verão sofrem um desenvolvimento, especialmente sobre o Atlântico Norte e ainda no Hemisfério Norte, no oceano Pacífico. Nas altas latitudes do Hemisfério Norte, os sistemas de baixa pressão intensificam-se durante o Inverno, enquanto que no hemisfério Sul sofrem apenas uma pequena variação sazonal.

É de realçar que os sistemas de baixa pressão do hemisfério sul formam uma cintura zonal quase contínua à volta da Antártica, com valores muito baixos de pressão à superfície.

As maiores variações sazonais verificam-se no continente asiático, onde um anticiclone forte se desenvolve a Norte da Sibéria, durante o Inverno e, um ciclone durante o Verão a Norte do Índia, como referido anteriormente. Esta mudança é associada ao ciclo de monção da Ásia e o movimento da zona intertropical de convergência (ITCZ), que é empurrada para sul pelo desenvolvimento do intenso sistema de alta pressão. Outra situação semelhante acontece sobre o continente Norte-Americano, embora menos intenso.

As trocas sazonais nas cinturas de altas pressões que se encontram entre os 30° N e os 30° S, são acompanhadas por uma intensificação durante a estação de Inverno. Enquanto que, as altas pressões subtropicais nos oceanos enfraquecem no Inverno, embora mantenham a sua identidade.

Tal como foi referido, valores extremos de baixa pressões na ordem dos 650mb encontram-se na zona envolvente da Antártica. Os valores de pressão média global mais elevados ocorrem durante a estação de Verão, em oposição aos menores que ocorrem no Inverno. Na região polar do hemisfério sul da Terra observa-se predominantemente células de alta pressão.

### **2.3.2 Variabilidade temporal Marte vs Terra**

Tal como se referiu anteriormente, no planeta Terra, a temperatura do ar varia durante o dia (ciclo diário da temperatura), apresentando um mínimo pouco antes do nascer do sol e um máximo cerca do meio-dia. No entanto factores locais podem alterar esta variação tais como a latitude, a época do ano e a nebulosidade diurna. Por exemplo, no equador, a duração do dia é cerca de 12 horas em todos os meses enquanto que, nos pólos varia entre as 0 horas e as 24 horas no Inverno e no Verão, respectivamente.

As regiões polares recebem a quantidade máxima de insolação durante o solstício de Verão, o que corresponde aos períodos de dia contínuo.

A órbita elíptica que a Terra descreve em volta do Sol causa uma quantidade de insolação recebida durante o solstício de Dezembro, no hemisfério sul, maior que a recebida pelo hemisfério norte durante o solstício de Junho, o equador tem os máximos de insolação durante os equinócios e os mínimos nos solstícios.

Com o objectivo de conhecer o comportamento horário da temperatura em Marte, apresentam-se nas Figuras 2.13 e 2.14, a variação da temperatura horária ao longo do ano no ponto do hemisfério norte (45°E;45°N) e no ponto do hemisfério sul (45°E;45°S) e a variação da temperatura horária durante a Primavera desde os 60°S aos 60°N no mesmo ponto de longitude de 45°E.

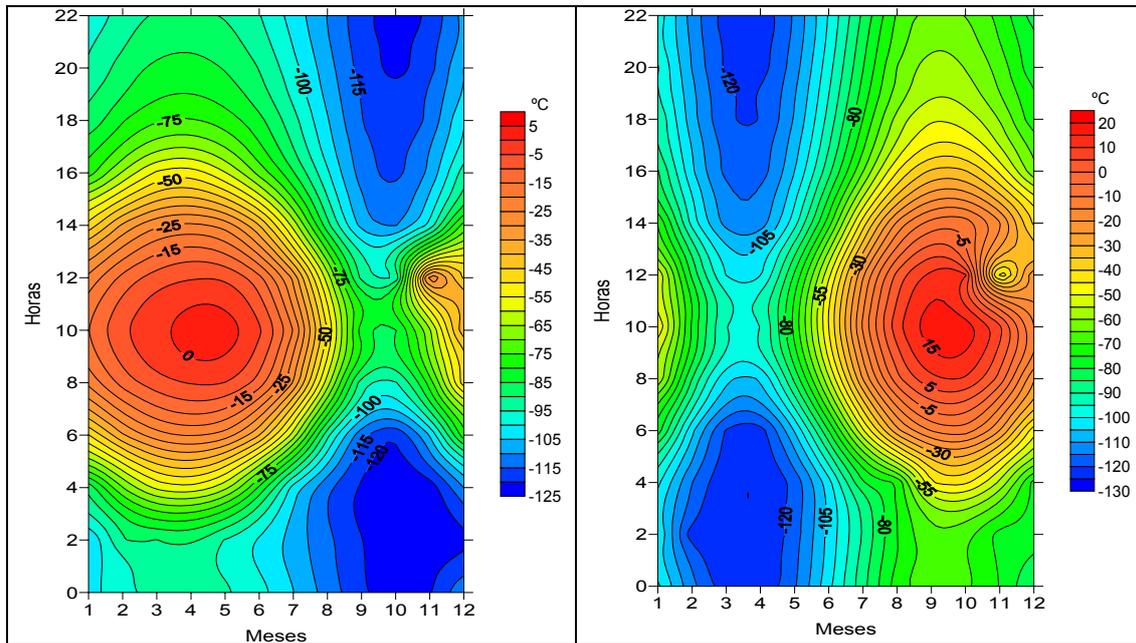


Figura 2.13- Variação da temperatura horária ao longo do ano no ponto do hemisfério norte (45°E;45°N) e no ponto do hemisfério sul (45°E;45°S).

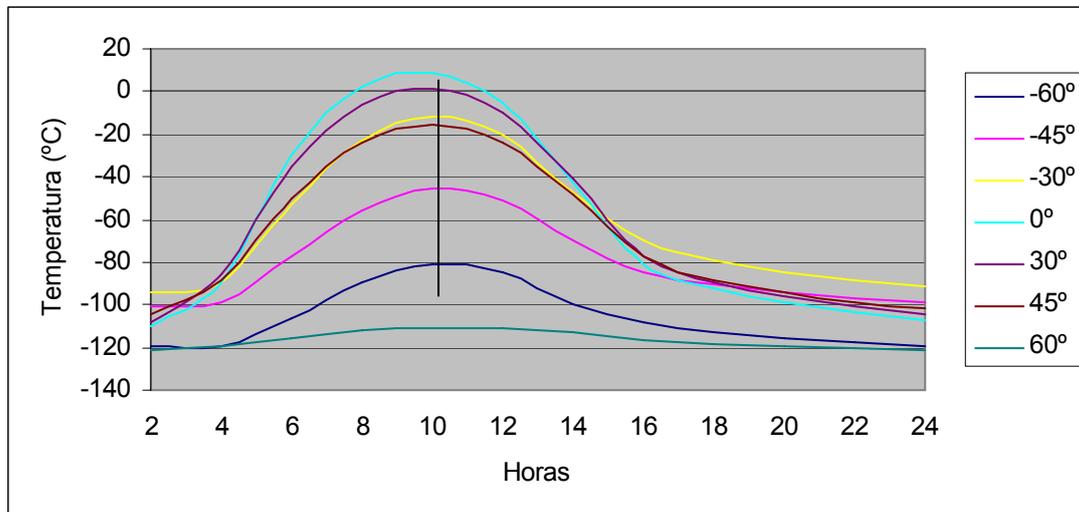


Figura 2.14 – Variação da temperatura horária nas latitudes de -60° a 60° no ponto de longitude de 45°E.

Pela observação da Figura 2.13, nos pontos em análise, verifica-se que as temperaturas mais elevadas ocorrem entre as 6h e as 14h durante a Primavera e o Verão dos dois hemisférios. Além disso verificam-se temperaturas mais elevadas no hemisfério sul, sendo este facto devido à acentuada excentricidade da órbita de Marte, durante o periélio ( $L_s=250^\circ$ ), que ocorre

relativamente próximo do solstício de Verão do hemisfério Sul ( $L_s=270^\circ$ ), onde o planeta recebe uma insolação 40% superior ao afélio. Por comparação, a Terra recebe apenas 3% a mais de insolação no periélio (Carr, 2007). É ainda de salienta pela observação da Figura 2.14 que o valor, mais elevado ocorre no equador seguido das latitudes de  $30^\circ$  do hemisfério norte e sul e as mais baixas nos  $60^\circ$  de latitude norte e sul.

Em suma, a disponibilidade de dados observacionais e dados simulados que representam o comportamento da atmosfera oferecem a possibilidade de se entender melhor o clima de Marte, no entanto, existe ainda muito trabalho para ser feito nomeadamente em relação à circulação geral do planeta.

# Capítulo 3

## **3 Variabilidade temporal das séries longas para Coimbra**

A variabilidade climática é influenciada tanto por factores naturais como por factores antropogénicos. Sendo um processo natural, ocorre numa vasta gama de escalas. Desde a década de 70 que alguns cientistas se têm vindo a interessar pela a influência que alguns factores de origem antropogénica podem ter na alteração do clima, entre elas especialmente a queima de combustíveis fósseis. Alguns autores têm defendido a tese de que estes factores estão a causar alterações sem precedentes no sistema climático, conduzindo a uma subida da temperatura média global à superfície até níveis muito elevados, sem paralelo nas últimas centenas de anos. Além disso, esses autores defendem que essas alterações podem ocorrer muito rapidamente, ainda na primeira metade do século presente ou estão mesmo já a ocorrer (Santos e Miranda, 2006).

Este capítulo tem por objectivo analisar a variabilidade climática à grande escala temporal, e debruça-se sobre a variação da temperatura e da precipitação em Coimbra, no domínio do tempo, ao longo do último século e, entre outras coisas, pretende responder à questão de saber se as variações

observadas representam ou não uma tendência estatisticamente significativa. Uma vez que tanto a temperatura, como a precipitação, como outros elementos climáticos, podem variar substancialmente de um ano para o outro, ou de uma década para a outra, numa determinada região, torna-se frequentemente muito difícil distinguir entre o surgimento de uma tendência importante e uma simples oscilação natural do padrão climático. Do nosso ponto de vista, é esta dificuldade que tem levado alguns autores a defender uma tendência de aquecimento crescente, com o conseqüente estabelecimento de cenários futuros catastróficos.

Torna-se imperioso notar que estas oscilações naturais de período longo mascaram registos climáticos de curta duração, com 30/40 anos, parecendo tratar-se de uma tendência linear, como é apresentado por Santos e Miranda (2006) mas que não o é de facto. Assim, há que ter muito cuidado quando se conclui apressadamente por um aquecimento global de origem antropogénica com base em séries climáticas de tão curta duração.

Os registos climáticos de longa duração e boa qualidade em que baseamos esta apresentação, não só evidenciam a variabilidade natural dos campos da temperatura e da precipitação ao longo do último século e meio, como também proporcionam uma base sólida para a interpretação de variações futuras.

Em primeiro lugar é feito um estudo das variáveis temperatura e precipitação com séries longas com dados do IGUC, compreendidas entre o período 1865-2005, sendo analisadas médias, desvios padrão e tendências.

Na sequência dos resultados deste estudo surgiram dois propósitos que são estudados separadamente. Assim, adoptamos o seguinte procedimento:

- Análise de projecções para o ano 2100 a partir das séries 1941-2005;
- Análise de projecções para o ano 2100 a partir das séries 1976-2005, que surgem das mudanças climáticas observadas nas séries longas.

Atendendo à escala em que se pretende analisar os resultados, a abordagem adoptada recorreu à aplicação do modelo estocástico LARS-WG (*stochastic weather generator*) (URL3). Este modelo estocástico tem por objectivo a geração de um conjunto de dados com as mesmas características estatísticas da série histórica.

### 3.1 Evolução histórica climática em Coimbra

#### 3.1.1 Breve referência histórica sobre a localização da estação



Instituto Geofísico da Universidade de Coimbra

A cidade de Coimbra ocupa uma área de 319,4 Km<sup>2</sup>, com aproximadamente 159 083 habitantes residentes (dados de 2006), pode ser considerada como a terceira maior cidade do país.

Coimbra situa-se no litoral centro de Portugal, mais concretamente na sub-região do baixo Mondego, a uma altitude de 139.61m, latitude 40° 12' 25" N e longitude 08° 25' 30" W, encontra-se numa zona de latitudes médias onde a circulação geral da atmosfera se faz sentir pela deslocação para Norte durante o Verão, dos centros de altas pressões, em particular do anticiclone dos Açores. Durante o Inverno, esses centros deslocam-se para Sul.

O Instituto Geofísico da Universidade de Coimbra (IGUC), que até 1925 se designava por Observatório Meteorológico e Magnético, situa-se numa das elevações que se alinham a oriente da cidade. Tem a sua sede e estabelecimento principal na Av. Dr. Dias da Silva desde 1 de Setembro de 1864. Teve como primeiro Director o Doutor Jacinto de Sousa que então equipou o Observatório com instrumentos de observação e medida semelhante aos de outros institutos da Europa. Em 1864 obtiveram-se as primeiras

Observações Climatológicas diárias de Coimbra, contudo é a partir de 1866 que elas se tornam regulares e iniciam-se as primeiras determinações de Magnetismo Terrestre. Em 1907 registaram-se os primeiros sismogramas. Todas estas séries de dados estão quase ininterruptas até hoje.

Em 2002 iniciaram-se as medidas de qualidade do ar na estação que o Instituto do Ambiente instalou no Observatório.

No mesmo ano, começou a investigação em Ciência Planetária em colaboração com a Agência Espacial Europeia (URL4).

## **3.1.2 Variabilidade da temperatura e precipitação**

### **3.1.2.1 Temperatura**

A temperatura do ar é um dos elementos mais característicos do clima e o primeiro que se utiliza para descrever o clima de um local ou região, sendo importante em todos os estudos climatológicos, na medida em que apresenta uma variação cíclica diária e anual.

As sensações de calor e de frio estão associadas ao valor que se lê no termómetro, ou seja, à maior ou menor temperatura do ar. A temperatura é uma medida da quantidade de energia que um corpo possui sob a forma de calor. Por outras palavras, ao fornecer calor a um corpo a sua temperatura aumenta. Quando se põem em contacto dois corpos a diferentes temperaturas, o mais quente cede calor ao mais frio, até que a temperatura de ambos se iguale. Mas o ar é mau condutor do calor e demora a atingir o equilíbrio térmico com os sólidos e os líquidos com os quais se encontra em contacto, daí que as temperaturas destes não possam servir como testemunho da temperatura do ar. Para medir a temperatura deste, utilizam-se os termómetros, que devem ser aquecidos pelo ar e não pelo solo.

A diferença entre os valores, máximo e mínimo da temperatura do ar das 0 às 24 horas é a amplitude da variação diurna. A amplitude depende da latitude do local, da época do ano e da nebulosidade durante o dia. Sendo maior no Verão do que no Inverno. A amplitude da variação anual da temperatura é a diferença das temperaturas medias do mês mais quente e do mês mais frio do ano.

Os oceanos têm uma grande capacidade calorífica, apresentando por isso uma pequena variação anual da temperatura, e ainda exercem uma influência no sentido de amenizar o clima nas zonas próximas. No interior essa variação anual é muito maior.

Portanto, a distribuição de temperaturas sobre a Terra está estreitamente ligada à quantidade de energia radiante que chega à superfície terrestre.

De acordo com os diversos estudos realizados pelo IPCC (IPCC, WGI, 2007), os desvios de temperatura do ar para o Globo, com relação à média do período 1961-1990, aumentaram cerca de  $0,6^{\circ}\text{C}$  desde o ano de 1850. Vê-se que, até aproximadamente 1920 em princípio, houve apenas variabilidade anual e aparentemente não ocorreu aumento expressivo de temperatura num período extenso, embora haja relatos de ondas de calor como, por exemplo, a de 1896 nos Estados Unidos, que deixou mais de 3 mil mortos somente em Nova Iorque. Porém, entre 1920 e 1946, o aumento global foi cerca de  $0,4^{\circ}\text{C}$ . No Ártico, por exemplo, em que há medições desde os anos 1880, o aumento foi cerca de 10 vezes maior nesse período,  $2,7^{\circ}\text{C}$  somente entre 1918 e 1938. Ainda de acordo com o IPCC, entre 1947 e 1976, houve um arrefecimento de cerca de  $0,2^{\circ}\text{C}$ , não explicado pelo IPCC e, a partir de 1977, a temperatura média global aumentou cerca de  $0,3^{\circ}\text{C}$ . Os relatórios do IPCC indicam que o primeiro período de aquecimento, entre 1920 e 1946, pode ter tido de causas naturais, possivelmente o aumento da produção de energia solar e a redução de albedo planetário.

Estudos realizados pelo Instituto de Meteorologia (Antunes *et al.*, 1996; Antunes *et al.*, 2000) de análise das séries longas dos valores das temperaturas do ar indicam que a temperatura tem vindo a aumentar. O aumento ocorre na temperatura média, máxima e mínima.

Verifica-se que as séries apresentam tendências que podem ser modeladas simplesmente por uma tendência linear, verifica-se também que a média anual da temperatura máxima aumenta mais que a média anual da temperatura mínima. O que implica um aumento da média da amplitude térmica diária. Na Figura 3.1 apresenta-se as séries das médias anuais da temperatura máxima, mínima e média do ar em Coimbra de 1965 a 2005, onde se pode observar esse comportamento.

No entanto, quando a análise se limita aos anos mais recentes, verifica-se que a média anual da temperatura mínima tem uma tendência um pouco superior à da média anual da temperatura máxima, o que equivale a uma diminuição da média da amplitude térmica diária. Este comportamento é geralmente associado ao aumento do efeito de estufa, essencialmente nos anos mais recentes, embora em Coimbra esse efeito não seja muito evidente.

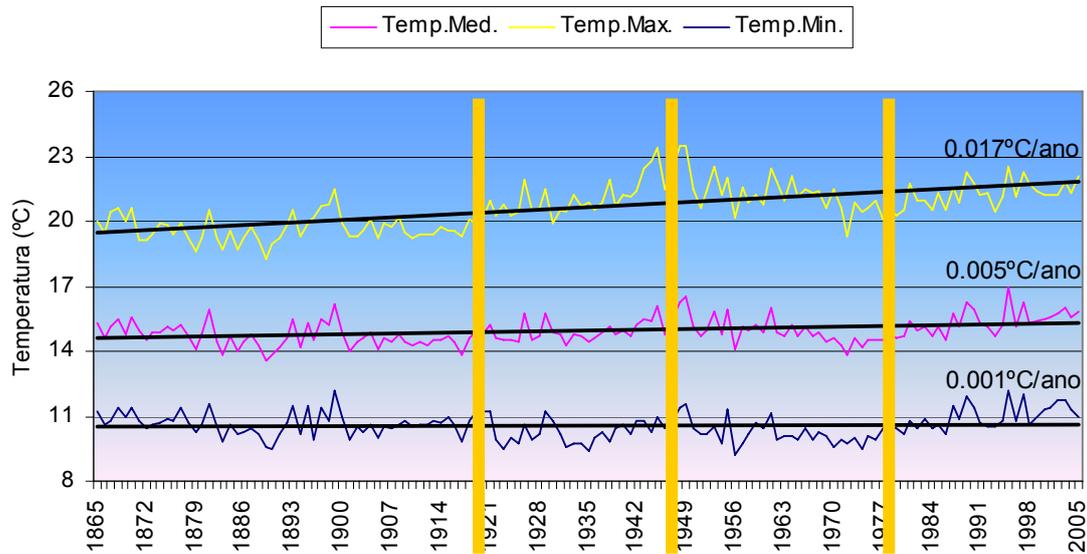


Figura 3.1- Séries das médias anuais da temperatura mínima (azul), temperatura máxima (amarela) e temperatura média (rosa) do ar em Coimbra, as correspondentes rectas de tendência e os respectivos declives em °C/ano.

No Quadro 3.1 apresentam-se as médias, desvios padrão e tendências sazonais e anuais da temperatura máxima e mínima para os períodos de 1865-2005, 1865-1975 e 1976-2005. Pela análise do gráfico (Figura 3.1), a tendência da temperatura máxima é a mais acentuada. Nas três séries, detectam-se comportamentos semelhantes aos mencionados pelo IPCC, um aquecimento de 1920 até 1946, um arrefecimento de 1947 até 1976 seguido de novo aquecimento. A análise das tendências das séries revela, por aplicação do teste de Mann- Kendall, que são altamente significativas ao nível de  $p < 0.01$ , todas as séries estudadas nos períodos de 1865-2005 e no período 1865-1975. No período de 1976-2005, são muito significativas a  $p < 0.01$  as tendências das séries de temperatura anual e sazonal de primavera, as restantes não são significativas.

Quadro 3.1- Médias, desvios padrão e tendências (avaliadas ajustando uma recta por mínimos quadrados das séries de temperatura máxima sazonais e anuais consideradas.

		Temperatura Máxima			Teste de Kendall-Tau	
		Média (°C)	D.Padrão (°C)	Tendência (°C/ano)	$\Gamma$	$\rho$
Período 1865-2005	Anual	20.6	1.1	0.017	0.491	0.000
	Primavera	19.5	1.5	0.016	0.297	0.000
	Verão	27.4	1.4	0.013	0.27	0.000
	Outono	21.5	1.5	0.019	0.395	0.000
	Inverno	14.1	1.1	0.018	0.506	0.000
Período 1865-1975	Anual	20.4	1.1	0.022	-0.264	0.000
	Primavera	19.3	1.6	0.021	0.292	0.000
	Verão	27.2	1.4	0.018	0.285	0.000
	Outono	21.4	1.5	0.03	0.456	0.000
	Inverno	13.8	1.1	0.02	0.457	0.000
Período 1976-2005	Anual	21.2	0.6	0.037	0.398	0.002
	Primavera	20	1.3	0.08	0.391	0.002
	Verão	27.8	1.3	0.055	0.219	0.089
	Outono	22.1	1.1	-0.015	-0.099	0.442
	Inverno	15	0.7	0.026	0.18	0.162

Quadro 3.2- Médias, desvios padrão e tendências (avaliadas ajustando uma recta por mínimos quadrados das séries de temperatura mínima sazonais e anuais consideradas.

		Temperatura Mínima			Teste de Kendall-Tau	
		Média (°C)	D.Padrão (°C)	Tendência (°C/ano)	$\Gamma$	$\rho$
Período 1865-2005	Anual	10.6	0.6	0.001	0.006	0.913
	Primavera	9.4	0.8	0.016	-0.052	0.360
	Verão	14.8	0.8	0.013	0.002	0.971
	Outono	11.7	0.9	0.019	0.016	0.772
	Inverno	6.3	1.1	0.018	0.052	0.362
Período 1865-1975	Anual	10.5	0.6	-0.007	0.498	0.000
	Primavera	9.4	0.8	-0.007	0.292	0.000
	Verão	14.7	0.7	-0.008	0.285	0.000
	Outono	11.6	0.9	-0.005	0.456	0.000
	Inverno	6.1	0.9	-0.007	0.457	0.000
Período 1976-2005	Anual	10.9	0.6	0.041	0.484	0.000
	Primavera	9.5	0.8	0.064	0.508	0.000
	Verão	15.2	0.9	0.059	0.386	0.003
	Outono	12	0.9	0.033	0.201	0.119
	Inverno	6.9	0.9	0.016	0.095	0.462

Da análise do Quadro 3.2, ressalta a tendência linear negativa da temperatura mínima tanto anual como sazonal durante o período 1865-1975. Nos outros períodos as tendências lineares das séries apresentam um aumento das temperaturas máximas e mínimas, com exceção da tendência da temperatura máxima na estação do Outono correspondente ao período 1976-2005 de decréscimo de 0.015 °C/ano.

Apenas na estação de Inverno do período 1976-2005 e de 1865-2005 em que o desvio padrão da temperatura mínima é superior e igual respectivamente, em todos os restantes casos é inferior ao da temperatura máxima.

Pelo teste de Mann-Kendall, todas as tendências das séries estudadas no período 1865-1875 são altamente significativas a  $p < 0.001$ , como também as série anual e sazonal de primavera do período 1876-2005, no período 1865-2005 as tendências não são significativas.

### 3.1.2.2 Precipitação

A precipitação é o elemento climático mais importante depois da temperatura do ar, pois a vida à superfície da Terra depende da existência de água. A precipitação é classificada como um hidrometeoro, o que, é definido como um conjunto de partículas de constituição hídrica, no estado líquido ou sólido, em suspensão ou em queda livre na atmosfera. As principais formas de precipitação são a chuva, a neve, o orvalho e o granizo.

O processo físico que explica a formação da precipitação inicia-se com o aquecimento do ar próximo à superfície do solo. O aquecimento provoca a ascensão adiabática da massa de ar, que, à medida que se eleva na atmosfera, se expande e arrefece até alcançar o nível de condensação, quando atinge a saturação. A partir deste momento, a presença, dos núcleos de condensação proporciona a formação e o crescimento de gotículas de água, que precipitam após atingirem massa suficiente para vencer a resistência do ar. No processo de crescimento são formadas gotas de diferentes tamanhos, sendo que as gotas maiores adquirem maior velocidade de queda do que as menores, o que influencia directamente na intensidade das precipitações.

A classificação das precipitações está relacionada com as condições que provocam a elevação da massa de ar húmida à altitude onde ocorre a sua condensação. Em função destas condições, as precipitações podem ser do tipo orográfica, convectiva ou frontal.

As precipitações orográficas ocorrem devido às condições da topografia local, sendo que as massas de ar húmidas sofrem uma ascensão forçada sobre as grandes elevações, como o que ocorre nas regiões montanhosas. Proporcionam chuvas com intensidades variando geralmente de baixa a moderada.

As precipitações convectivas, típicas das regiões tropicais, de ocorrência comum no verão, são formadas em virtude do aquecimento desigual da superfície terrestre e pela ascensão brusca do ar menos denso. Normalmente

originam chuvas intensas de curta duração que se concentram em pequenas áreas.

O processo de formação das precipitações frontais é proporcionado pelo deslocamento vertical de uma massa de ar de densidade diferente de outra que se encontra em deslocamento horizontal. Geralmente, ocasionam chuvas de baixa intensidade e longa duração abrangendo grandes áreas, no entanto, em condições particulares, podem também originar eventos de grande intensidade e curta duração.

Nos grandes centros urbanos, a impermeabilização da superfície do solo decorrente da pavimentação das vias e da construção de edifícios, associada à remoção da cobertura vegetal, causa a redução da infiltração da água da chuva e, conseqüentemente o aumento do escoamento superficial. Assim, a ocorrência de precipitações de longa duração ou de grande intensidade tem causado grandes transtornos, tais como enchentes e deslizamentos de encostas que causam o desalojamento de famílias e até mesmo mortes.

Em termos de previsão, é possível a identificação de eventos de grande intensidade através da formação de nuvens com o uso de imagens de satélite. No entanto, a formação destes eventos ocorre rapidamente em pequenas áreas, o que impede que se possam tomar medidas preventivas e evitar os prejuízos. Por isso cada vez mais a procura de previsões com maior antecedência se torna importante.

A Figura 3.2 mostra a evolução da série de precipitação anual desde 1865 a 2005.

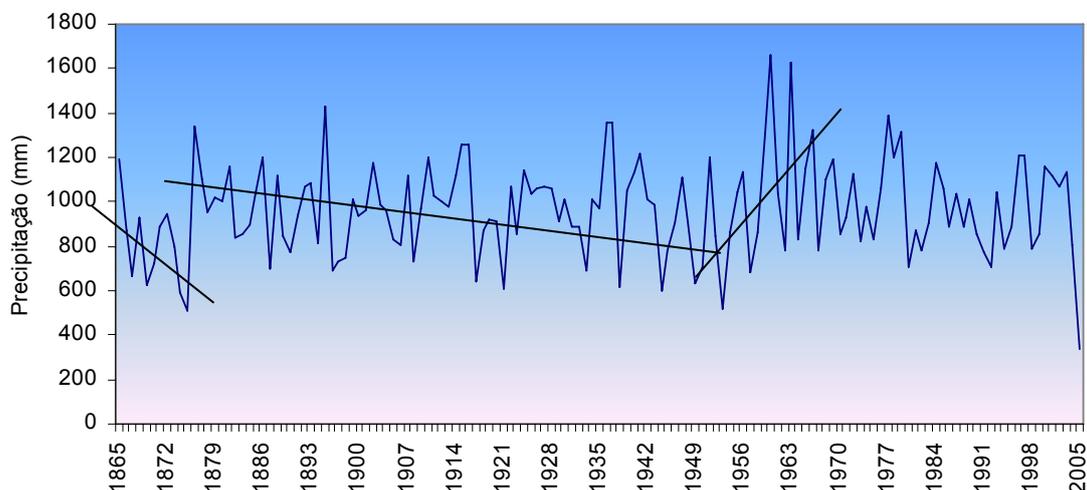


Figura 3.2- Série de precipitação total mensal desde 1865 a 2005.

Analisando a Figura 3.2, observa-se a existência de períodos distintos da tendência da precipitação. Destacam-se dois períodos de decréscimos da quantidade de precipitação seguidos de um período de acréscimo (1954 - 1966).

A partir da série temporal foram obtidos o valor máximo da quantidade de precipitação de 1667,1 mm, ocorrido em 1960, enquanto o mínimo foi 332,9

mm em 2005. Em relação ao valor médio da série estudada, foi de 969,3 mm e desvio padrão 217,4.

A máxima precipitação acumulada mensal ocorreu em 464,2 mm em Novembro de 1963. Nos meses de Novembro e Dezembro de 2004, a precipitação mínima foi de 0 mm assim como nos meses de Janeiro, Fevereiro e Março de 2005. Também nos meses de Verão registaram-se valores de 0 mm em vários anos. O total acumulado médio sazonal de Dezembro a Fevereiro foi 118,4 mm. O máximo acumulado nos meses de Dezembro a Fevereiro foi de 273,5 mm no ano 1934/35 enquanto que o mínimo registado foi de 0 mm em 2004/05.

No período 1941-2005, a precipitação total teve média anual de 958,8 mm, desvio padrão 246,9.

O total acumulado médio sazonal de Dezembro a Fevereiro foi 124,0 mm, o máximo acumulado 270,6 no Inverno 1977/78 e o mínimo obviamente em 2004/05.

No quadro 3.3 apresenta-se os resultados de alguns parâmetros estatísticos: médias, desvios padrão e tendências anuais e sazonais da quantidade de precipitação para os períodos de 1865-2005, 1865-1975 e 1976-2005.

Quadro 3.3 - Médias, desvios padrão e tendências (avaliadas ajustando uma recta por mínimos quadrados das séries sazonais e anuais consideradas.

Quantidade de Precipitação					
Período 1865-2005					
	Média (mm)	D.Padrão (mm)	Tendência (mm/ano)	Teste de Kendall-Tau	
				$\Gamma$	$p$
Anual	964	217	0.46	0.063	0.268
Primavera	90	33	-0.1	-0.083	0.144
Verão	24	14	-0.04	-0.097	0.088
Outono	91	37	0.02	-0.008	0.891
Inverno	116	56	0.27	0.119	0.036
Período 1865-1975					
Anual	963	217	1.01	0.083	0.195
Primavera	93	34	0.02	0.003	0.965
Verão	24	13	-0.03	-0.062	0.335
Outono	89	36	-0.12	-0.102	0.112
Inverno	115	52	0.48	0.211	0.001
Período 1976-2005					
Anual	730	122	-6.82	-0.126	0.326
Primavera	78	29	-0.59	-0.108	0.402
Verão	22	16	-0.43	-0.182	0.159
Outono	99	40	0.74	0.103	0.422
Inverno	122	72	-1.65	-0.186	0.148

A análise ao Quadro 3.3 indica que a tendência da quantidade de precipitação anual decresce no período 1976-2005, enquanto que nos outros dois períodos estudados aumenta. Para além disso conclui-se ainda que, no mesmo período, apenas na estação de Outono se verifica uma tendência positiva de 0.74 mm/ano. A aplicação do teste de Mann-kendall revela que as tendências não são significativas, com excepção da série de Inverno do período 1865-1975 a significativa a  $p < 0.001$ .

A quantidade de precipitação apresenta uma tendência no sentido de diminuição nas séries de Verão em todos os períodos considerados. A série de Inverno apresenta uma diminuição no período 1976-2005 e crescente nos outros dois períodos considerados.

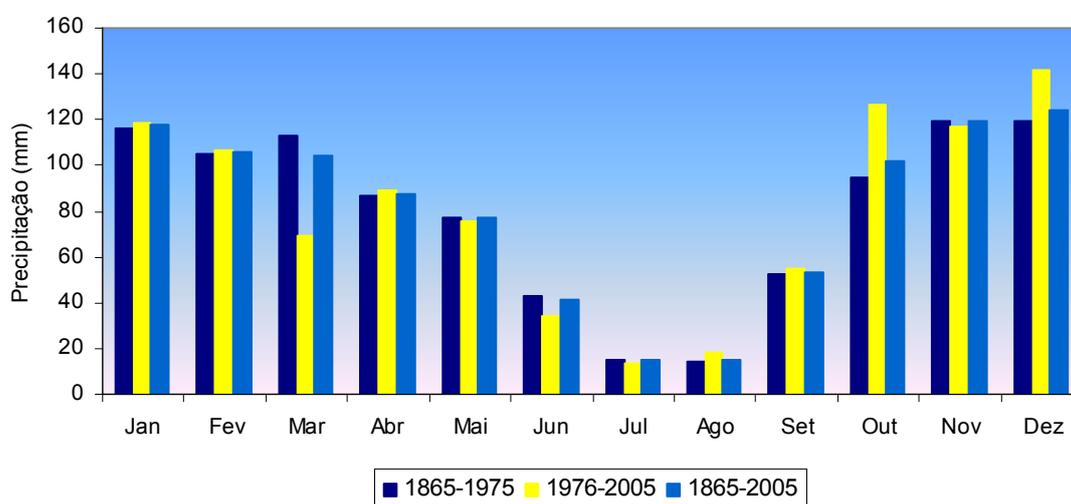


Figura 3.3- Distribuição mensal da quantidade de precipitação para os períodos 1865-1976, 1976-2005 e 1865-2005.

Da análise do gráfico da Figura 3.3 verifica-se uma diminuição significativa da quantidade de precipitação no mês de Março entre o período de 1976-2005. Pelo contrário, em Outubro e Dezembro verifica-se um aumento da quantidade de precipitação.

Nos restantes meses os valores da quantidade de precipitação seguem a mesma tendência registada nos três períodos considerados.

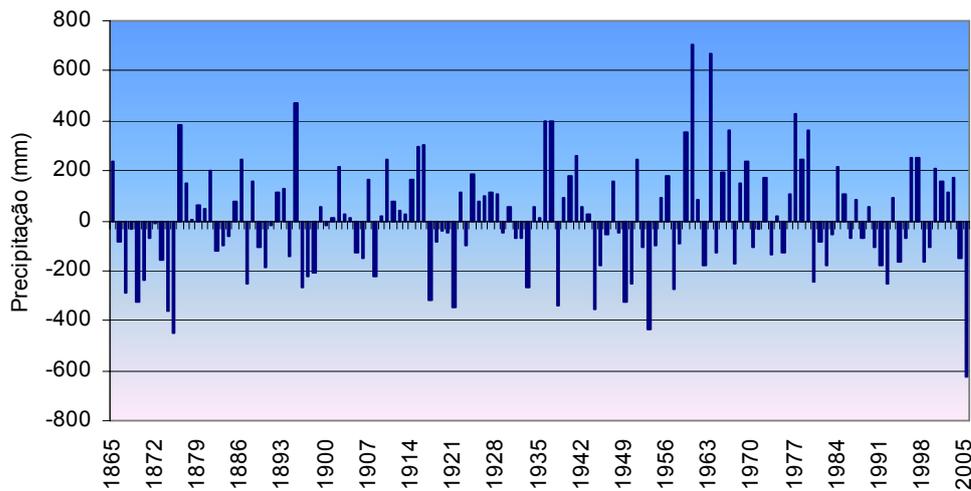


Figura 3.4- Desvio da quantidade de precipitação em relação às normais 1971-2000.

Analisando a Figura 3.4, ressaltam dois valores máximos acima da média para 1960 e 1963 com 703.4 mm e 669.8 mm respectivamente, e um valor inferior à média para o ano de 2005 de 623.4 mm.

É de salientar ainda que o regime de precipitação é muito irregular e aleatório, num determinado ano pode caracterizar-se como muito chuvoso e no seguinte seco. No entanto, verifica-se um aumento de 0.46 mm/ano em relação a 1971-2000 (Quadro 4.2).

### 3.2 Projecção de geração de cenários regionais

Como referido anteriormente os geradores climáticos são modelos de simulação matemática que descrevem a ocorrência de elementos climáticos com as mesmas características estatísticas da série histórica. De uma forma geral, as principais variáveis estudadas são temperatura, precipitação radiação solar e vento.

Vários modelos de geradores climáticos já foram desenvolvidos dentre os quais podem ser citados CLIGEN- *Climate Generator* (Nicks *et al.*, 1995), WGEN - *Weather Generator* (Richardson, 1985), USCLIMATE (Hanson *et al.*, 1994) entre outros.

Semennov e Barrow (1997) desenvolveram o LARS-WG, um gerador estocástico com o objectivo de avaliar os efeitos das mudanças climáticas e o risco agrícola. Os autores reproduziram alterações no cenário climático para algumas cidades da Europa e, concluíram que alterações na variabilidade dos elementos climáticos podem afectar mais aprofundamento o rendimento das

culturas e a probabilidade de eventos climáticos extremos do que simples alterações nos valores médios (Virgens Filho, Leite e Cataneo, 2006).

A utilização de geradores climáticos apresenta um grande potencial de uso, tendo em vista as localidades que não possuem séries de dados climáticos observados de grande extensão e confiáveis. Nestes casos, os geradores de dados climáticos podem ser usados para gerar sequências climáticas para as mais diversas variáveis climáticas e para longos períodos de anos.

O gerador simula dados de temperatura de ar a partir de modelos estocásticos, onde é levado em consideração a ocorrência de dias secos e húmidos. Na geração de valores diários o LARS-WG utiliza um modelo que simula desvios normalmente distribuídos em torno da média, sendo que os mesmos são gerados distintivamente para dias húmidos e secos, por um modelo probabilístico exponencial misto.

Este modelo estocástico pode gerar séries meteorológicas (que quando têm duração maior que 30 anos podem ser considerados séries climáticas), através de distribuições de probabilidade e correlações entre elementos meteorológicos que mantêm as estatísticas da série original, cujas estatísticas das séries climáticas geradas devem ser comparadas com as estatísticas da série de dados meteorológicos observados (Semenov *et al.*, 1998; Weiss *et al.*, 2003).

A metodologia adoptada para a concepção do trabalho compreendeu tratamento estatístico e a análise da informação obtida. A partir das séries diárias, construímos as séries mensais e anuais. Após esta operação, efectuou-se um estudo da sua distribuição e elaboraram-se diagramas que vão exprimir a variação quer anual, quer sazonal ou mensal da temperatura em função do tempo representado em abcissa e as anomalias em relação ao período 1971-2000, calculadas, em ordenadas, foram ainda calculadas as matrizes de correlação entre os valores observados e os simulados.

O modelo requer, como dados de entrada, além das informações gerais (nome da estação, latitude, longitude e altitude), a série de dados diários observados da temperatura máxima e mínima, precipitação e radiação solar.

Após ter fornecido os dados de entrada o utilizador deve seleccionar o número de anos a serem gerados, ao final dos cálculos, o programa permite que a série sintética gerada seja guardada em arquivo texto.

A comparação entre a série climática gerada pelo LARS-WG e a série de dados meteorológicos observados de 1941 a 2005 mostrou que não há diferença entre as estatísticas, tendo indicado que as séries de mudança climática geradas pelo LARS-WG podem ser usadas neste estudo.

### **3.2.1 Análise das simulações a partir da série 1941-2005**

De acordo com o 4º relatório do IPCC (WGI, 2007), entre 1995-2006, registaram-se os doze anos mais quentes da temperatura à superfície desde

1850. A tendência em 100 anos de 1901 a 2000 foi de  $0,6^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$  e de 1906 a 2005 foi de  $0,74^{\circ}\text{C} \pm 0,18^{\circ}\text{C}$ , portanto maior.

O maior aquecimento ocorreu durante o Inverno e Primavera do hemisfério Norte.

Os anos 2005 e 1998 foram os mais quentes a nível mundial desde 1850, em 1998 as temperaturas intensificaram-se por influência do fenómeno El Niño de 1997-1998, mas em 2005 as temperaturas altas não estão associadas a esta anomalia. Aliás desde 1995 a 2006, exceptuando 1996, registaram-se os 12 anos mais quentes desde 1850 (IPCC).

Na Figura 3.5 e Figura 3.6 apresentam-se as anomalias da temperatura máxima e mínima em relação às normais 1971-2000.

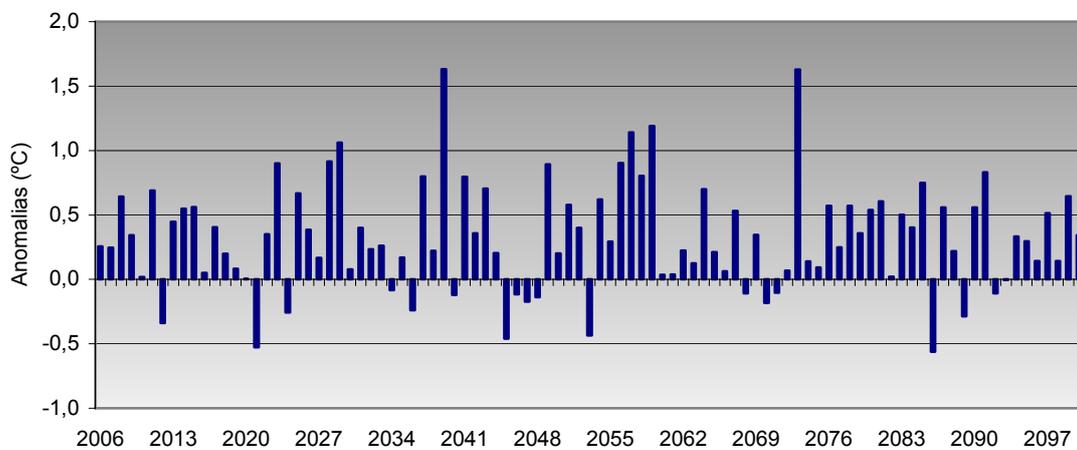


Figura 3.5 - Anomalias para a temperatura máxima em relação às normais 1971-2000.

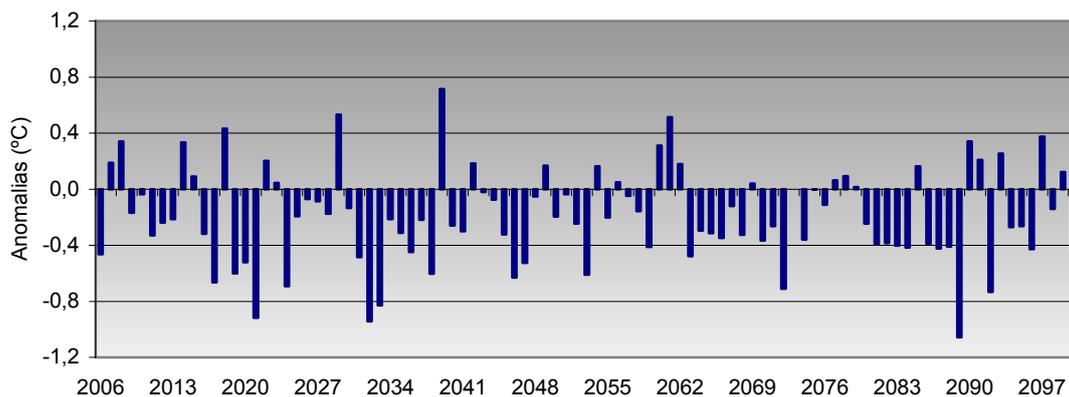


Figura 3.6 - Anomalias para a temperatura mínima em relação às normais 1971-2000.

Da observação da Figura 3.5, correspondente aos resultados obtidos para a temperatura máxima, é evidente da simples análise visual do gráfico, uma maior ocorrência de desvios positivos em relação às normais (1971-2000). O

que se traduz em um aumento médio de temperatura máxima no período simulado (2006-2100) de 0.3 °C.

Salienta-se ainda que, os maiores desvios ocorrem nos anos de 2039 e 2073 em relação à normal (1971-2000) de 1.6 °C.

Pela análise da Figura 3.6, ao contrário do que se passa na temperatura máxima, constata-se uma maior ocorrência de desvios negativos em relação às normais consideradas, o que corresponde a uma diminuição de -0.2°C para a temperatura mínima no período simulado.

É ainda de salientar que o maior desvio negativo verifica-se no ano de 2089 de -1.1°C.

Os resultados das simulações destes cenários revelam um aumento das temperaturas máximas e uma diminuição das mínimas relativamente às normais 1971-2000.

Os valores estatísticos determinados para a temperatura máxima e mínima encontram-se representados no Quadros 3.3 e Quadro 3.4 respectivamente.

Quadro 3.4- Valores máximos, mínimos médias mensais de temperatura máxima e desvios padrão nos períodos considerados.

Temperatura Máxima												
Período 2005-2100												
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temp.Média Mensal	14.2	15.9	17.9	19.9	22.2	25.5	28.3	29.0	26.9	22.9	18.1	15.0
Temp.Média valores mínimos	11.6	13.1	15.3	15.1	17.9	20.9	24.7	26.1	23.4	20.3	15.3	12.1
Temp.Média valores máximos	16.6	20.4	21.5	23.3	27.0	29.6	31.9	33.2	31.5	25.9	20.9	18.1
Desvio Padrão	1.1	1.4	1.5	1.7	1.7	1.8	1.5	1.5	1.7	1.3	1.3	1.1
Período 1971-2000												
Temp.Média Mensal	14.1	15.7	18.3	19.2	21.6	25.5	28.4	28.7	26.7	22.0	17.4	14.7
Temp.Média valores mínimos	11.8	13.4	14.8	15.3	18.2	19.9	25.2	25.9	22.7	18.6	15.6	12.8
Temp.Média valores máximos	15.5	19.4	25.4	24.1	25.9	29.8	32.4	32.1	30.4	25.6	22.0	16.1
Desvio Padrão	0.9	1.6	2.3	2.2	2.0	2.3	1.7	1.4	1.9	2.0	1.4	0.9

Quadro nº 3.5- Valores máximos, mínimos e médias mensais de temperatura mínima e desvios padrão nos períodos considerados.

Temperatura Mínima												
Período 2005-2100												
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temp.Média Mensal	5.9	7.0	7.7	8.9	11.0	13.8	15.5	15.4	14.4	12.0	9.0	7.4
Temp.Média valores mínimos	3.3	4.8	5.4	5.7	8.6	11.2	13.5	13.6	11.5	7.7	7.0	4.2
Temp.Média valores máximos	8.6	9.9	10.8	12.3	13.3	15.7	17.7	17.6	16.8	14.7	12.8	11.0
Desvio Padrão	1.3	1.4	1.3	1.3	1.2	1.0	1.0	1.1	1.2	1.5	1.6	1.7
Período 1971-2000												
Temp.Média Mensal	5.8	6.4	7.7	9.0	11.1	13.6	15.1	15.3	14.2	12.2	9.4	6.6
Temp.Média valores mínimos	2.6	2.0	5.3	6.1	8.9	11.1	12.9	12.5	11.4	9.4	6.2	3.4
Temp.Média valores máximos	8.5	9.6	9.8	11.4	14.0	15.9	16.9	17.2	17.0	14.7	12.8	8.8
Desvio Padrão	1.4	1.4	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.9	1.0	1.1	1.3	1.4

Pela análise do Quadro 3.4, constata-se que os valores da temperatura média mensal, com exceção dos meses de Março, Junho e Julho apresentam um ligeiro aumento em relação às normais. Os mínimos e máximos mensais oscilam, com valores superiores em alguns meses e inferiores noutros. Contudo, os valores máximos da série simulada são superiores às normais na maioria dos meses do ano.

No que diz respeito à série simulada da temperatura mínima, apenas em um ano o desvio em relação à média é superior a um desvio padrão. Para o caso da temperatura máxima, verifica-se em três anos.

A análise do Quadro 3.5 indica algumas diferenças de valores mensais entre a série simulada e a de referência (1971-2000), salienta-se o ligeiro aumento da temperatura média, valores mínimos e máximos nos três meses de Verão e de Inverno. Nos restantes meses os valores variam em superiores e inferiores relativamente a 1971-2000.

Os padrões da precipitação na superfície terrestre variam muito, podem observar-se secas prolongadas durante anos e serem interrompidas por anos de intensas chuvas, por exemplo quando há a influência do El Nino.

Em geral, a precipitação tem diminuído em várias regiões da Terra, mesmo que a evaporação tenha aumentado devido ao aumento da temperatura. Contudo a

partir de 1950, em muitas regiões, observaram-se aumentos de fenómenos de precipitação forte que provocaram inundações (IPCC, 2007).

Na Figura 3.7 apresenta-se as anomalias da precipitação em relação às normais 1971-2000.

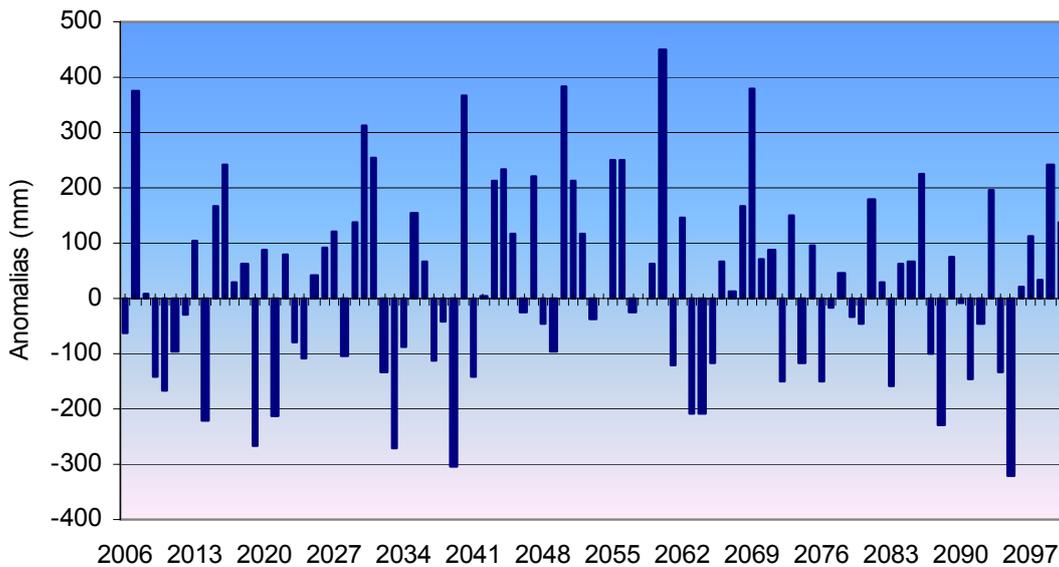


Figura 3.7 - Anomalias para a precipitação em relação às normais 1971-2000.

Da análise da Figura 3.7, referente à variável precipitação, constata-se que, sobressaem os desvios positivos, destacando-se um valor máximo, atingindo 448.7 mm, no ano de 2060, logo seguido de 381.3 mm e 380.3 mm em 2050 e 2069 respectivamente.

Salienta-se ainda que, as amplitudes de variação dos valores anuais da série de precipitação são muito elevadas de tal forma que os desvios diferem significativamente da média referente a 1971-2000.

Pela análise dos valores obtidos para a precipitação, elaborou-se o quadro 3.6.

Quadro nº 3.6 - Valores médios, extremos e desvio padrão de precipitação nos períodos 2005-2100 e 1971-2000.

Precipitação												
2005-2100												
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Prec.Média Mensal	132.0	115.4	107.7	77.5	82.1	51.0	15.6	15.9	48.6	91.2	121.9	126.6
Prec.Média Valores mínimos	14.3	8.0	0.1	3.8	2.1	2.6	0.0	0.0	0.1	4.2	14.6	8.8
Prec.Média Valores máximos	306.3	257.5	312.8	216.8	188.0	180.3	85.2	105.8	162.4	289.6	269.7	249.2
Desvio Padrão	67.7	62.2	55.8	40.6	41.4	33.0	14.8	16.9	33.0	49.1	60.7	58.0
Período 1971-2000												
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Prec.Média Mensal	119.6	114.2	71.9	88.6	80.6	42.6	14.4	16.5	50.8	104.0	113.3	139.8
Prec.Média Valores mínimos	5.7	14.0	0.0	32.4	0.0	3.9	0.8	0.0	2.0	13.7	1.6	5.9
Prec.Média Valores máximos	284.4	309.8	181.9	202.1	176.8	155.4	68.8	59.7	145.3	284.8	367.8	349.5
Desvio Padrão	72.1	86.2	49.5	50.3	45.5	43.0	17.3	17.7	39.4	69.3	79.1	94.8

Da observação do Quadro 3.6, verificamos que o valor mais elevado relativamente às médias dos valores máximos é referente ao mês de Março com 312,8 mm, enquanto que a média do período 1971-2000 é de apenas 181,9 mm.

Durante o período 1971-2000, a média da precipitação no mês de Março foi de 71,9 mm em 1984.

Nos meses de Maio a Setembro os valores da precipitação são aproximadamente iguais. Relativamente à média dos valores máximos, as maiores diferenças observam-se nos meses de Março, Novembro e Dezembro.

Quanto às médias dos valores mínimos as maiores diferenças encontram-se nos meses de Outubro e Novembro, com valores menores e maiores respectivamente. No mês de Agosto em ambas as séries regista-se o valor de 0.0 mm.

É ainda de notar, o valor de 32.4 mm registado no mês de Abril no período 1971-2000.

Na Figura 3.8 apresenta-se a comparação da quantidade de precipitação mensal estimada pelo modelo e as normais (1971-2000).

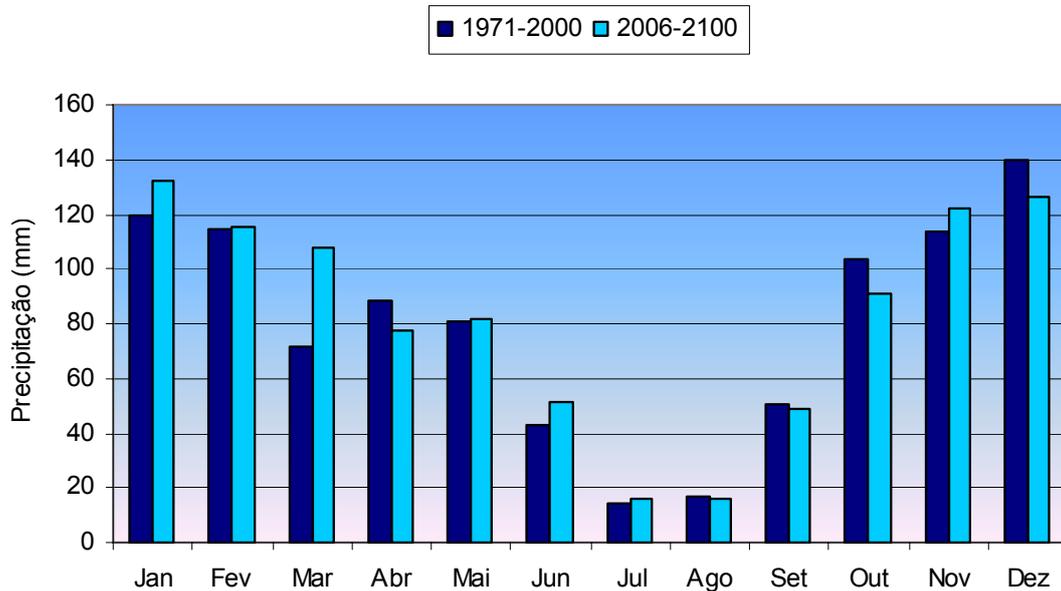


Figura nº 3.8- Anomalias para a quantidade de precipitação mensal em relação às normais 1971-2000.

Observando o gráfico da Figura 3.8 constatamos um aumento significativo da quantidade de precipitação para o período simulado no mês de Março em relação às normais. Seguido do mês de Janeiro, Junho e Novembro.

### 3.2.2 Análise das Simulações a partir da série 1976-2005

Pela análise das séries de temperatura estudadas verifica-se que o maior aumento da temperatura é a partir de 1976. Deste modo efectuou-se uma análise aos últimos 30 anos, de 1976 a 2005, seguindo-se a mesma metodologia delineada anteriormente.

Os resultados obtidos para a temperatura máxima e mínima apresentam-se nas Figuras 3.9 e 3.10 respectivamente, assim como nos Quadros 3.6 e 3.7.

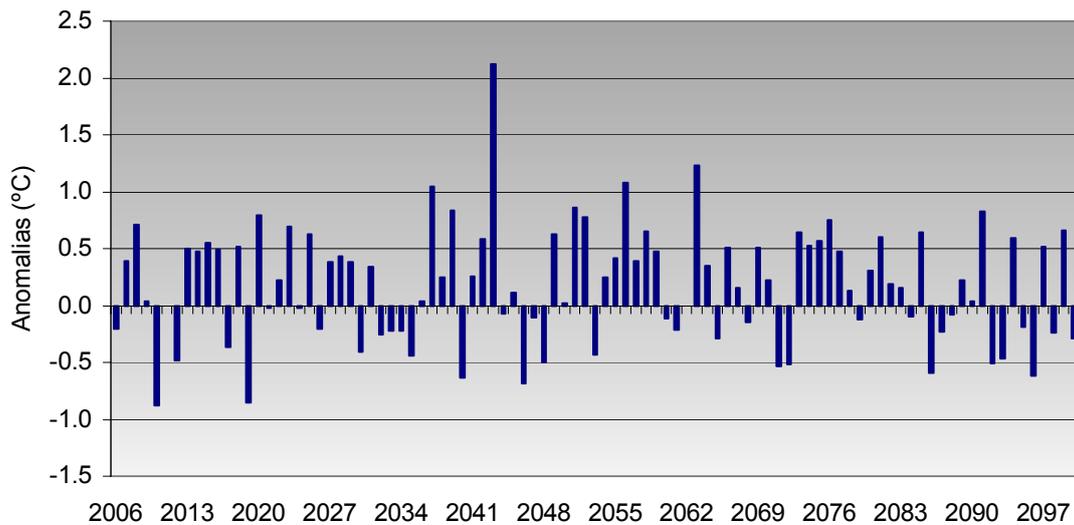


Figura 3.9 - Anomalias para a temperatura máxima em relação às normais 1971-2000.

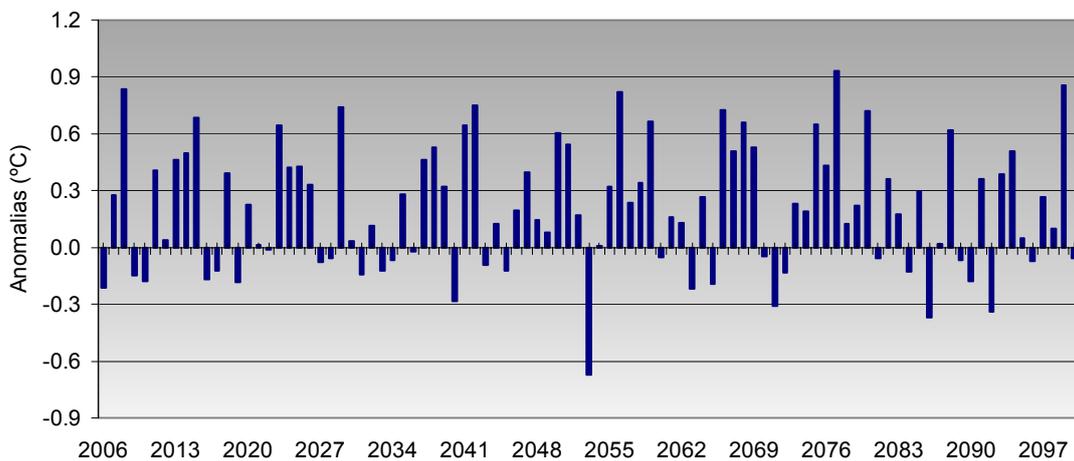


Figura 3.10 - Anomalias para a temperatura mínima em relação às normais 1971-2000.

Considerando a Figura 3.9, verifica-se um comportamento da temperatura máxima semelhante à simulada a partir da série 1941-2005, ainda que não tão claro e nítido quanto o anterior, uma vez que subsiste uma maior frequência de desvios negativos em relação à série anterior. Salienta-se ainda que, o maior desvio ocorre no ano 2043 com 2.2 °C superior às normais.

Em geral, apesar de existirem algumas diferenças entre as duas séries simuladas, estas revelam sensivelmente o mesmo padrão de desvios acima da média. Neste caso a temperatura máxima apresenta um aumento de 0.2 °C relativamente às normais, sendo 0.1 °C de aumento inferior à série estudada anteriormente.

Quanto à temperatura mínima, verifica-se um comportamento nitidamente oposto à série estimada a partir de 1941-2000, neste caso, constata-se através

da Figura 3.10 maior ocorrência de desvios positivos em relação às normais. Sobressai ainda, um desvio negativo correspondente ao ano de 2053 de -0.7 °C.

Neste segundo caso, é notório o efeito do aumento da temperatura mínima da série observada (1976-2005) na simulada e confirma o bom comportamento do modelo ao seguir a tendência da série histórica.

Quadro 3.7- Temperaturas máximas e mínimas médias mensais e desvios padrão nos períodos 2005-2100 e 1971-2000.

Temperatura Máxima												
Período 2005-2100												
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temp.Média Mensal	14.6	16.0	18.1	19.4	21.8	25.7	28.1	29.0	26.8	22.0	17.6	14.9
Temp.Média valores mínimos	12.0	11.7	15.1	15.4	18.5	21.4	24.5	25.3	23.0	19.3	13.4	12.6
Temp.Média valores máximos	17.1	19.6	21.2	23.6	29.8	30.5	32.2	33.0	30.7	25.3	20.4	17.3
Desvio Padrão	0.9	1.6	1.4	1.5	1.9	1.8	1.6	1.5	1.5	1.4	1.2	1.0
Período 1971-2000												
Temp.Média Mensal	14.1	15.7	18.3	19.2	21.6	25.5	28.4	28.7	26.7	22.0	17.4	14.7
Temp.Média valores mínimos	11.8	13.4	14.8	15.3	18.2	19.9	25.2	25.9	22.7	18.6	15.6	12.8
Temp.Média valores máximos	15.5	19.4	25.4	24.1	25.9	29.8	32.4	32.1	30.4	25.6	22.0	16.1
Desvio Padrão	0.9	1.6	2.3	2.2	2.0	2.3	1.7	1.4	1.9	2.0	1.4	0.9

Quadro 3.8- Temperaturas máximas e mínimas médias mensais e desvios padrão nos períodos 2005-2100 e 1971-2000.

Temperatura Mínima												
Período 2005-2100												
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temp.Média Mensal	6,4	6,8	8,0	9,2	11,1	13,9	15,5	15,9	14,7	12,4	9,5	7,5
Temp.Média valores mínimos	3,3	3,6	5,4	7,2	8,7	11,8	12,9	13,7	12,2	10,0	6,7	4,8
Temp.Média valores máximos	9,3	9,6	10,6	12,1	14,0	16,4	17,7	17,7	17,1	16,1	12,3	11,0
Desvio Padrão	1,2	1,3	1,0	0,9	1,1	1,0	0,9	0,8	0,9	1,1	1,1	1,3
Período 1971-2000												
Temp.Média Mensal	5.8	6.4	7.7	9.0	11.1	13.6	15.1	15.3	14.2	12.2	9.4	6.6
Temp.Média valores mínimos	2.6	2.0	5.3	6.1	8.9	11.1	12.9	12.5	11.4	9.4	6.2	3.4
Temp.Média valores máximos	8.5	9.6	9.8	11.4	14.0	15.9	16.9	17.2	17.0	14.7	12.8	8.8
Desvio Padrão	1.4	1.4	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.9	1.0	1.1	1.3	1.4

Considerando o Quadro 3.7, apenas nos meses de Março, Julho e Outubro não se verifica um aumento da temperatura média mensal. Em termos quantitativos, nesta série simulada o valor médio de aumento de temperatura máxima foi de 0.2°C, portanto 0.1°C inferior ao da série simulada a partir de 1941-2000.

Na Figuras 3.11 e Figura 3.12 apresenta-se as anomalias para a precipitação anuais e mensais respectivamente.

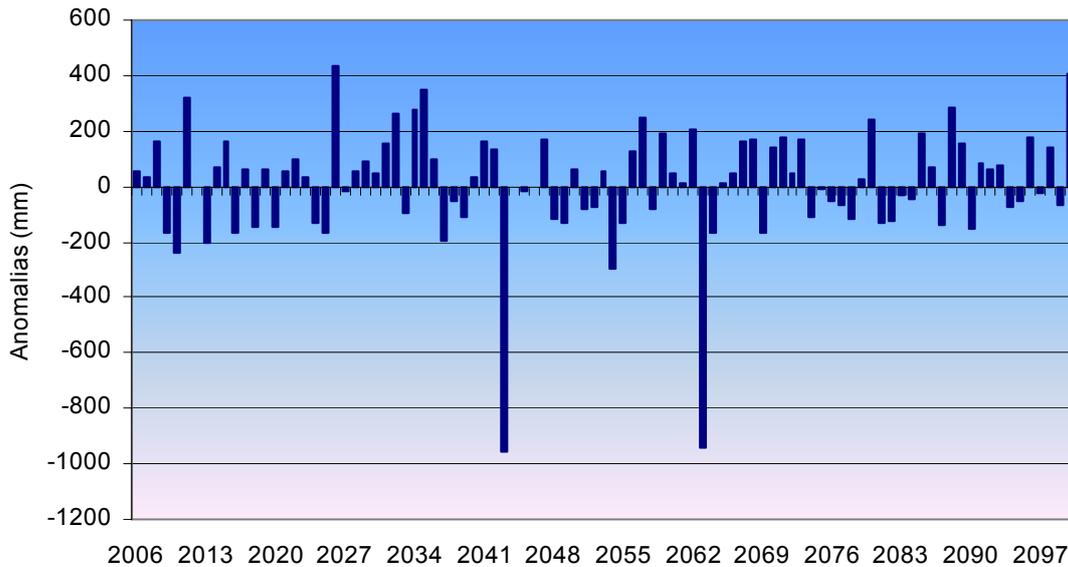


Figura 3.11 - Anomalias para a precipitação em relação às normais 1971-2000.

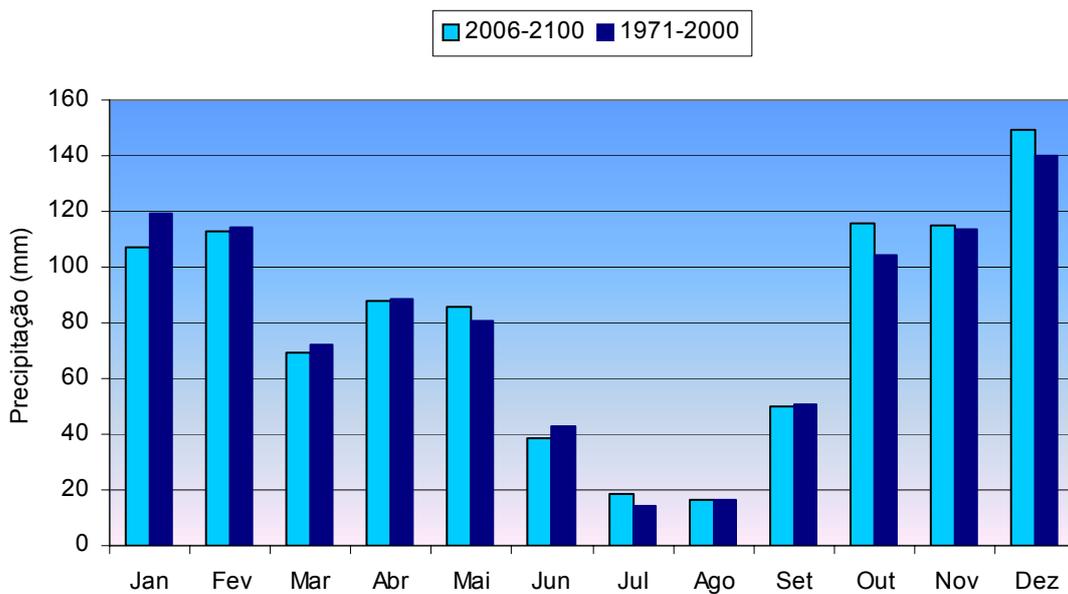


Figura 3.12 - Anomalias para a precipitação mensal em relação às normais 1971-2000.

Pela análise da Figura 3.11 pode verificar-se um comportamento diferente da série (1941-2005) anteriormente analisada, com uma menor amplitude de desvios tanto positivos como negativos. Porém, ressaltam dois picos extremos de desvios negativos de -955.9 °C e -939.2 °C para os anos de 2043 e 2063 respectivamente. Além disso, também neste caso a série apresenta aumento de quantidade de precipitação relativamente a 1971-2000.

A comparação dos valores simulados (Figura 3.12) para a precipitação mensal, com as normais climatológicas, apresentam diferença nalguns meses, mais acentuadas em Janeiro, Outubro e Dezembro. Em Janeiro, verifica-se uma diminuição da quantidade de precipitação, pelo contrário em Outubro e Dezembro verifica-se um aumento, sendo este comportamento oposto ao verificado na série anterior (1941-2005). Também no mês de Março, se verifica uma diferença acentuada em relação à série anterior, neste caso, ocorre uma diminuição, embora pouco significativa, enquanto que na anterior ocorre um aumento significativo.

No quadro 3.9 - apresenta-se os valores estatísticos determinados para a precipitação.

Quadro 3.9- Valores médios, extremos e desvio padrão de precipitação nos períodos 2005-2100 e 1971-2000.

Quantidade de Precipitação												
2005-2100												
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Prec.Média Mensal	107.0	113.1	69.5	88.2	85.7	38.5	18.3	16.6	50.3	116.1	115.2	149.3
Prec.Média Valores mínimos	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Prec.Média Valores máximos	238.1	261.9	187.7	169.3	204.7	130.7	97.5	70.4	225.1	253.5	327.4	295.5
Desvio Padrão	56.2	60.6	41.1	40.6	38.8	27.1	18.6	15.2	40.4	54.2	67.2	61.3
Período 1971-2000												
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Prec.Média Mensal	119,6	114,2	71,9	88,6	80,6	42,6	14,4	16,5	50,8	104,0	113,3	139,8
Prec.Média Valores mínimos	5,7	14,0	0,0	32,4	0,0	3,9	0,8	0,0	2,0	13,7	1,6	5,9
Prec.Média Valores máximos	284,4	309,8	181,9	202,1	176,8	155,4	68,8	59,7	145,3	284,8	367,8	349,5
Desvio Padrão	72,1	86,2	49,5	50,3	45,5	43,0	17,3	17,7	39,4	69,3	79,1	94,8

Analisando o Quadro 3.9 referente à variável precipitação, sobressai de imediato os valores mínimos de 0.0 mm observados em todos os meses do ano durante o período simulado. No que diz respeito aos valores máximos, pode constatar-se valores mais elevados na maioria dos meses da série simulada.

A comparação entre a série climática gerada pelo LARS-WG e as séries de dados meteorológicos observados mostrou que não há diferenças significativas entre as estatísticas, tendo indicado que as séries de mudança climática geradas pelo LARS-WG podem ser usadas em diversos estudos, como averiguar possíveis tendências de séries.

### 3.2.3 Desempenho do modelo

O método mais utilizado na avaliação das previsões é a comparação com os dados observados. Para verificar os resultados das simulações foram correlacionadas séries de valores diários de temperaturas máximas, mínimas e precipitação. Assim os dados das séries históricas foram comparados com os obtidos das séries simuladas pelo modelo estocástico LARS-WG para a avaliação de desempenho do modelo em relação a cenários actuais.

A avaliação do desempenho do modelo foi efectuada, considerando os últimos 21, 16, 11 e 6 anos de 1941 até 2005. Nesta análise foram comparados os valores observados (reais) com os simulados, através do *Program Statistica, correlation matrices* parâmetros estatísticos. Os resultados são apresentados sob a forma de quadros e gráficos com vista a permitir uma compreensão bem mais fácil do que os textos descritivos.

No que diz respeito ao período de validação, optou-se pelos últimos anos das séries históricas, por verificar-se uma tendência de aumento de temperatura.

#### 3.2.3.1 Análise da série 1941-2005

No Quadro 3.10 apresenta-se os coeficientes de correlação das séries de temperatura e precipitação simuladas e observadas.

Quadro 3.10 – Coeficientes de correlação significativos para o nível de significância 0.05 entre valores de temperatura máxima e mínima observados e simulados.

Coeficientes de correlação			
Nº anos	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Precipitação
6	0.93	0.91	0.51
11	0.91	0.90	0.42
16	0.90	0.88	0.29
21	0.90	0.89	0.31

Os gráficos da Figura 3.13 à Figura 3.15 mostram a correlação entre os valores observados e simulados de temperatura máxima, mínima e precipitação para o primeiro caso (6 anos), tendo em consideração uma amostra de 72 pares de valores.

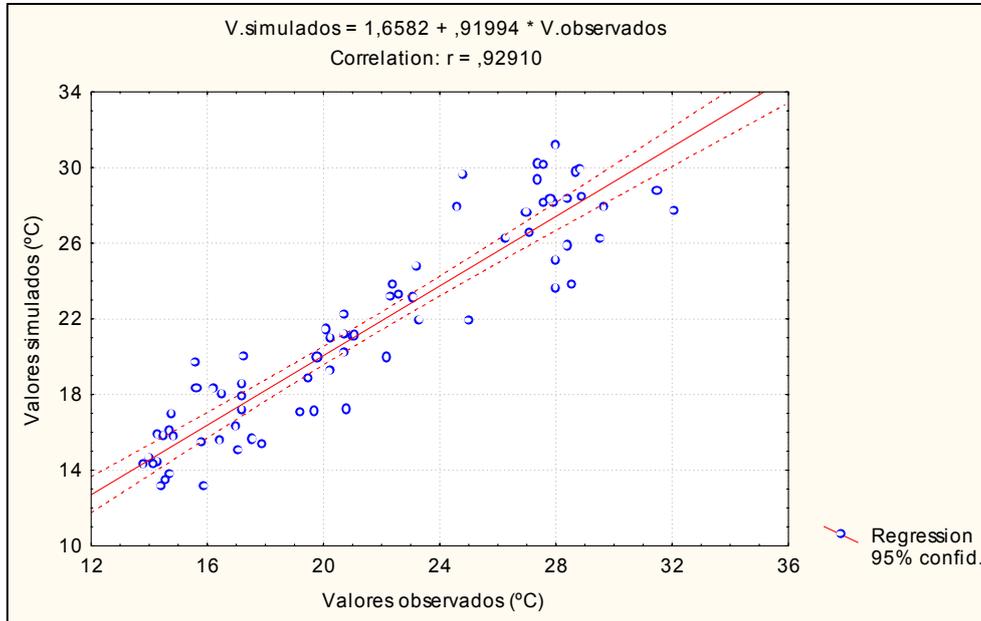


Figura 3.13 - Diagrama de correlação entre os valores de temperatura máxima observados e simulados entre 2000 e 2005.

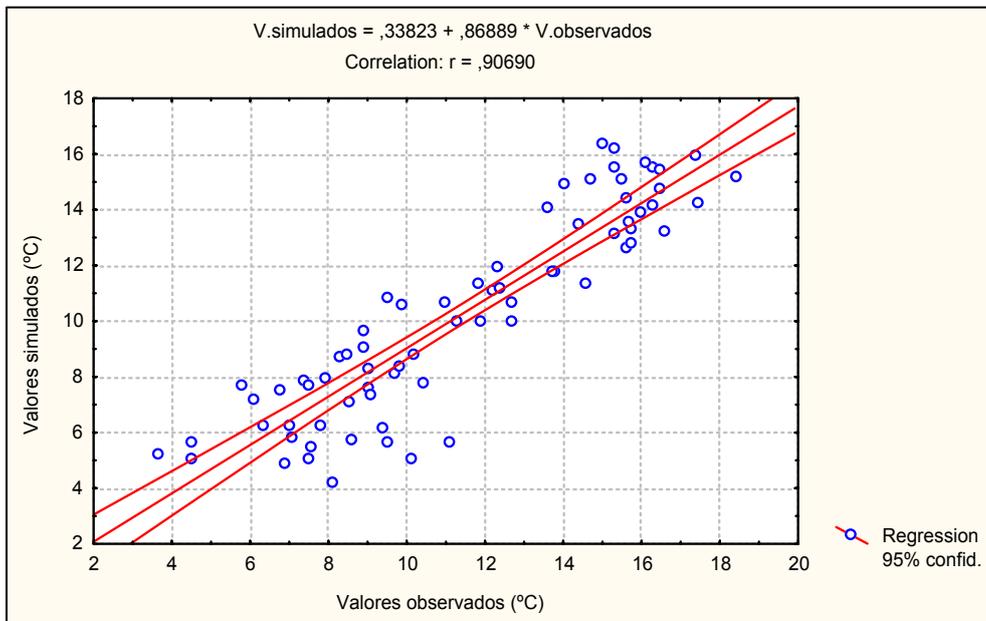


Figura 3.14 - Diagrama de correlação entre os valores de temperatura mínima observados e simulados entre 2000 e 2005.

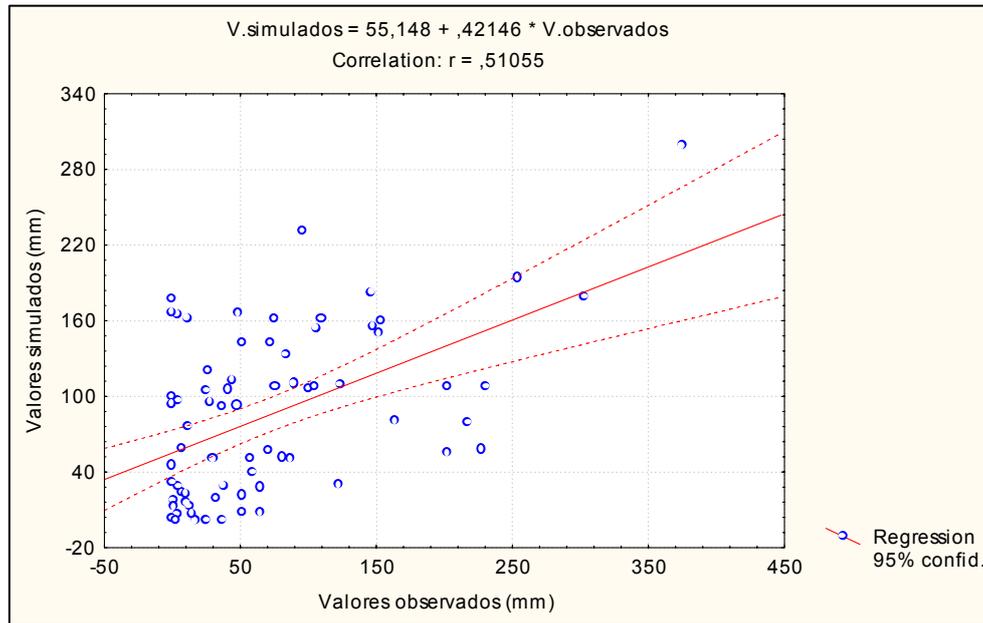


Figura 3.15 - Diagrama de correlação entre os valores de precipitação observados e simulados entre 2000 e 2005.

Pela análise do Quadro 3.10 observa-se que o modelo apresenta resposta satisfatória para a temperatura tal como seria de esperar. Com coeficientes de correlação altos, ou são superiores ou muito próximos a 0.9. No que diz respeito à precipitação constata-se que, os coeficientes de correlação são muito inferiores a 0.9. De facto, a observação directa do gráfico da Figura 3.15, permite concluir, que os pontos apresentam-se dispersos e afastam-se significativamente da recta de regressão.

Ainda, para a avaliação do desempenho do modelo utilizaram-se as estatísticas, a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), que mede a variação dos valores estimados ou previstos ao redor dos valores médios medidos ou observados, o Erro Absoluto Médio (MAE), que indica o desvio médio absoluto dos valores previstos em relação aos valores observados e o Desvio Médio (MBE) que indica o desvio médio dos valores previstos em relação aos valores observados.

Dadas por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{n}}; MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |p_i - o_i|}{n}; MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)}{n}$$

Onde  $p_i$  é o valor estimado,  $o_i$  o valor observado e  $n$  o número de observações.

Quadro 3.11 – Valores das estatísticas para a temperatura mínima, máxima e precipitação, para os períodos considerados.

Anos	Temperatura Mínima				Temperatura Máxima				Precipitação			
	6	11	16	21	6	11	16	21	6	11	16	21
RMSE	1.8	1.3	1.1	1.0	2.1	1.9	1.7	1.1	93.0	63.7	39.6	42.8
MAE	1.5	1.3	1.3	1.5	1.6	1.9	1.8	1.8	67.9	59.6	57.3	59.4
MBE	-0.6	-0.8	-0.6	-0.7	-0.2	-0.6	-0.5	-0.7	17.1	12.3	15.2	12.8

Da observação dos valores do MBE do Quadro 3.11 conclui-se que, o gerador subestimou os dados observados das séries de temperatura em todos os períodos considerados, uma vez que todos os valores são negativos, com a precipitação ocorre o inverso, isto é, sobrestimou os dados observados. Os valores de RMSE e MAE, indicam que não existe uma grande diferença entre eles, ou seja, não existe uma grande variância em cada um dos erros na amostra.

### 3.2.3.2 Análise da série 1976-2005

O Quadro 3.12 mostra os resultados obtidos através das correlações entre os dados simulados e os observados com base na série 1976-2005.

Quadro 3.12-Coeficientes de correlação significativa para o nível de significância 0.05 entre valores de temperatura máxima, mínima e precipitação observados e simulados.

Coeficientes de correlação			
Nº anos	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Precipitação
6	0,92	0,90	0,25
11	0,90	0,91	0,34
16	0,91	0,90	0,35
21	0,91	0,88	0,32

Nas figuras seguintes 3.16 a 3.18 estão representados os gráficos de correlação entre os valores simulados e observados.

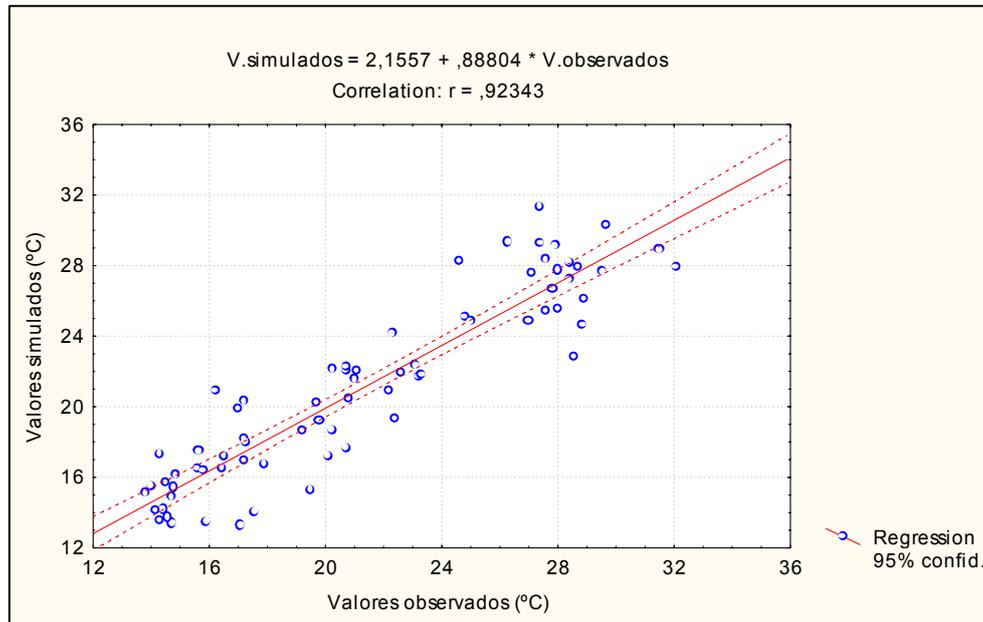


Figura 3.16 - Diagrama de correlação entre os valores da temperatura máxima observados e simulados entre 2000 e 2005.

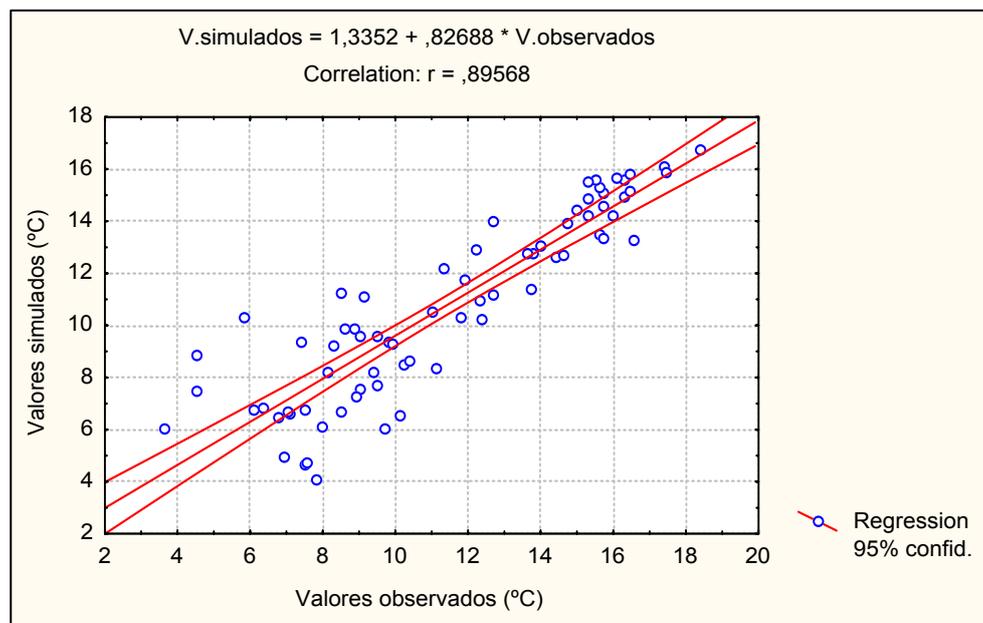


Figura 3.17 - Diagrama de correlação entre os valores da temperatura mínima observados e simulados entre 2000 e 2005.

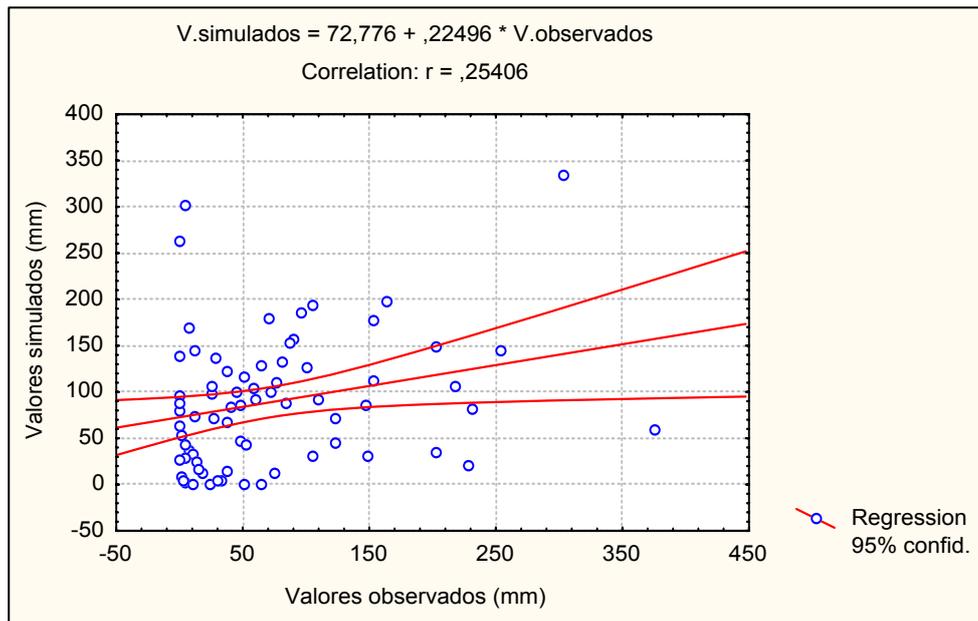


Figura 3.18 - Diagrama de correlação entre os valores da precipitação observados e simulados entre 2000 e 2005.

Tendo em conta o Quadro 3.12 verifica-se que, os valores de correlação entre as séries simuladas e observadas se aproximam bastante dos obtidos na série 1941-2000. Também neste caso os coeficientes de correlação rondam os 0.9. Mais uma vez a precipitação apresenta os coeficientes de correlação muito inferiores a 0.9, estes resultados poderão estar relacionados com o facto da série temporal da precipitação apresentar um comportamento irregular dos seus valores anuais.

Quadro 3.13 – Valores das estatísticas para a temperatura mínima, máxima e precipitação, para os períodos considerados.

Anos	Temperatura Mínima				Temperatura Máxima				Precipitação			
	6	11	16	21	6	11	16	21	6	11	16	21
RMSE	2	1.9	1.9	1.9	2	2.2	2.4	2.3	74	75.2	84.6	79.0
MAE	1.6	1.6	1.5	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	55.7	58.0	62.5	57.4
MBE	-1.2	-1.0	-0.8	-1.3	-0.1	-0.4	-0.3	-0.2	13.6	8.1	15.5	22.2

Considerando o Quadro 3.13, constata-se que existe um comportamento semelhante relativamente ao período 1941-2005. Também neste caso o gerador estocástico subestimou os valores de temperatura e sobrestimou os valores de precipitação.

Em suma, pode referir-se que o gerador estocástico subestimou os valores de temperatura e sobrestimou os valores de precipitação em todos os períodos estudados, no entanto no caso da temperatura segue as tendências registadas nas séries históricas, tanto para a temperatura máxima como para a mínima.

# Capítulo 4

## 4 Eventos extremos de temperatura ao nível de mesoescala

Existem evidências de que eventos extremos, tais como secas, cheias, ondas de calor e de frio, furacões e tempestades, têm afectado diferentes partes do planeta e produzido enormes perdas económicas e humanas. De acordo com o 4º relatório do IPCC (WGI, 2007), prevê-se, que as temperaturas máximas e mínimas aumentem os seus valores, com a probabilidade associada inerente ao próprio sistema, sendo estes acompanhados do aumento da frequência de dias com temperatura elevada. É também bastante provável um aumento de frequência de ondas de calor, sendo mais afectados os países do sul da Europa, na Bacia Mediterrânica. O aumento e duração das ondas de calor começaram a partir da segunda metade do século XX, no Verão de 2003 Europa Ocidental e Central registou os valores mais elevados de temperatura (IPCC).

Em Portugal, as projecções indicam que nos próximos 50 anos, um em cada cinco dias poderá ter temperaturas superiores a 35°C (Santos *et al.* 2006).

Uma onda de calor pode ser definida como um período de temperaturas anormalmente elevadas, com duração de pelo menos um dia, estendendo-se, convencionalmente, por alguns dias ou mesmo semanas.

Outra definição é dada como sendo um evento onde ocorrem, durante três a cinco dias consecutivos, máximas acima dos 32°C. Além destas definições, também há que levar em consideração que uma onda de calor possa ser devida a temperaturas mínimas elevadas durante um intervalo de tempo prolongado, com temperaturas iguais ou superiores a 25°C durante 2 ou mais dias. Pode ainda ser caracterizada por aumentos súbitos de temperatura em relação ao dia anterior, ultrapassando os 40°C.

Estas condições atmosféricas de temperaturas elevadas provocam condições favoráveis à formação de ozono. Estes episódios têm vindo a ser cada vez mais frequentes e a constituir um problema de poluição atmosférica.

Ao nível da saúde humana, as mudanças climáticas poderão conduzir a um aumento do número de mortes relacionadas com episódios de ondas de calor.

De acordo com relatórios da Direcção Geral da Saúde (DGS) Instituto Nacional de Saúde (INSA) e Observatório Nacional de Saúde (ONSA), (URL5), a exposição do corpo humano a temperaturas elevadas e prolongadas acima das que a população está habituada provoca efeitos na saúde. A análise de vários períodos em que as temperaturas permaneceram elevadas durante vários dias consecutivos sugere que episódios de ondas de calor têm um maior efeito na mortalidade.

Desde Maio de 1999, existe um sistema de vigilância e alerta de ondas de calor, designado por projecto ÍCARO tendo como base as observações e previsões da temperatura feitas com três dias de antecedência elaboradas e fornecidas diariamente pelo Centro de Análise e Previsão do Tempo do Instituto de Meteorologia, no sentido de prever ondas de calor que possam afectar a saúde da população (URL6).

Assim, a partir da identificação de episódios de ondas de calor, seleccionou-se o Verão de 2005 como sendo o mais recente em termos de valores elevados de temperatura, acompanhados por significativas concentrações de gases poluentes na atmosfera, em especial, o ozono.

A situação persistente de valores muito elevados de temperatura e valores baixos de humidade relativa do ar teve um significativo impacto no que respeita a fenómenos de poluição fotoquímica.

Neste tipo de eventos, os modelos de previsão numérica apresentam-se como uma ferramenta indispensável na compreensão da dinâmica da atmosfera, sendo um meio fundamental no auxílio à compreensão do fenómeno em causa. A aplicação de modelos numéricos de previsão tem sido a melhor forma de investigar se os sistemas de avisos podem ter evitado algumas catástrofes, com este objectivo e constituindo a base de trabalho, analisam-se alguns eventos meteorológicos de mesoescala no espaço e no tempo.

## 4.1 Aplicação do modelo WRF

Tal como já se referiu anteriormente, o modelo WRF é uma parte integrante de um complexo sistema de previsão numérica de tempo de mesoescala reconhecido como de próxima geração, criado para proporcionar previsões operacionais de pesquisa atmosférica. Representa uma evolução do modelo Fifth Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model (MM5). Os esforços no sentido de desenvolver o WRF foram uma colaboração entre as seguintes principais entidades: National Center for Atmospheric Research (NCAR), National Oceanic and Atmospheric Administration, National Centers for Environmental Prediction (NCEP), Forecast Systems Laboratory (FSL), Air Force Weather Agency (AFWA), Naval Research Laboratory, Oklahoma University e Federal Aviation Administration (FAA). Tendo em vista que a avaliação dos resultados da previsão do modelo requer a aplicação de complexos esquemas de verificação, que por sua vez são também relacionados com os procedimentos da simulação e a aplicação de físicas de processamento do modelo, os resultados preliminares são focados em esquemas particulares de verificação, sem ter em conta as opções físicas propriamente ditas.

Este modelo de previsão numérica do tempo de mesoescala (WRF) tem vindo a ser desenvolvido de forma a corresponder às necessidades das previsões e poder ajudar a sociedade de um modo geral.

Embora os modelos tenham apresentado progressos significativos, próximos à perfeição nos estados da circulação atmosférica retratada pelos campos da altura geopotencial de 500 hPa, nas últimas décadas (Kalnay 2003), os progressos nas previsões das precipitações quantitativas tiveram evoluções relativamente modestas (Bosart 2003). Sendo no entanto de salientar, que as melhorias nas destrezas das previsões das precipitações que ocorrem durante o Verão, comparadas às de Inverno, foram muito mais reduzidas (Ramage 1982, Olson *et al.* 1995, Ebert *et al.* 2003).

As abordagens comumente empregadas para melhorar as previsões numéricas do tempo envolvem tanto as relacionadas com os dados das condições iniciais, de fronteira e de assimilação como das formulações numéricas dos modelos, ou dos processos físicos, das parametrizações e das técnicas de análise de pós processamento em adição àqueles inerentes às incertezas das previsões com o emprego de métodos probabilísticos ou de “ensembles”.

O envolvimento com qualquer delas inclui o aspecto crucial relacionado com a da disponibilidade de dados observacionais, nas escalas espaciais dos modelos, principalmente para a avaliação dos resultados. Os dados em escala sinóptica, em muitas situações atendem às necessidades dos modelos de mesoescala mas apresentam também, entre outras, falhas bem significativas. Facto é que, quando se dispõe de dados observacionais, em escalas próximas às dos modelos, é possível a realização de simulações para avaliar as respostas às assimilações com total ou parcial emprego dos mesmos. Mas,

como a não disponibilidade não permite sequer avaliar os resultados, excepto a nível pontual, ou seja a avaliação dos resultados das previsões nos locais das observações, dificulta bastante qualquer avaliação dos resultados (Yamasaki *et al.*, 2006).

Como parte integrante da comunidade que vem utilizando o sistema WRF, foi realizada uma série de experimentos de simulações de previsão do tempo, cobrindo Portugal e suas vizinhanças, durante o mês de Julho e Agosto de 2008

## 4.2 Domínio de simulação

Para a simulação das condições atmosféricas do ano de 2005 foi utilizada a versão 2.2 do núcleo *Advanced Research WRF* (ARW). A configuração dos domínios de simulação ilustra-se na Figura 4.1, e consistiu num esquema de domínios aninhados à escala de 1:3. A primeira grelha, de 21 km de resolução horizontal, com 77 pontos na direcção Oeste/Este e 53 pontos na direcção Sul/Norte abarcando toda a Península Ibérica e a segunda, de 7 km de resolução horizontal, com 51 pontos na direcção Oeste/Este e 93 pontos na direcção Sul/Norte, centrada sobre Portugal Continental. No que concerne à resolução vertical do modelo, foram utilizados 50 níveis. Para a configuração dos domínios foram utilizados os dados geográficos da USGS, com a resolução de 30 segundos de arco.

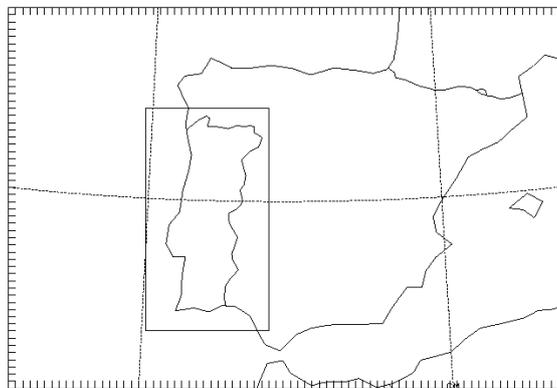


Figura 4.1- Domínios computacionais definidos para o modelo WRF (URL7).

Já no que à parametrização física do modelo diz respeito, Quadro 4.1 resume sucintamente a configuração utilizada.

Quadro 4.1 - Parametrização física do modelo WRF (URL7).

<b>Opções Físicas</b>	<b>Esquema utilizado</b>
Microfísica	<i>Ferrier</i>
Radiação de longo comprimento de onda	<i>RRTM</i>
Radiação de curto comprimento de onda	<i>Dudhia</i>
<i>Surface Layer</i>	<i>Monin-Obukhov</i>
<i>Land Surface</i>	<i>Noah Land Surface Model (4 camadas)</i>
Camada Limite Planetária	<i>Yonsei University</i>
Cúmulos	<i>Kain-Fritsch</i>

As condições iniciais e de fronteira foram construídas tendo por base os dados de reanálise do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) com resolução horizontal de 2,5°, tendo ainda sido utilizados, para a actualização da temperatura da superfície do mar, dados diários do produto *real-time, global, sea surface temperature* (RTG\_SST), desenvolvido pelo NCEP e pelo *Marine Modeling and Analysis Branch* (MMAB), com a resolução espacial de 0,5°.

### 4.3 Análise de séries temporais de dados observados na estação do IGUC

Neste contexto, considerou-se pertinente analisar o comportamento da série da temperatura máxima média anual registada desde 1865 a 2005 e a série diária de 1941 a 2005, assim como o comportamento das variáveis da qualidade do ar registadas no mês de Agosto de 2005.

A partir da identificação e caracterização dos episódios de ozono registados na estação de qualidade do ar (IGUC) do Instituto do Ambiente, seleccionou-se o mês de Agosto de 2005 como o mais recente em termos de poluição fotoquímica associada às ondas de calor ocorridas durante esse mesmo período.

O ozono é um poluente que em determinadas concentrações provoca irritações nos olhos, nariz e garganta, seguindo-se tosse e dor de cabeça. A sua acção faz-se sentir, mesmo para concentrações baixas e para exposições de curta duração. Conscientes destes factos as autoridades de diversos países e entidades (Organização Mundial de Saúde) têm vindo a estabelecer normas de qualidade do ar associadas a este poluente. Os valores fixados pela legislação

nacional são o limiar de informação ao público  $180 \mu.m^{-3}$  (média horária) e  $120 \mu.m^{-3}$  (médias octohorárias), designado por limiar de protecção da saúde humana. Por seu lado, as concentrações de  $NO_2$  não deverão exceder o valor limite horário para a protecção da saúde humana de  $200 \mu.g.m^{-3}$  (DLNº111/2002) (Monteiro, 2003).

Estes episódios ocorreram sob situações de humidade relativa do ar muito baixa, com valores médios de 22,4 % e 24,9 % respectivamente nos dias 5 e 4 de Agosto, assim como vento fraco. A situação persistente de valores muito elevados de temperatura e valores baixos de humidade relativa do ar tem um significativo impacto no que respeita a fenómenos de poluição fotoquímica tanto em Portugal como na Europa.

Na Figura 4.2 apresenta-se o gráfico de evolução da temperatura máxima média, bem como a recta de tendência e respectivo declive em  $^{\circ}C/ano$ . O resultado da alicação do teste de Kendall permitem concluir que existe na série tendência altamente significativa ao nível de  $p < 0.001$ .

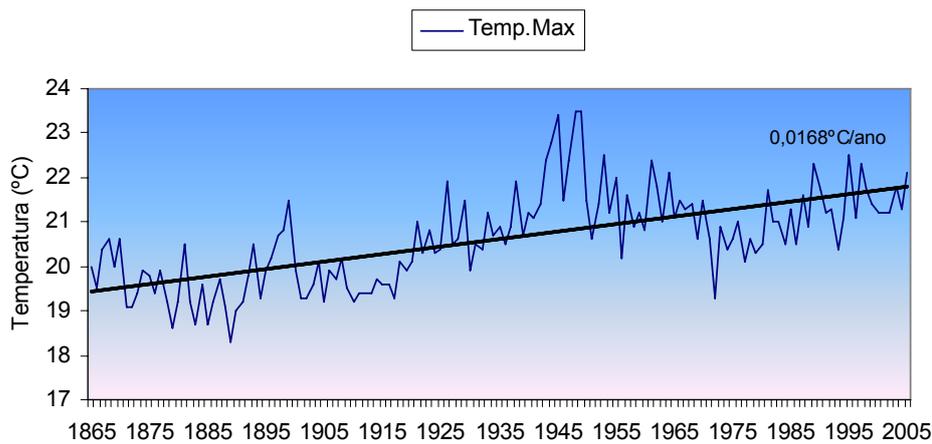


Figura 4.2- Temperatura máxima média anual no período de 1865 a 2005.

A Figura 4.3 pretende mostrar, de forma simples, episódios de cinco ou mais dias consecutivos de temperaturas máximas superiores a  $35^{\circ}C$ , nos meses de Verão ao longo do tempo.

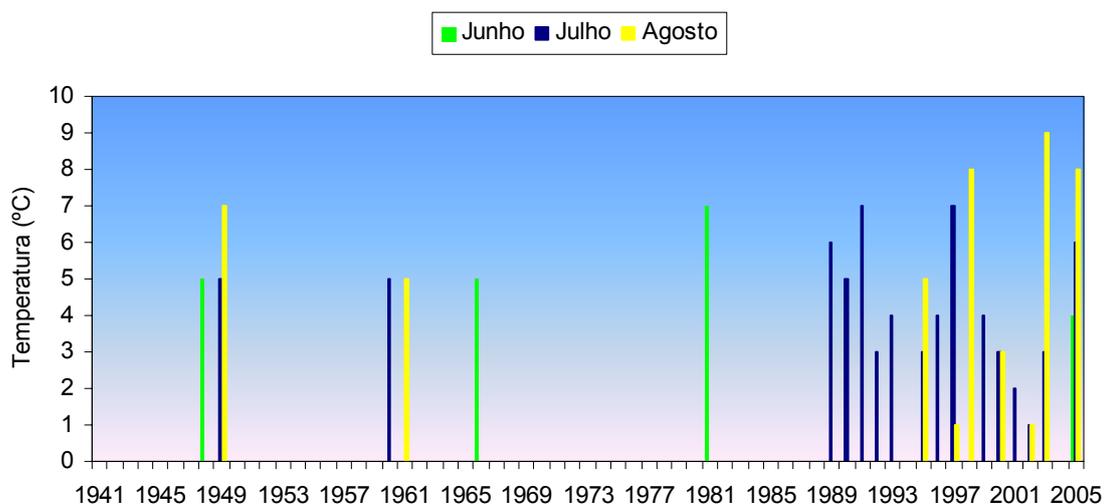


Figura 4.3- Episódios de calor de 5 ou mais dias consecutivos de temperaturas máximas superiores a 35°C durante os meses de Verão de 1941 a 2005.

Pela análise da Figura 4.3, constata-se que desde 1941, se têm verificado ondas de calor, ainda que de extensão e duração variável. No entanto, é a partir da década de 90 que este acontecimento ocorreu com maior frequência, sendo mais prolongados os períodos de dias consecutivos com temperaturas elevadas.

As maiores ondas de calor anteriormente registadas tiveram a duração de 15 e 10 dias em Agosto de 1961 e 1995 respectivamente. Também no mês de Julho se registaram ondas de calor de 12 dias em 1989 e 10 dias em 1990.

O Verão de 2005 foi o segundo mais quente, a seguir ao de 2003, nos últimos 140 anos em Coimbra, tendo sido o primeiro de 2003. Ocorreram 4 ondas de calor durante os meses de Junho, Julho e Agosto. Como se pode observar no quadro 4.2, os três meses do Verão registaram valores de temperatura média e máxima superiores às normais consideradas.

Quadro 4.2- Comparação entre valores de temperatura registados no Verão de 2005 e as normais climatológicas.

Anos	Média mensal (°C)			Média das Máximas (°C)		
	Junho	Julho	Agosto	Junho	Julho	Agosto
2005	21.8	22.1	23.4	29.6	29.7	32.1
1971/2000	18.8	20.8	20.7	25.5	28.4	28.7

A onda de calor registada entre 29 de Julho a 13 de Agosto de 2003, com 16 dias consecutivos de temperaturas superiores a 32°C foi uma das mais intensas. Ainda assim o valor mais elevado de temperatura máxima do ar foi observado durante a onda de calor do Verão de 2005, que se registou de 3 a 7 de Agosto, com 41.6 °C no dia 5 como se pode observar no Quadro 4.12.

Quadro 4.3-Valores extremos da temperatura máxima do ar que ultrapassam o registado do dia 5 de Agosto de 2005.

<b>Temperatura máxima absoluta (°C)</b>	
5 Agosto 2005	41.6
15 Agosto 1943	42.7
16 Agosto 1943	43.7
31 Julho 1944	45.8
11 Julho 1946	42.4
30 Julho 1946	43.2
28 Julho 1949	41.7
14 Junho 1981	42.3

No Quadro 4.3 pode observar-se que durante o período considerado, foi nos meses de Julho e Agosto que os valores mais elevados de temperatura média máxima ultrapassaram os 32°C.

Quadro 4.4- Valores médios mensais de temperatura máxima superiores a 32°C no período 1941-2005.

<b>Temperatura Média Máxima</b>		
Julho	1989	32.4
	1946	32.1
Agosto	1992	32.1
	1961	32.5
	1949	32.6
	2005	32.1

A média da temperatura máxima para o ano 2005 foi de 22,1 °C, + 1,1°C acima do valor médio referente às normais (1971-2000).

A frequência de mais de cinco dias consecutivos de temperaturas superiores a 35°C é superior no mês de Julho, contudo é em Agosto que se verifica o maior número de dias com valores de temperatura a ultrapassar os 40°C.

As maiores ondas de calor anteriormente registadas, com temperaturas superiores a 32°C tiveram a duração de 15 e 10 dias em Agosto de 1961 e 1995 respectivamente. Também no mês de Julho registaram-se ondas de calor de 12 dias em 1989 e 10 dias em 1990.

#### 4.4 Simulação do episódio: 5 de Agosto 2005

Para uma melhor visualização do fenómeno ocorrido nestes dias podem observar-se os resultados do modelo na Figura 4.4 onde se ilustram os padrões de distribuição de temperatura e pressão atmosférica simulados para o dia 5 de Agosto de 2005, às 14:00 UTC.

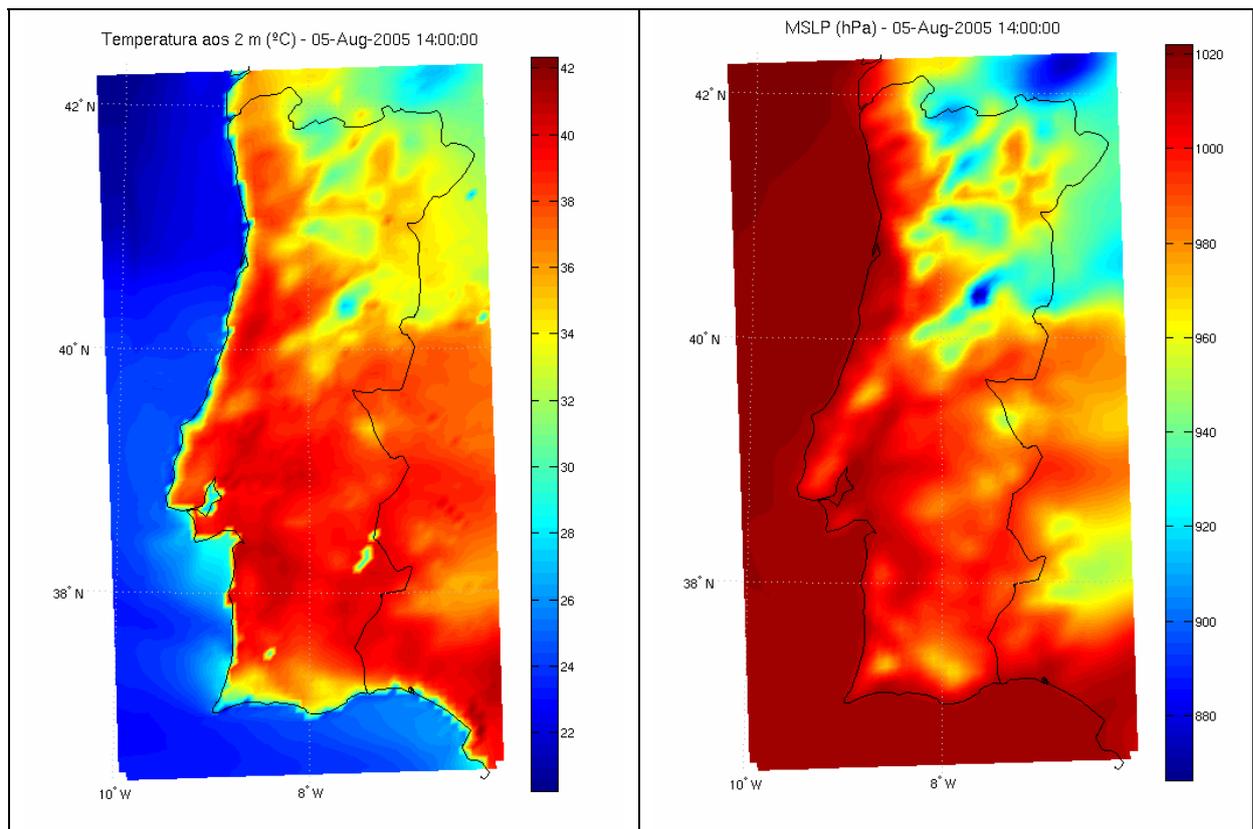


Figura 4.4 - Distribuição da temperatura a 2 m e da pressão atmosférica simuladas pelo WRF para o dia 5 de Agosto de 2005 às 14:00 UTC.

Como se pode verificar entre as Figura 4.4, 4.5 e 4.6 existe uma concordância entre os valores simulados e os valores de temperatura e pressão atmosférica registados na estação de medição automática do IGUC, em Coimbra, o que evidencia uma boa previsibilidade do evento meteorológico.

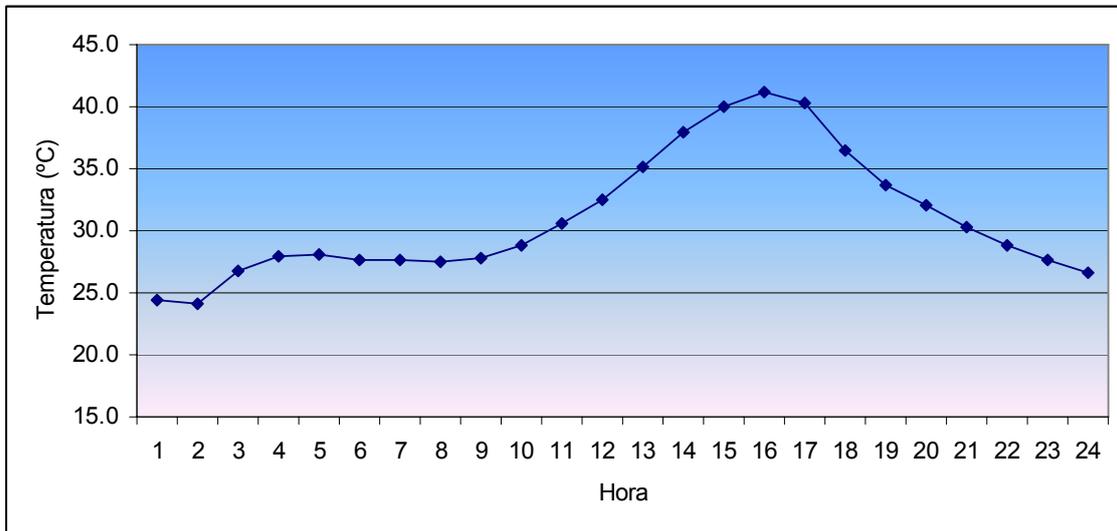


Figura 4.5- Valores de temperatura observados no dia 5 de Agosto de 2005 na estação do IGUC.

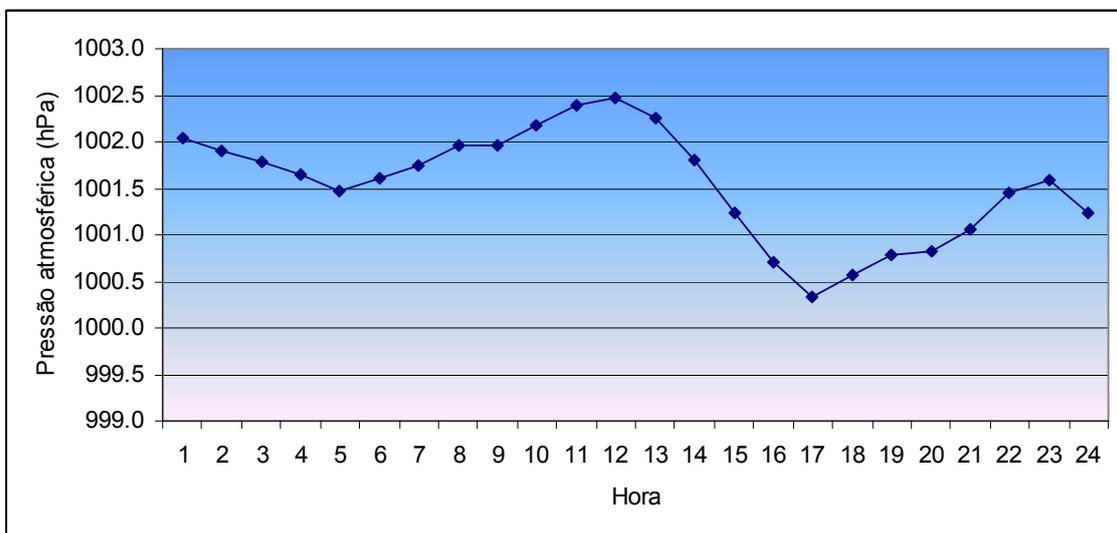


Figura 4.6- Valores de pressão atmosférica observados no dia 5 de Agosto de 2005 na estação do IGUC.

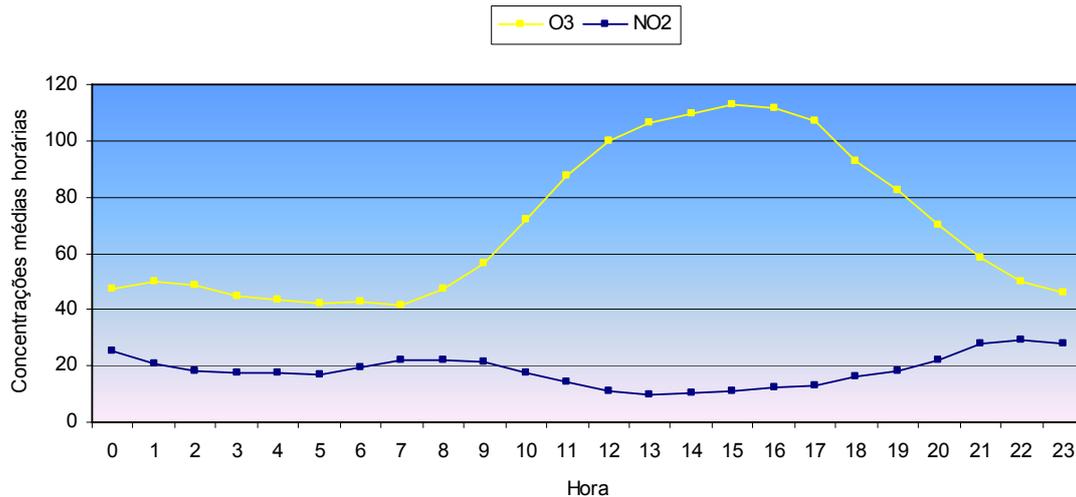
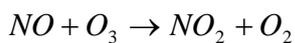


Figura 4.7-Concentrações ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) médias horárias de ozono ( $\text{O}_3$ ) e dióxido de azoto ( $\text{NO}_2$ ) para Coimbra (IGUC) no mês de Agosto de 2005.

Na Figura 4.7 observa-se que as concentrações mais elevadas de ozono ocorrem durante a tarde, quando as temperaturas são mais elevadas, como é previsível. No que diz respeito ao dióxido de azoto, este poluente tem um comportamento inverso ao do ozono. As concentrações de dióxido de azoto são mais elevadas no período nocturno, facto que se deve ao consumo de ozono pelo monóxido de azoto (NO) resultando na formação de dióxido de azoto. O ozono é um gás que rapidamente reage com monóxido de azoto dando origem a dióxido de azoto, pelo que, existindo monóxido de azoto, o ozono é rapidamente aprisionado (Pio, 2000). Com menor radiação solar baixa a concentração de ozono e este, ao reagir com o monóxido de azoto, produzido pelo tráfego automóvel, dá origem à formação de dióxido de azoto de acordo com a reacção seguinte:



Identificaram-se quatro ultrapassagens ao limiar de informação ao público ( $180 \mu\text{g.m}^{-3}$ ), em 3 dias do mês de Agosto na região em estudo, atingindo-se concentrações máximas de  $\text{O}_3$  ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ ) de: 210 dia 6 às 13:00; 191 dia 5 às 16:00; 184 e 182 no dia 15 às 15:00 e 16:00 respectivamente.

Para além deste limite, subsistem situações em que as concentrações de ozono ultrapassaram os  $100 \mu\text{g.m}^{-3}$ . Este valor resulta de um incremento de cerca de 20% ao valor considerado razoável por muitos estudos (p. ex. Monteiro, 2003), especialmente os de modelação da qualidade do ar, como concentração de fundo de ozono imposta de  $80 \mu\text{g.m}^{-3}$ .

Conclui-se ainda que os valores de dióxido de azoto registados foram muito inferiores (uma ordem de grandeza) ao valor limite horário para a protecção da saúde humana ( $200 \mu\text{g.m}^{-3}$ ).

Em resumo, a persistência de condições meteorológicas favoráveis à produção fotoquímica, tal como é o caso de Agosto de 2005, pode aumentar a magnitude das concentrações de ozono. Segundo Santos *et al.* (2002), definiu-se como episódio propício ao desenvolvimento de produção fotoquímica o número de dias com temperaturas médias diárias superiores a 25 °C, quando as temperaturas ultrapassam os 25 °C e em conjunto com ocorrência de ventos fracos, esta situação está associada à ocorrência de valores elevados de ozono.

#### **4.5 Análise de episódio: Julho de 2008; relação da circulação geral com temperatura**

À semelhança do caso anteriormente analisado, também no mês de Julho de 2008 se registaram temperaturas elevadas. O episódio meteorológico para análise foi definido entre o dia 16 e o dia 18 de Julho de 2008. Neste período o campo de altas pressões instalado sobre o Atlântico encontrava-se em forte actividade.

Tal como referido no capítulo 2, a distribuição da energia solar e as características da atmosfera são factores primordiais para a existência de vários tipos de clima, influenciando ainda a atmosfera na circulação geral. Para o estudo da circulação geral, vamos considerar apenas os movimentos de escala planetária e sinóptica.

No capítulo 2, referiu-se que a posição das faixas existentes em cada hemisfério não se mantém fixas, variam seguindo o ritmo das estações astronómicas, executando um movimento de vaivém, para Norte e para Sul à volta de sua posição intermédia. Isto tem uma elevada importância ao definir as zonas climáticas do globo.

Este ciclo anual das condições climáticas, manifesta-se de forma mais clara entre as regiões da Terra compreendidas aproximadamente entre os 30° e os 40° de latitude, onde durante o Verão o deslocamento para o Norte, no hemisfério setentrional da zona de altas pressões, dá lugar a que as características do tempo sejam de clima árido, enquanto que no Inverno, estas regiões sofrem a influência directa da frente polar, devido ao seu deslocamento para o Sul, sendo afectadas pelo tempo variável próprio das perturbações responsáveis pelas precipitações mais importantes destas latitudes (Manso, 2001).

Os Anticiclones subtropicais são quase estacionários e formam-se, em regra, sobre os grandes oceanos, deslocando-se lentamente, sendo constituídos por ar quente. No Inverno podem atingir regiões continentais. No hemisfério Norte existem dois centros de altas pressões subtropicais conhecidos por Anticiclone dos Açores e por Anticiclone do Pacífico. No hemisfério Sul aparecem normalmente, três células anticiclónicas principais que são o Anticiclone do

Atlântico Sul, o Anticiclone do Índico, que ocasionalmente constitui um prolongamento do anterior, e o Anticiclone do Pacífico Sul.

Algumas destas circulações produzem-se só ocasionalmente e pela sua tendência a persistir durante várias semanas ou até meses tornam-se um elemento essencial do clima.

Deste modo, o comportamento dos sistemas de pressão e correspondentes regimes de vento, influenciados pela distribuição dos oceanos e dos continentes, afecta todos os elementos meteorológicos, pelo que tem um papel importante nas características do tempo e do clima.

Assim, as temperaturas elevadas verificadas durante os dias 16 a 18 de Julho de 2008, podem ser explicadas atendendo à variabilidade da circulação atmosférica geral. De facto, durante este período a circulação geral caracterizou-se por anomalias no hemisfério Norte.

A metodologia seguida na análise deste episódio consiste na visualização de imagens obtidas através das reanálises do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) (URL2) referentes aos dias 16 a 18 de Julho de 2008

A Figura 4.8 representa o compósito das anomalias ao nível do mar do hemisfério Norte, para os referidos dias.

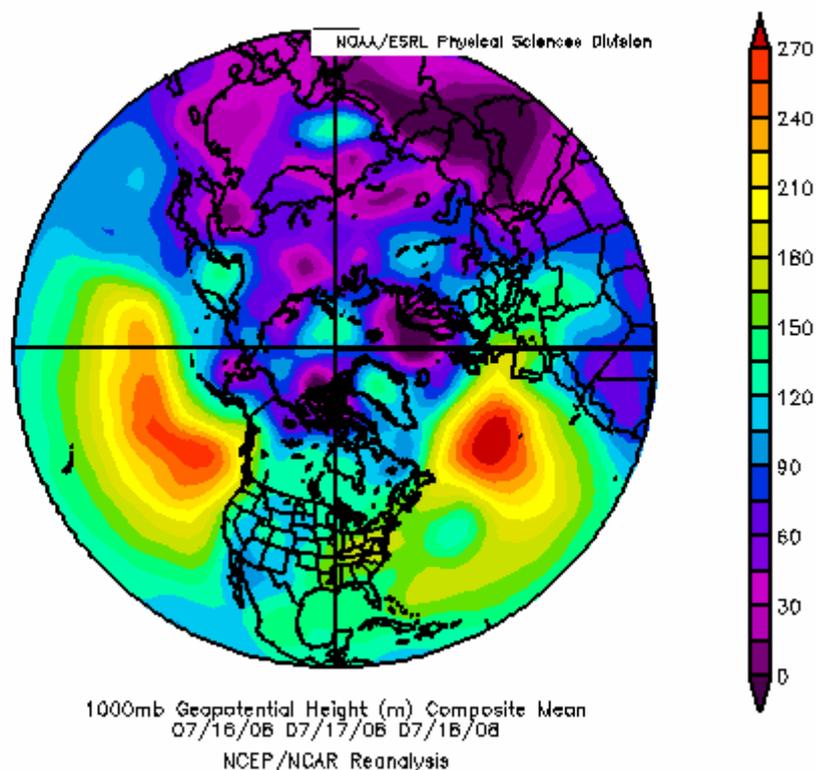
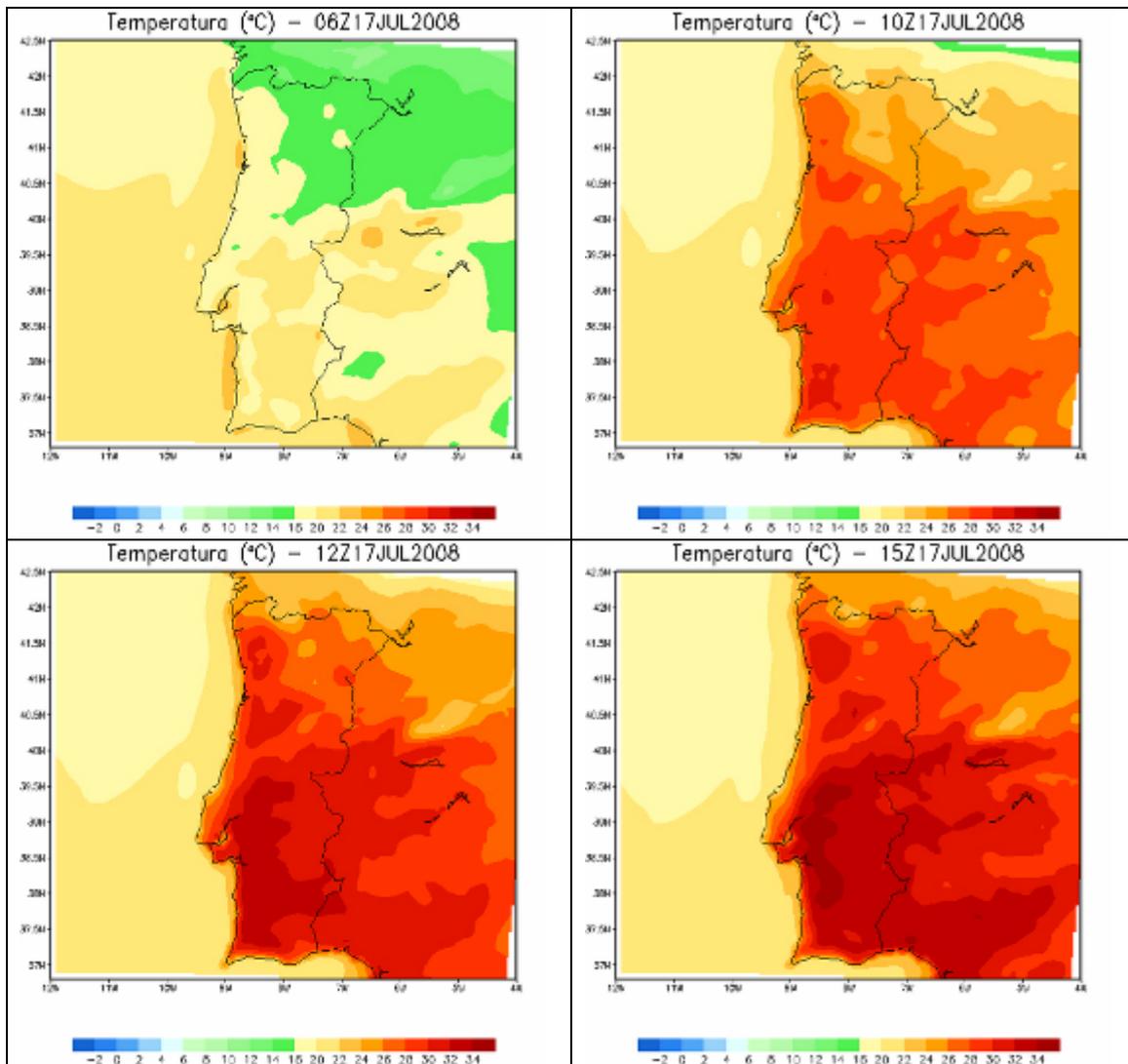


Figura 4.8 Anomalias do geopotencial ao nível do mar no Hemisfério Norte (URL2).

Pela análise da Figura 4.8, pode verificar-se uma infiltração de anomalias positivas no norte da Península Ibérica. Em Coimbra observam-se anomalias de pressão por volta dos 150 mb.

Nos mapas seguintes (Figura 4.9 a Figura 4.11) figuram as evoluções horárias da temperatura, pressão atmosférica, rumo e intensidade do vento para o dia 17 de Julho de 2008 sobre Portugal Continental.

Na Figura 4.12, representa-se a temperatura do ar (Kelvin) e pressão atmosférica ao nível médio do mar (Pa), centrada em 40°N, correspondente à latitude aproximada de Coimbra.



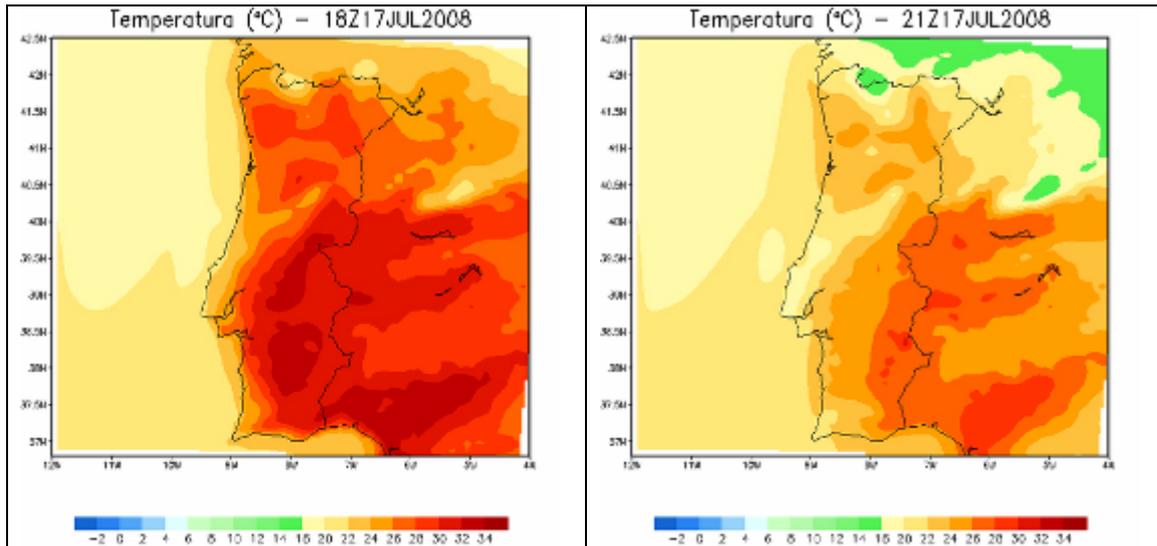
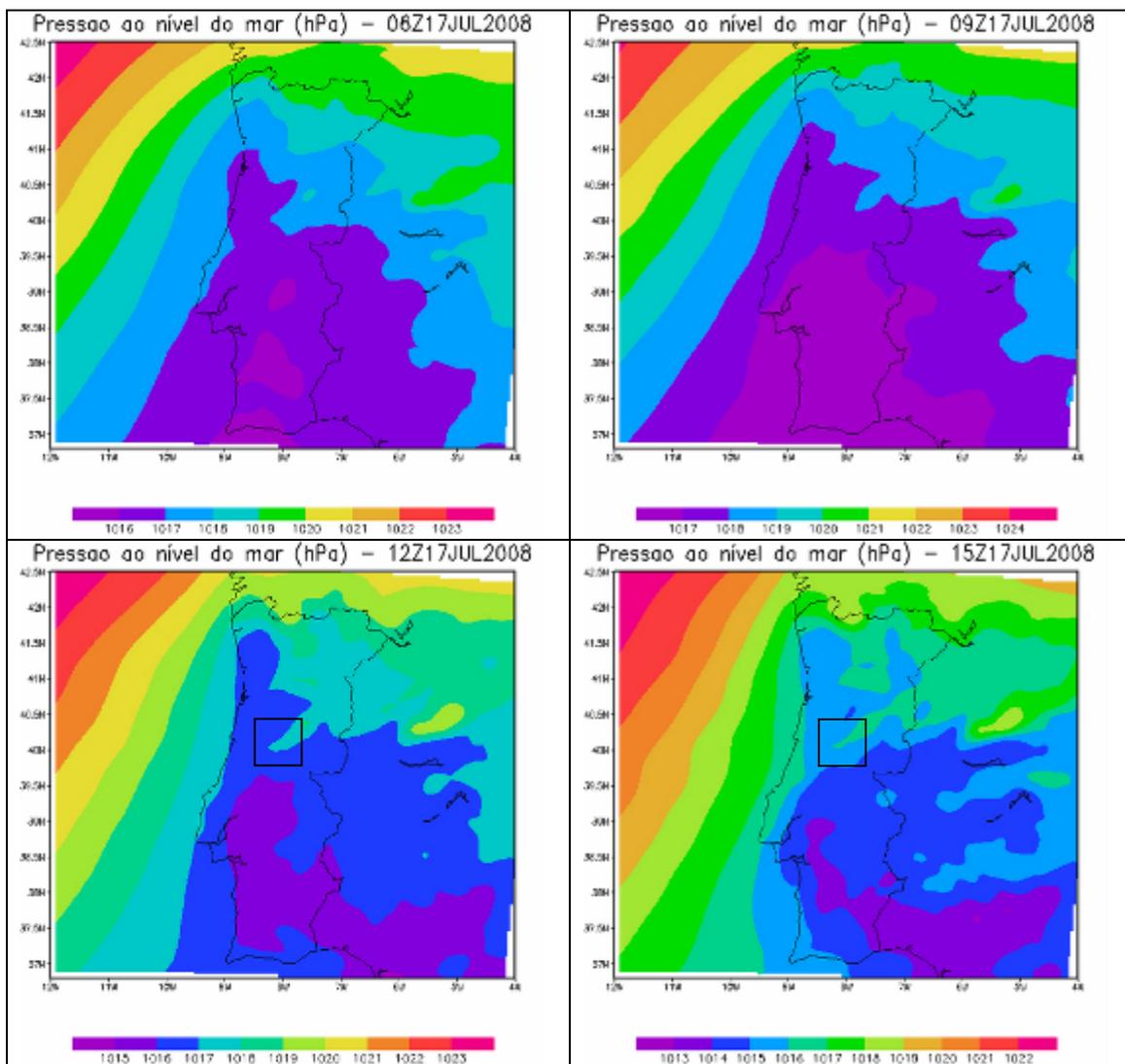


Figura 4.9 Evolução da temperatura à superfície no dia 17 de Julho de 2008.



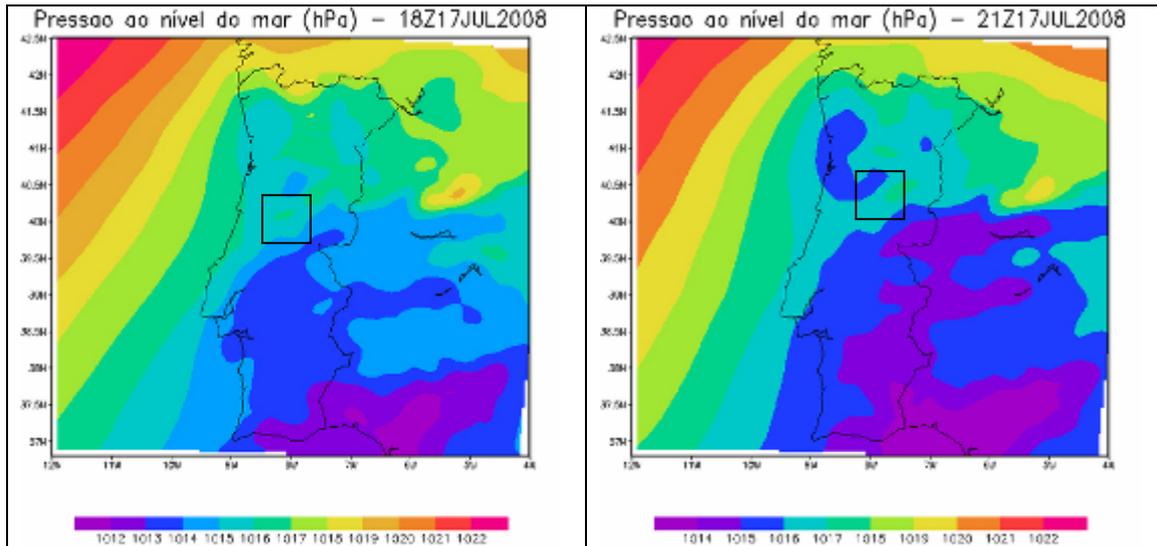
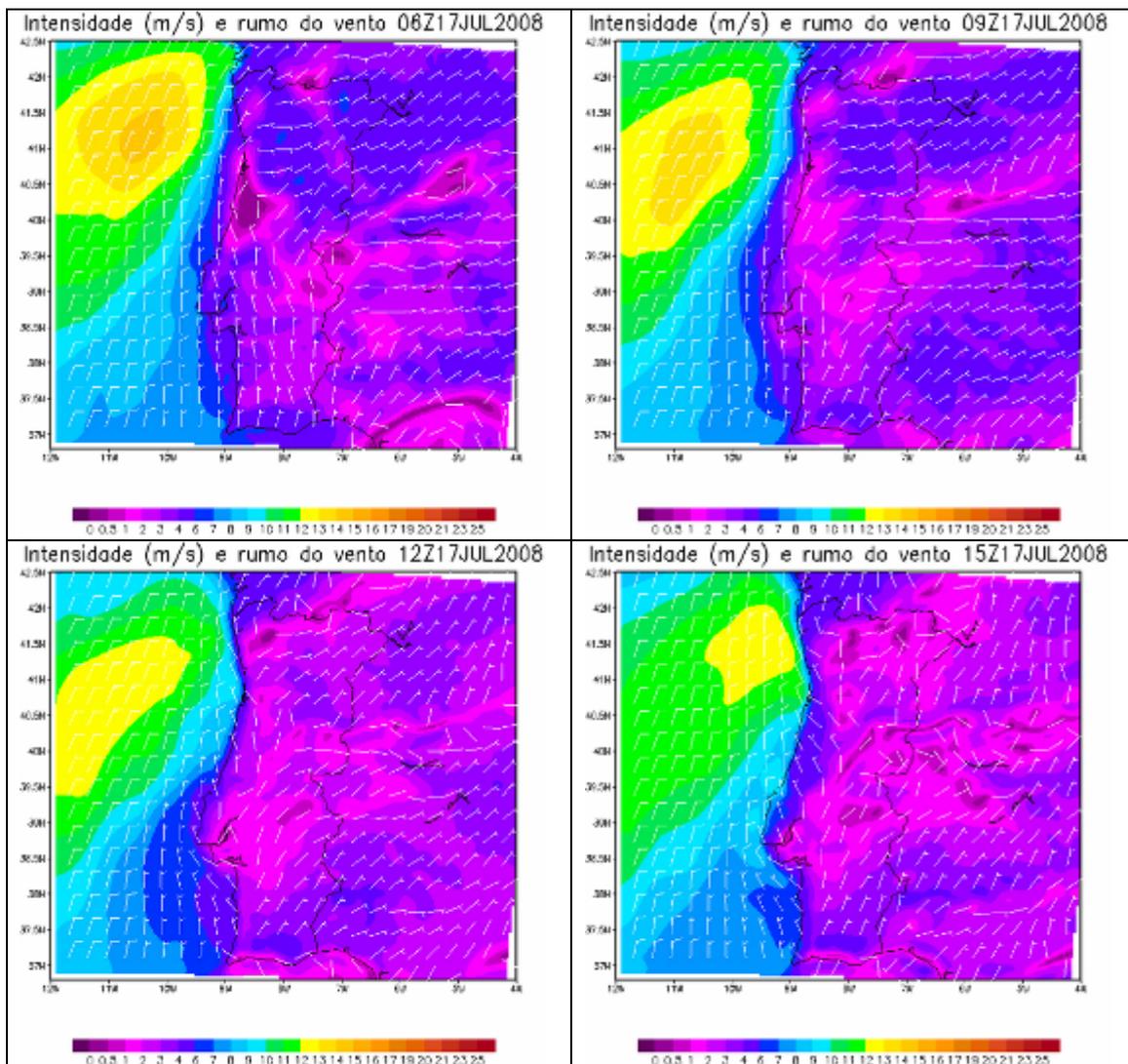


Figura 4.10 Evolução da pressão ao nível do mar no dia 17 Julho de 2008.



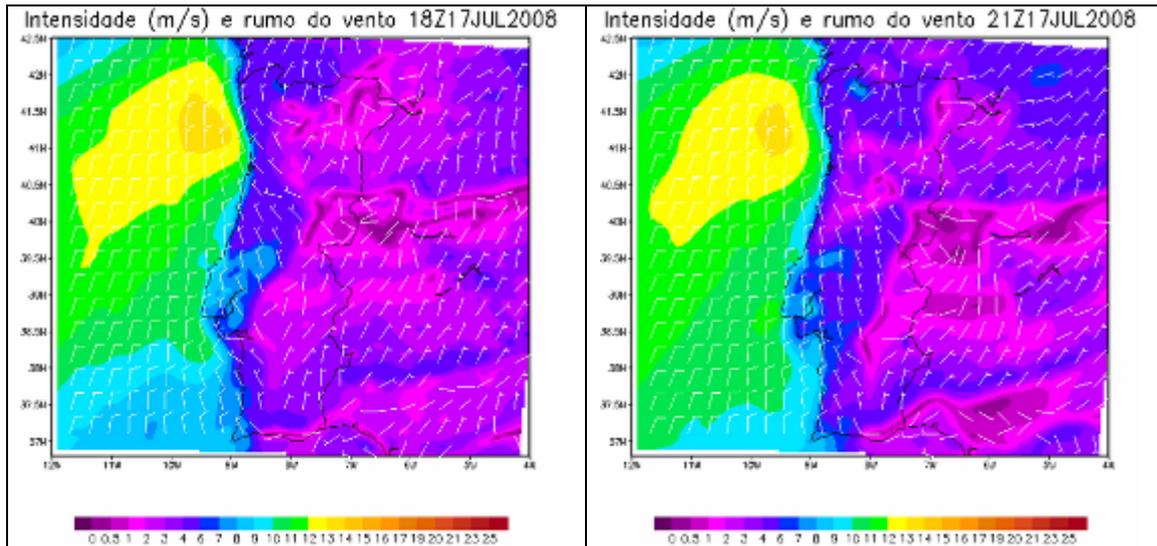


Figura 4.11 Evolução do rumo e intensidade do vento à superfície no dia 17 de Julho de 2008.

Da observação da Figura 4.9, observa-se que, a temperatura atingiu os 34 °C em algumas zonas do País entre as 12:00 e as 15:00 UTC. Em Coimbra (estação meteorológica) registaram-se valores mínimos de 17.4° C e máximos de 33.2°C.

Tendo em conta a Figura 4.10, verifica-se que a pressão ao longo do dia aumenta de 1012 hPa a sensivelmente os 1018 hPa.

Salienta-se ainda que, tal como seria de esperar a fraca intensidade do vento registada sobre Portugal Continental (Figura 4.11). Foram observados em Coimbra, neste dia, valores médios de velocidade do vento de 5.1 m<sup>-1</sup>.

No que diz respeito aos valores estimados pelo modelo verifica-se que o modelo estima valores próximos dos medidos.

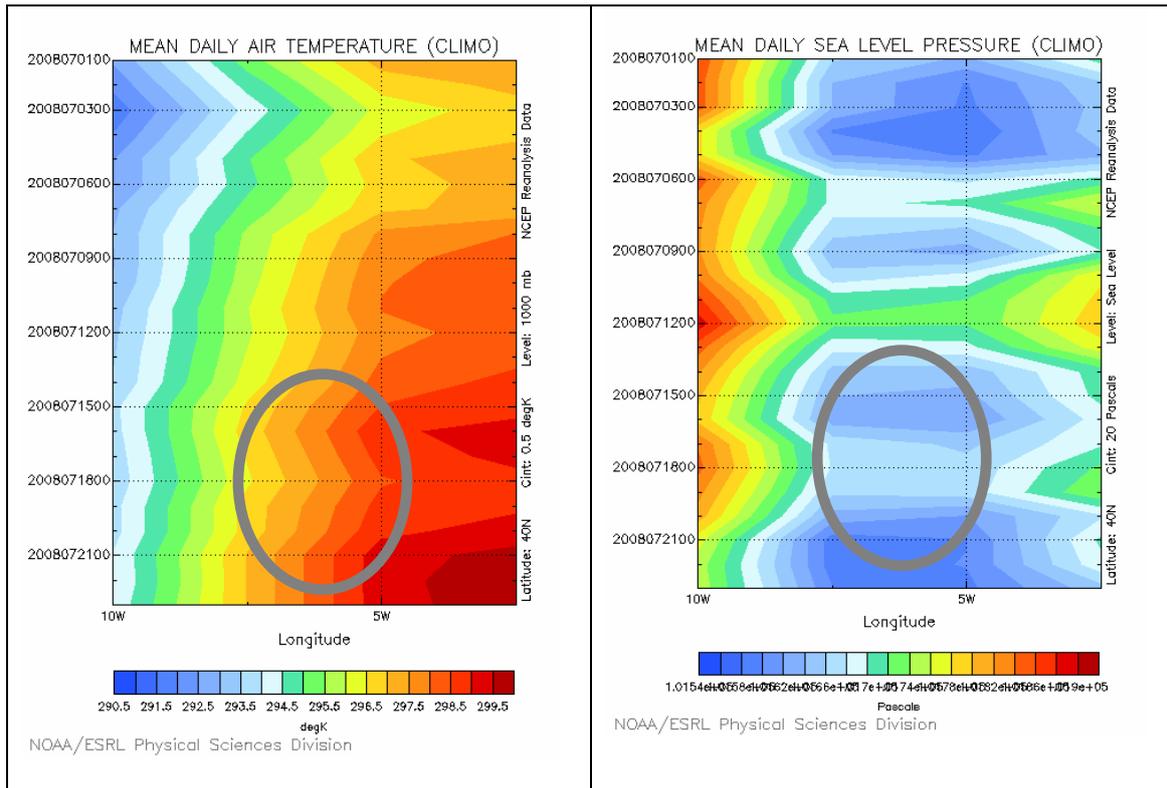


Figura 4.12- Variação temporal horária da temperatura do ar (Kelvin) e pressão atmosférica ao nível do mar (Pa).

Analisando a Figura 4.12, correspondente à variação diária da temperatura e pressão do dia 1 a 21 de Julho ao longo da longitude 10° W a 4° W, referente a dados de superfície de NCEP, observa-se um aumento nesse dia da temperatura para o interior. A pressão aumentou durante o dia como se observa na Figura 4.10 e depois volta a diminuir nos dias seguintes como se verifica na Figura 4.12.

As Figuras 4.13 a 4.15 representam a variação temporal diária das temperaturas máximas e mínimas, vento meridional e zonal e humidade relativa no período compreendido entre o dia 1 a 31 de Julho de 2008.

A análise das referidas Figuras mostra anomalias em todas as variáveis, a iniciar no dia 16 e a terminar no dia 18. Estas anomalias verificam-se por um aumento das temperaturas máximas e mínimas (Figura 4.13), por uma diminuição da componente meridional e aumento da componente zonal do vento (Figura 4.14) e ainda, por uma diminuição apreciável da humidade relativa (Figura 4.15).

Neste período, como descrito, conjugando os parâmetros meteorológicos, foram criadas as condições físicas propícias para uma ilha de calor na região de Coimbra. Tal como ilustram as Figuras esta situação meteorológica prolonga-se longitudinalmente para o interior do país.

A observação da Figura 4.8, correspondente à superfície do geopotencial permite verificar que a posição do anticiclone dos Açores se encontra na sua posição mais alta, o que deste modo, favorece a intensificação da ilha de calor.

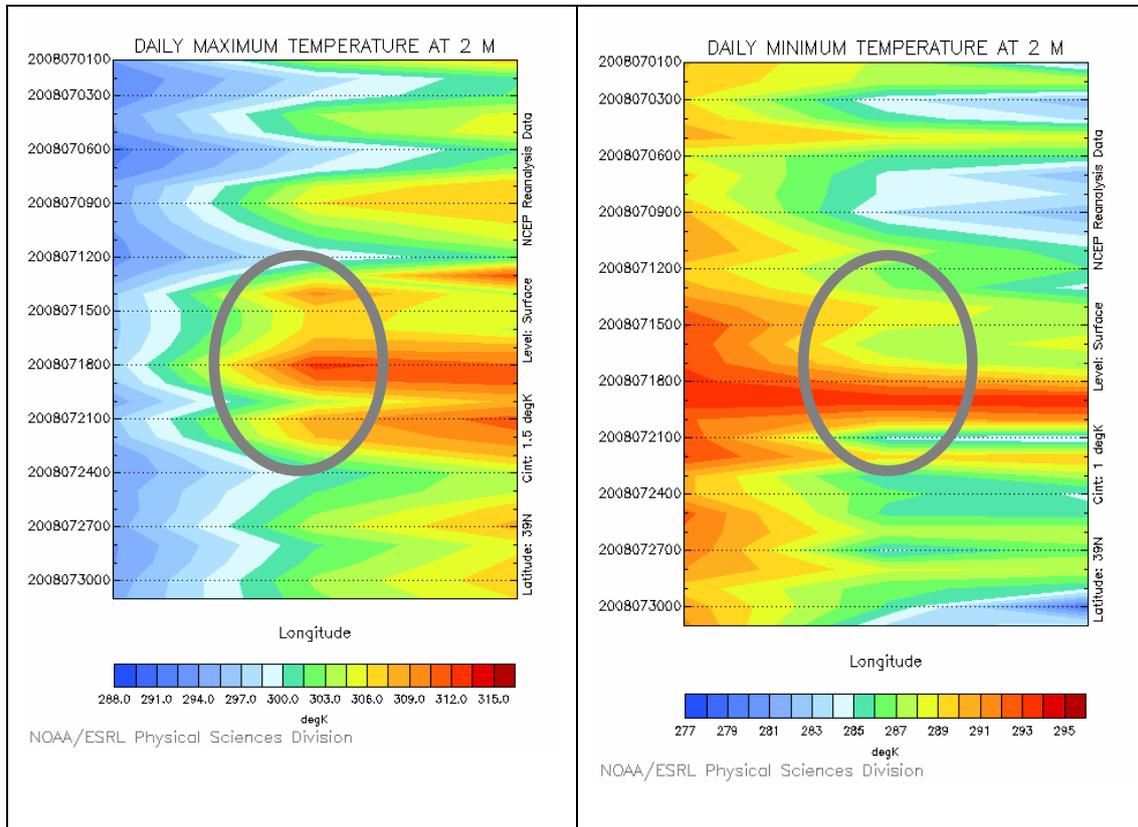


Figura 4.13- Variação temporal horária da temperatura máxima e mínima.

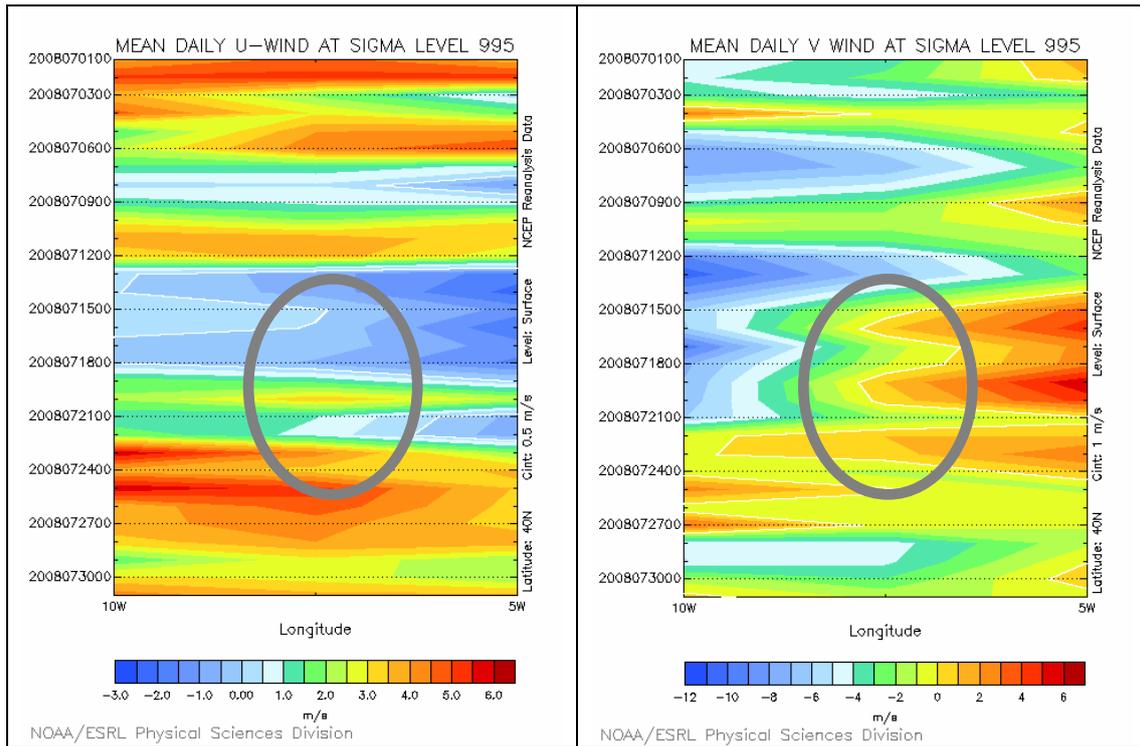


Figura 4.14- Variação temporal horária do vento meridional e zonal.

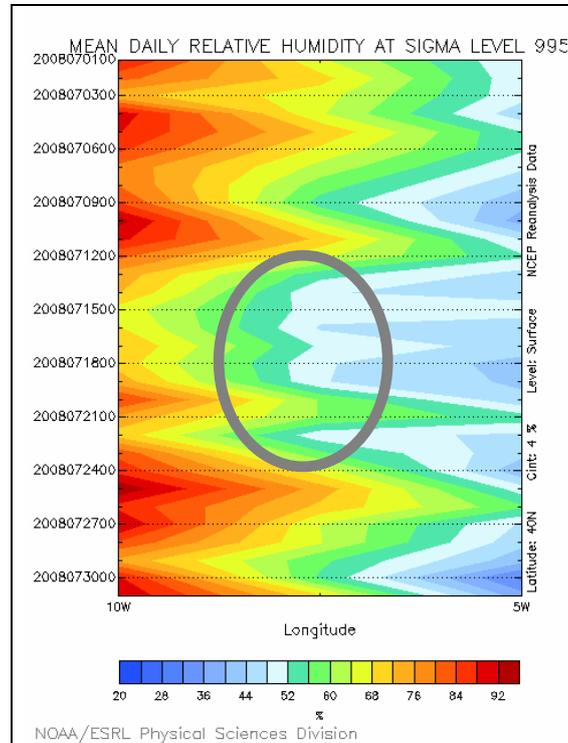


Figura 4.15- Variação temporal horária da humidade relativa.

Em resumo, estas temperaturas elevadas ocorridas durante este período não podem ser explicadas só como um fenómeno local, mas devidas à variabilidade da circulação atmosférica geral.

Desta forma, o melhor entendimento dos sistemas de escala sinóptica que favorecem a ocorrência destes fenómenos é fundamental para a previsão e tentativa de minimizar prejuízos causados pelos mesmos.

# Capítulo 5

## 5 Conclusões

Neste trabalho desenvolveu-se um estudo sobre a variabilidade climática nas diferentes escalas no espaço e no tempo, desde a global à mesoescala.

O estudo comparativo da variabilidade climática à escala planetária entre Marte e Terra revelou que ambos os planetas possuem sistema climático constituído pelos sub-sistemas: atmosfera, litosfera, criosfera e hidrosfera, embora com composições diferentes. Os padrões de temperatura são semelhantes em ambos os planetas, mais elevadas nas zonas equatoriais e menores nos pólos, porém diferentes em valores absolutos. Centros de altas e baixas pressões em ambos os planetas, sendo também diferentes em ordens de grandeza. Assim como na Terra, Marte também possui variabilidade sazonal, com as quatro estações diferenciadas, no entanto com duração diferente das da Terra, cada dia em Marte corresponde a 24h 39 35.2s da Terra. Ainda há muito a investigar e a falta de estatísticas que abranjam um longo período pressupõe, desde logo, uma dificuldade.

Relativamente à variabilidade climática das séries longas de precipitação e temperatura máxima, mínima e média em Coimbra, são de salientar os seguintes aspectos:

### Temperatura

- Período 1865-2005, todas as séries mostram tendência crescente;
- Período 1865-1975, série de mínima mostra tendência decrescente, as outras duas, tendência crescente;
- Período 1976-2005, todas as séries mostram tendência crescente.

### Precipitação

- Período 1865-2005, tendência crescente;
- Período 1865-1975, tendência crescente;
- Período 1976-2005, tendência decrescente.

Os resultados da aplicação do gerador estocástico (LARS-WS) às séries de temperatura e precipitação em Coimbra evidenciaram projecções de anomalias positivas e negativas em relação às normais (1971-2000), consoante o período analisado, assim:

### Temperatura

- Período 1941-2005, série de máxima: anomalias positivas (+0.3°C); série de mínima: anomalias negativas (-0.2°C);
- Período 1976-2005; série de máxima e mínima: anomalias positivas (+0.2°C);

### Precipitação

- Período 1941-2005, anomalias positivas (28.3 mm);
- Período 1976-2005, anomalias positivas (10.3 mm).

Da validação do gerador é importante referir subestimou os valores de temperatura e sobrestimou os valores de precipitação.

Neste estudo, na escala da mesoescala foram estudados dois casos de ondas de calor referentes a Agosto de 2005 e Julho de 2008. Sendo as causas devidas alterações de subidas e descidas de humidade, vento e principalmente da pressão pela intensificação do Anticiclone do Atlântico. Estes casos foram analisados pelo modelo (WRF) e pode-se concluir que, o modelo foi eficaz em detectar antecipadamente alterações do tempo e assim poder evitar situações de risco. Como analisado, em Coimbra ao longo do tempo (1941-2005) ocorreram várias ondas de calor, mais frequentes a partir da década de 90.

Ainda, as simulações realizadas com o modelo (WRF) permitem concluir que este período reuniu condições meteorológicas propícias a episódios de desenvolvimento de produção fotoquímica.

## Referências

Antunes, S. ; Espírito Santo , F. e Oliveira Pires, (1996): Assessment of Regional Climatic Variation and Urban Island Trends from Long Climatological Séries. Actas de Conference on Environment Statistics and Earth Science, Brno, Republica Checa, pp A1-A5.

Antunes, S., Oliveira Pires, H. e Rocha, A. (2000), Singular Singular Spectral Analysis (SSA) Applied to Portuguese Temperature and Precipitation Amount Series, Actas de 15<sup>th</sup> Conference on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences, American Meteorological Society.

Buchdahl, J. (1999) – Global Climate Change Student Guide. Atmosphere, Climate and Environment Information Programme, ARIC, Manchester Metropolitan University, Manchester, Reino Unido.

Caramelo L. and Manso Orgaz MD (2006). A study of precipitation variability in the Duero Basin (Iberian Peninsula). *Int. J. Climatol.* 27:327-339.

Clifford, S. M., (1993), *J. Geophys. Res.* 98, 10973–11016.

F. D. Santos, K. Forbes, R. Moita (editors), Gradiva, Lisboa, 2002, “Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures – SIAM Project”.

F.D. Santos e P. Miranda (2006). Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação - Projecto SIAM II" Gradiva, Lisboa, 2006.

Fenton, P. E. Geissler, and R. M. Haberle (2007), South Polar Warming on Mars: Climate Forcing by Recent Albedo Changes. *Lunar and Planetary Science XXXVIII*.

Forget, F. E. Millour, J.B. Madeleine, F. Lefevre, F. Montmessin, Simulation of the Mars Water Cycle With the LMD Mars Global Climate Model, Mars Water cycle workshop, Paris 2008.

Frías M.D, Fernández J, Sáenz J., Rodríguez-Puebla C. (2005): Operacional predictability of monthly average maximum temperature over the Iberian peninsula using DEMETER simulations and downscaling. *Tellus* 57A, 448-463.

Graf H.F.,Feitcher J. ,Langmann B. (1997), Volcanic sulphur emissions: Estimative of Source Strength and its Contribution to the Global Sulfate Distribution. *Journal of Geophysical Research* 102,10727-10738.

Harrison, K. P., R. E. Grimm, 2008, Cryosphere Disruption and Aquifer Recharge on Mars,1050 Walnut St., Ste 300, Boulder, CO 80302.

IPCC (2001) . *Climate Change 2001: The Scientific Bases. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Ed.: J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linder, X. Dai and C.A. Johnson. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.

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, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC (2007) - *Climate Change 2007, Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,* Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.

Jaenicke, R. *Em Aerosol-Cloud-Climate Interactions;* Hobbs, P. V.,ed.; Academic Press Inc.: U.K., 1993, p. 1-31.

Lori K. Fenton and Mark, I. Richardson (2001), Martian Surface Winds: Insensitivity to orbital changes and implications for Aeolian processes. *Journal of Geophysical Research*, vol.106, NO. E12, PAGES 32,885-32,902.

Manso, M.D., 2001, *Apontamentos de Climatologia Geral,* Universidade de Aveiro.

M. José N. Chorro, Luis Carvalheiro, M.D.Manso, E.Ivo.Alves (2008). *XXIX Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española (AME).*

McIlveen, Robin (1998). *Fundamentals of Weather and Climate.* Stanley Thornes (Publishers) Ltd. ISBN: 0-7487-4079-1.

Michael Carr, 2006, *The Surface of Mars* Cambridge Planetary Science.

Monteiro, A., 2003, *Poluição Atmosférica na região de Aveiro: modelação de mesoscala e sua validação: Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Mestre em Poluição Atmosférica.*

Nicks, A.D., Lane, L.J., Gander, G.A., 1995. *Weather generator.* In *USDA Water Erosion Prediction; Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation,* edited by D.C. Flanagan and M.A. Nearing, Ch. 2. USDA-ARS

NSERL Rep. 10, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN.

Nieto, S. e Rodrihuez Puebla (2006), Comparison of precipitation from observed data and general circulation models over the Iberian Peninsula. *J.Climate*.

Nilton O. Renno, Brent J. Bos, David Catling, Benton C. Clark, Line Drube, David Fisher, Walter Goetz, Stubbe F. Hviid, Horst Uwe Keller, Jasper F. Kok, Samuel P. Kounaves, Kristoffer Leer, Mark Lemmon, Morten Bo Madsen, Wojciech Markiewicz, John Marshall, Christopher McKay<sup>1</sup>, Manish Mehta, Miles Smith, Peter H. Smith, Carol Stoker, Suzanne M. M. Young, (2009), Physical and Thermodynamical Evidence for Liquid Water on Mars? 40th Lunar and Planetary Science Conference.

Peixoto, J.P (1998), O Sistema climático total e seus componentes. EXPO 98. Lisboa.

Peixoto, José P. and Oort, Abraham H. (1992). *Physics of Climate*. Ed: American Institute of Physics.

Poster D. L., Hoff R. M. e Baker J. E. (1995) Measurement of the particle-size distributions of semivolatile organic contaminants in the atmosphere. *Environment Science and Techonology* 29,1990-1997.

R. John Wilson, Stephen R. Lewis, Luca Montabone, and Michael D. Smith (2008), Influence of Water ice clouds on Martian Tropical Atmospheric Temperatures. *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, L07202.

R.M. Haberle, F. Montmessin<sup>1</sup>, F. Forget, A. Spiga, and A. Colaprete (2003), Obliquity Driven Climate Change in Mars' Recent Past. Third Mars Polar Science Conference.

Richardson, C.W. (1981): Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation. *Water Resources Research* 17, 182-190.

Richardson, C.W. Weather simulation for crop management models. *Transactions of the ASAE, St. Joseph, V.28, n.5, p.1602-1606,1985*.

Salby, Murry L.(1996). *Fundamentals of atmospheric physics*. International Geophysics Series. Volume 61.Eds: Renata Dmowska and James R. Holton. Academic Press.

Salstein D. (1995) Tropospheric aerosols Em. Sigh H. B. (ed) *Composition Chemistry and climate of the Atmosphere*, pp.19-170. Van Nostrand Reinhold, U.S.A.

Santos, F. D. Forbes K. e Moita, R. (2002) : *Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures*. SIAM Project, Gradiva, Lisboa, Portugal, 454 pp.

Santos, F. D., Miranda, P. (eds) (2006): Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação - Projecto SIAM II, Lisboa, Gradiva.

Semenov, M.A. and Barrow, E.M. (1997): Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic Change* 35, 397-414

Semenov, M.A., Brooks, R.J., Barrow, E.M. and Richardson, C.W. (1998): Comparison of WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research* 10, 95-107.

Semenov MA & Brooks RJ (1999) Spatial interpolation of the LARS-WG stochastic weather generator in Great Britain. *Climate Research*, 11:137-148

Smith, M. D. (2002) *JGR*, 107, doi:10.1029/2001JE00001522.

Von Storch (2004) - Reconstructing Past Climate from noisy data. *Science*, 306, pp. 679-682.

Virgens Filho, J. S. , Maysa de Lima Leite, Angelo Cataneo, 2006):Avaliação de três geradores de dados climáticos na simulação da temperatura do ar. *Rev. Bras.Agrometeorologia*, v.14,n.2,p.196-209,2006.

Wallace Broecker,(1975) "Climatic Change: Are We on the Brink of a Pronounced Global Warming?" *Science*, vol. 189 (8 August 1975), 460-463.

Wallace Broecker, Robert Kunzing (2008), *Fixing Climate: What Past Climate Changes Reveal About Current Threat—and How To Counter it*. Amazon.149pp.

Wilson, R.J. G. Neumann, and M.D. Smith (2007),The diurnal variation and radiative influence of Martian water ice clouds, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L02710, doi:10.1029/2006GL027976.

Yamasaki Y., Alves E.G.P., Orgaz M.D.M. (2005) Avaliação do WRF para a Região do Estado do Rio Grande Do Sul. *Anales IX Congreso Argentino de Meteorología – Centro Argentino de Meteorología* ISBN 987-22411-0-4. 7p.

Yamasaki Y, Silva AM, A, Santos A, Manso M. D.(2006) Diagnósticos de Previsões Numéricas de WRF .XXIX. *Jornadas Científicas de la AME y del 7º Encuentro Hispano-Luso*. ISBN-13:978-84-611-1490-0.

URL 1: <http://johnson.lmd.jussieu.fr:8080/las/servlets/dataset>

URL 2: <http://www.cdc.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>

URL 3: <http://www.rothamsted.bbsrc.ac.uk/mas-models/larswg.php>

URL 4: <http://www1.ci.uc.pt/iguc/>

URL 5: <http://www.dgs.pt/>

URL 6: <http://www.meteo.pt/pt/>

URL 7: <http://www2.fis.ua.pt/torre/Luis/>