Universidade dos Açores



MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS REGIÕES INSULARES

Ricardo Filipe Domingos Tomé

Doutoramento em Física

Tese orientada pelo Prof. Doutor Pedro Manuel Alberto de Miranda e pelo Prof. Doutor Eduardo Manuel Vieira de Brito de Azevedo

> Angra do Heroísmo 2013

Universidade dos Açores Departamento de Ciências Agrárias



MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS REGIÕES INSULARES

Ricardo Filipe Domingos Tomé

Doutoramento em Física

Tese orientada pelo Prof. Doutor Pedro Manuel Alberto de Miranda e pelo Prof. Doutor Eduardo Manuel Vieira de Brito de Azevedo

> Angra do Heroísmo 2013

À minha mãe

Agradecimentos

Os meus agradecimentos ao Prof. Pedro Miranda, meu supervisor, pelo seu apoio e por me proporcionado a oportunidade de realizar esta tese com grande liberdade. Agradeço igualmente, ao Prof. Eduardo Brito de Azevedo, também meu supervisor, que me proporcionou a oportunidade de realizar esta tese na Universidade dos Açores, e por me receber de braços abertos. Agradeço, igualmente ao Centro do Clima, Meteorologia e Mudanças Globais, e ao Instituto Dom Luiz, que me ofereceram as melhores condições para a realização deste trabalho, nomeadamente a grande capacidade de meios de cálculo sem os quais não seria possível realizar esta dissertação.

Também gostaria de agradecer ao *Risø Tecnhical University of Denmark, Wind Energy Division*, na Dinamarca, que me acolheu durante quatro meses e onde pude usufruir de um bom ambiente de trabalho, e de uma experiência profissional diferente. Não poderia deixar de agradecer a Anna Maria Sempreviva, que não só possibilitou a minha ida para o *Risø*, como me levou a trabalhar em temas diferentes dos que estou habituado, nomeadamente no processamento de dados de LIDAR e na determinação da altura da camada limite planetária usando o LIDAR no âmbito do projecto *Ligurian Air-Sea Interaction Experiment* (LASIE).

Não poderia também deixar de agradecer ao *Department of Earth Sciences at Uppsala University*, na Suécia, onde fui acolhido durante três meses, e onde pude usufruir de um óptimo ambiente de trabalho e conheci pessoas interessantes. Não posso deixar de agradecer ao Doutor Álvaro Semedo, que durante a minha estadia na Suécia sempre me apoiou, e desviou a minha atenção para os Jactos Costeiros.

Expresso também a minha gratidão aos meus colegas na Universidade dos Açores, como na Universidade de Lisboa. Em particular ao André Valente, Francisco Reis, Maria João Rocha, João Martins e Emanuel Dutra, obrigado pelo óptimo ambiente de trabalho, descontracção e espírito de entreajuda. Não poderia deixar de agradecer à minha família e amigos, que sempre me apoiaram nos bons e maus momentos.

Finalmente gostaria de agradecer, à Sofia Demétrio e à pequena Rita Monteiro. Agradeço por me fazerem sorrir, pelo vosso sorriso e por serem capazes de me aturar e viver comigo. Mas sobretudo quero agradecer-lhes por me fazerem acreditar que sou capaz! Obrigado...

Esta tese foi financiada no âmbito do Plano Integrado para a Ciência e Tecnologia, Eixo 3.1. – Bolsas de Apoio à Investigação Científica e Tecnológica do Programa de Apoio à Formação Avançada (FORMAC).

Resumo

Resultados de uma nova geração de modelos climáticos, forçados pelos cenários RCP8.5 e RCP4.5 de concentrações atmosféricas de gases de estufa e aerossol, estabelecidos pelo IPCC para o seu quinto relatório ainda em preparação, são utilizados para caracterizar o clima nas ilhas dos Açores e da Madeira e a sua resposta ao aquecimento global em curso. A metodologia aqui desenvolvida recorre ao novo modelo global EC-Earth, a dados da reanálise ERA-Interim e a resultados de um extenso conjunto de simulações com o modelo de investigação WRF, utilizando, pela primeira vez, uma metodologia dinâmica para a regionalização de campos globais para resoluções suficientemente finas, nas quais se representa explicitamente uma parte do efeito das ilhas e da sua complexidade topográfica. Os resultados aqui analisados sugerem aumentos da temperatura média superiores a 1 °C a meio do século XXI nos Açores e da Madeira, atingindo valores superiores a 2,5 °C no final do século, acompanhados por uma redução da precipitação anual da ordem dos 10% nos Açores mas que poderá atingir os 30% na Madeira. Estas alterações são suficientemente grandes para justificar impactos muito alargados sobre os ecossistemas insulares e sobre a população humana. Os resultados apresentados mostram a vantagem de utilização da metodologia proposta, em especial para uma representação adequada do regime de precipitação em ilhas de topografia complexa, sugerindo mesmo a necessidade de resoluções mais elevadas em trabalhos futuros.

Abstract

Results from a new generation of climate models, forced by scenarios RCP8.5 and RCP4.5 of greenhouse gases and aerosols atmospheric concentrations, established by the IPCC for its fifth report still in preparation, are used to characterize the climate of the islands Azores and Madeira and its response to the ongoing global warming. The methodology developed here uses the new global model EC-Earth, the data from the ERA-Interim reanalysis and the results of an extensive set of simulations with the WRF research model, using for the first time, a dynamic approach to the regionalization of global fields for sufficiently fine resolutions, in which it explicitly represents a part of the islands and the effect of topographical complexity. The results reviewed here suggest increases in temperature above 1 °C in the middle of the XXI century in the Azores and Madeira, reaching values higher than 2,5 °C at the end of the century, accompanied by a reduction of the annual rainfall of around 10% in the Azores but which could reach 30% in Madeira. These changes are large enough to justify much broader impacts on island ecosystems and the human population. The results show the advantage of using the proposed methodology, in particular for adequate representation of the precipitation regime in the islands of complex topography, even suggesting the need for higher resolutions in future work.

Lista de Acrónimos

3DVar	3D Variational Analysis
AMIC	Assessing the Mid-Century Climate Transition
AOGCM	Atmosphere-Ocean General Circulation Model
AR4	Fourth Assessment Report
AR5	Fifth Assessment Report
BIAS	Viés
CERFACS	Centre Européen de Recherche et Formation Avancées en Calcul Scientifique
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project Phase 5
CORR	Correlação
DJF	Dezembro-Janeiro-Fevereiro
EC-Earth	European Community Earth System Model
ECMWF	European Center for Medium Range Weather Forecast
ERA-40	ECMWF Re-Analysis 40 years
ERA-Interim	ECMWF Re-Analysis Interim
ERS-1	Earth Remote Sensing Satellite-1
ERS-2	Earth Remote Sensing Satellite-2
FAR	Fourth Assessment Report
GCM	General Circulation Model
HN	Hemisfério Norte
H-TESSEL	Hydrology-Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchange over Land
IDL	Instituto Dom Luiz da Universidade de Lisboa
IFS	Integrated Forecast System
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPMA	Instituto Português do Mar e Atmosfera
IPSL	Institute Pierre Simon Laplace
ITCZ	Intertropical Convergence Zone
JJA	Junho-Julho-Agosto
LAM	Limited Area Model
LASIE	Ligurian Air-Sea Interaction Experiment
LES	Large Eddy Simulation
LIDAR	Light Detection And Ranging
LIM	Louvain-la-Neuve Ice Model
MAE	Mean Absolute Error
MAM	Março-Abril-Maio
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
MED	Média

MOST	Monin-Obukhov Similarity Theory
NEMO	Nucleus for European Modelling of the Ocean
NSTD	Normalized Standard Deviation
OASIS	Ocean, Atmosphere, Sea Ice, Soil
OPA	Océan Parallélisé
RCP	Representative Concentration Pathways
RMSE	Root Mean Square Error
SIAM	Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures
SIAMII	Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures II
SON	Setembro-Outubro-Novembro
SRES	Special Report on Emission Scenarios
STD	Standard Deviation
TAR	Third Assessment Report
TESSEL	Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchange over Land
TGICA	Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment
ТКЕ	Turbulent Kinetic Energy
UNEP	United Nations Environment Programme
UTC	Universal Time Coordinated
WAM	Wave Model
WGI	Workgroup I
WMO	World Meteorological Organization
WRF	Weather Research and Forecasting Model

Lista de Figuras

Figura 2.01 – Alterações climáticas da temperatura à superfície observadas (linha preta)
a nível global, resultados de modelos climáticos usando 19 simulações com
forçamentos naturais (sombreado azul) e resultados de 58 simulações de
modelos climáticos usando forçamentos naturais e antropogénicos (sombreada
vermelho). A região sombreada mostra o intervalo 5% a 95% dos modelos e a
linha preta tracejada representa regiões onde a cobertura espacial é inferior a
50% (IPCC, 2007)

Figura 2.02 – As linhas representam a média dos modelos para o aquecimento global (relativamente a 1980-1999). A área sombreada representa o desvio padrão dos modelos em cada cenário. A direita as barras representam a melhor estimativa e as variações possíveis para cada cenário (IPCC, 2007).

Figura 2.03 – Evolução da temperatura máxima e mínima em Portugal Continental. A linha representa o ajuste linear às curvas calculadas com os anos de mudança das tendências de Karl *et al.*, 2000. Os valores das tendências assinalados estão em °C/década (SIAM II).

Figura 2.04 – Evolução da temperatura máxima e mínima para o Funchal na ilha da	
Madeira. A linha representa o ajuste linear às curvas calculadas com os anos de	
mudança das tendências de Karl et al., 2000. Os valores das tendências	
assinalados estão em °C/década (SIAM II)	12

Figura 4.04 – Precipitação média anual do EC-Earth (a) e anomalia da precipitação média anual em relação à ERA-Interim. Valores em mm/dia (1989 a 2010). A grelha horizontal do EC-Earth foi interpolada de forma a corresponder à grelha da ERA-Interim.
20
Figura 4.05 – Precipitação média mensal e sazonal e respectiva anomalia em relação à

ERA-Interim (1989 a 2010). Figura 4.06 – Evolução da temperatura média global e respectivas anomalias em relação à média global do período 1990 a 2010 projectado pelo EC-Earth. Figura 4.07 – Evolução da temperatura mensal e sazonal dos diferentes períodos de

4

7

11

Figura 4.08 – Evolução da precipitação média diária global e respectivas anomalias em relação à média global do período 1990 a 2010 projectado pelo EC-Earth. 22 Figura 4.09 – Evolução da precipitação diária mensal e sazonal dos diferentes períodos de estudo, e respectivas anomalias em relação à média global do período 1990 a 2010 projectado pelo EC-Earth. 23 Figura 4.10 – Anomalias do cenário RCP8.5 no fim do século em relação à média global do período 1990 a 2010 projectado pelo EC-Earth: a) temperatura média global, valores em Celsius; e b) precipitação média global, valores em mm/dia. 24 Figura 4.11 – Representação dos domínios simulados: a) Região autónoma dos Açores, a vermelho o domínio exterior, a verde, azul e ciano os domínios interiores; b) Região autónoma da Madeira, a vermelho o domínio exterior e a azul o domínio interior..... 26 Figura 4.12 – Distribuição espacial das estações meteorológicas a azul e postos udométricos a vermelho na: a) Região Autónoma dos Açores; b) Região Autónoma da Madeira. 28 Figura 4.13 – Evolução mensal da precipitação (gráfico de cima) e temperaturas máximas e mínimas (gráfico de baixo) para Angra do Heroísmo nos Açores. 31 Figura 4.14 – Evolução mensal da precipitação (gráfico de cima) e temperaturas máximas e mínimas (gráfico de baixo) para o Funchal na Madeira. 31 Figura 4.15 – Quartis de 0 a 1 com espaçamento de 0.01 da temperatura máxima diária. Nos gráficos do topo, apresentamos os resultados da reanálise e simulações WRFi 24km e WRFi 6km para os três grupos. Nos gráficos inferiores, apresentamos os resultados do modelo EC-Earth, WRFe 24km e WRFe 6km para cada grupo. 35 Figura 4.16 – Evolução mensal da temperatura máxima no grupo central. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km. 36 Figura 4.17 – Evolução mensal da temperatura máxima no grupo oriental. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km. 37 Figura 4.18 – Quartis de 0 a 1 com espaçamento de 0.01 da temperatura mínima. Nos gráficos do topo, apresentamos os resultados da reanálise e simulações WRFi 24km e WRFi 6km para os três grupos. Nos gráficos inferiores, apresentamos os resultados do modelo EC-Earth, WRFe 24km e WRFe 6km para cada grupo. 39 Figura 4.19 – Evolução mensal da temperatura mínima no grupo central. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km. 40 Figura 4.20 – Evolução mensal da temperatura mínima no grupo ocidental. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km. 41 Figura 4.21 – Evolução mensal da temperatura mínima no grupo oriental. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km. 41 Figura 4.22 – Quartis de 0 a 0,99 com espaçamento de 0.01 para a precipitação. Nos gráficos no topo apresentamos os resultados da reanálise ERA-Interim, WRFi 24km e WRFi 6km para cada grupo. Nos gráficos em baixo encontramos os resultados do modelo EC-Earth, WRFe 24km e WRFe 6km para cada grupo. 43 Figura 4.23 – Evolução mensal da precipitação no grupo central. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km. 44 Figura 4.24 – Evolução mensal da precipitação no grupo ocidental. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km. 45 Figura 4.25 – Evolução mensal da precipitação no grupo oriental. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km. 45 Figura 4.26 – Quartis de 0 a 1 com espaçamento de 0.01 para a temperatura máxima. Nos gráficos do topo, apresentamos os resultados da reanálise e simulações WRFi 24km e WRFi 6km para a Madeira e Porto Santo. Nos gráficos inferiores, apresentamos os resultados do modelo EC-Earth, WRFe 24km e WRFe 6km para as duas ilhas na região da Madeira. 47 Figura 4.27 – Evolução mensal da temperatura máxima na ilha da Madeira. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km. 48 Figura 4.28 – Quartis de 0 a 1 com espacamento de 0.01 da temperatura mínima. Nos gráficos do topo, apresentamos os resultados da reanálise e simulações WRFi 24km e WRFi 6km para a Madeira e Porto Santo. Nos gráficos inferiores, apresentamos os resultados do modelo EC-Earth, WRFe 24km e WRFe 6km para as duas ilhas na região da Madeira..... 49 Figura 4.29 – Evolução mensal da temperatura mínima na ilha da Madeira. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km. 51 Figura 4.30 – Quartis de 0 a 0,99 com espaçamento de 0.01 da precipitação. Nos gráficos do topo, apresentamos os resultados da reanálise e simulações WRFi 24km e WRFi 6km para a Madeira e Porto Santo. Nos gráficos inferiores, apresentamos os resultados do modelo EC-Earth, WRFe 24km e WRFe 6km para as duas ilhas na região da Madeira..... 52 Figura 4.31 – Evolução mensal da precipitação na ilha da Madeira. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km. 53

Figura 4.32 – Evolução mensal da precipitação na ilha de Porto Santo. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior	
resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km	54
Figura 4.33 – Histogramas da temperatura média prevista para os três grupos de ilhas	
da Região Autónoma dos Acores, nos dois cenários (linhas a azul e preto) e da	
simulação de controlo (linha a vermelho).	58
Figura 4.34 – No topo a evolução mensal das temperaturas médias previstas no grupo	
Ocidental e no gráfico inferior as anomalias mensais em relação à simulação de	
controlo	58
Eigura 4.25 - Histogramas da temperatura máxima prevista para os três grupos de ilhas	50
da Pagião Autónoma dos Acoros, nos dois conários (linhas a azul o proto) o da	
simulação de controlo (linha a vermelho)	60
Eigura 4.26 – No topo a ovolução monsal das tomporaturas máximas provistas po grupo	00
rigula 4.50 – No topo a evolução mensal das temperaturas maximas previstas no grupo	
	61
Figure 4.27 – Develot de amplitude térmice diérie pare es diferentes grupes e períodes	01
em estude. A linha em vermelhe representa a mediana, a saiva es limites entre es	
percentic 25 o 75 o a proto os percentis 1 o 00	62
Figure 4.28 A normalize de temperature máxime, mádia o máxime poro os três grupos	02
Figura 4.38 – Anomalias da temperatura maxima, media e minima para os tres grupos	
que constituem a Regiao Autonoma dos Açores: no granco superior as anomanas	62
	03
Figura 4.39 – Histogramas da temperatura minima prevista para os tres grupos de ilhas	
da Região Autonoma dos Açores, nos dois cenarios (linhas a azul e preto) e da	~ •
simulação de controlo (linha a vermelho).	64
Figura 4.40 – No topo a evolução mensal das temperaturas mínimas previstas no grupo	
oriental e no gráfico inferior as anomalias mensais em relação à simulação de	
controlo.	64
Figura 4.41 – Quartis de 0 a 0,99 com espaçamento de 0.01 da precipitação para os três	
grupos da Região Autónoma dos Açores	66
Figura 4.42 – No gráfico superior o número de dias com precipitação, e no gráfico	
inferior o número de dias com precipitação intensa para os diferentes grupos e	
ilhas da região dos Açores	67
Figura 4.43 – No topo a evolução mensal da precipitação prevista no grupo ocidental e	
no gráfico inferior as anomalias mensais em relação à simulação de controlo	67
Figura 4.44 – Histogramas da intensidade do vento prevista para os três grupos de ilhas	
da Região Autónoma dos Açores, nos dois cenários (linhas a azul e preto) e da	
simulação de controlo (linha a vermelho)	68
Figura 4.45 – No topo a evolução mensal da intensidade do vento prevista no grupo	
central e no gráfico inferior as anomalias mensais em relação à simulação de	
controlo	70

Figura 4.46 – Histogramas da humidade específica prevista para os três grupos de ilhas da Região Autónoma dos Açores, nos dois cenários (linhas a azul e preto) e da	
simulação de controlo (linha a vermelho)	70
Figura 4.47 – No topo a evolução mensal da humidade específica previstas no grupo ocidental e no gráfico inferior as anomalias mensais em relação à simulação de controlo.	72
Figura 4.48 – No topo a evolução mensal das temperaturas médias previstas na ilha da Madeira e no gráfico inferior as anomalias mensais em relação à simulação de controlo.	74
Figura 4.49 – Histogramas da temperatura máxima diária para a ilha da Madeira à esquerda e para a ilha de Porto Santo na direita. Nos gráficos superiores os dados representados são do cenário radiativos RCP4.5 e nos gráficos inferiores os dados referem-se ao cenário RCP8.5.	76
Figura 4.50 – No topo a evolução mensal das temperaturas máxima previstas na ilha e Porto Santo e no gráfico inferior as anomalias mensais em relação à simulação de controlo.	77
Figura 4.51 – Histogramas da temperatura mínima diária para a ilha da Madeira à esquerda e para a ilha de Porto Santo na direita. Nos gráficos superiores os dados representados são do cenário radiativos RCP4.5 e nos gráficos inferiores os dados referem-se ao cenário RCP8.5.	78
Figura 4.52 – No topo a evolução mensal das temperaturas mínimas previstas na ilha da Madeira e no gráfico inferior as anomalias mensais em relação à simulação de controlo.	79
Figura 4.53 – Comparação entre os percentis dos cenários e a simulação histórica para a ilha da Madeira à direita e para a ilha de Porto Santo à esquerda. Nos gráficos superiores os dados relativos ao cenário RCP4.5 e nos gráficos inferiores os dados do cenário RCP8.5. A linha a vermelho representa a recta y = x e os percentis são representados pelos pontos e espaçados de 1 em 1.	80
Figura 4.54 – Número de dias com precipitação na ilha da Madeira para a simulação de controlo e para os dois cenários radiativos, para os diferentes períodos em análise	81
Figura 4.55 – No topo a evolução mensal da precipitação diária previstas na ilha da Madeira e no gráfico inferior as anomalias mensais em relação à simulação de controlo	01
Figura 4.56 – Comparação entre os percentis dos cenários e a simulação de controlo para a ilha da Madeira à direita e para a ilha de Porto Santo à esquerda. Nos gráficos superiores os dados relativos ao cenário RCP4.5 e nos gráficos inferiores os dados do cenário RCP8.5. A linha a vermelho representa a recta y = x e os percentis são representados pelos pontos e espaçados de 1 em 1.	84

Figura 4.57 – No topo a evolução mensal da intensidade do vento previstas na ilha de Porto Santo e no gráfico inferior as anomalias mensais em relação à simulação de	
controlo	85
Figura 4.58 – No topo a evolução mensal da humidade específica previstas na ilha da Madeira e no gráfico inferior as anomalias mensais em relação à simulação de	
controlo	86
Figura 4.59 – Anomalia da temperatura média no grupo central, entre a simulação de	
controlo e o cenário RCP85 em 2080-2100. Valores em Celsius	87
Figura 4.60 – Perdas de precipitação no grupo central, entre a simulação de controlo e o	
cenário RCP85 em 2080-2100. Valores em percentagem	89
Figura 4.61 – Anomalia da temperatura média na Madeira e Porto Santo, entre a	
simulação de controlo e o cenário RCP85 em 2080-2100. Valores em Celsius	89
Figura 4.62 – Perdas de precipitação na Madeira e Porto Santo, entre a simulação de	
controlo e o cenário RCP85 em 2080-2100. Valores em percentagem	90
Figura 7.01 – Média global da altura das ondas da ERA40 (Sterl e Caires 2005)	104
Figura 7.02 – Climatologia sazonal para o período 1957-2002 da ERA40 de $u_* = f(\tau)$ em	
<i>cm/s</i> : a) DJF, b) MAM, c) JJA e d) SON.	106
Figura 7.03 – a) Médias zonais para o período 1957-2002 da ERA40 para DJF (linha a	
preto), MAM (linha a azul), JJA (linha verde), SON (linha cião) e anual (linha	
vermelha a tracejado) de $u_* = f(\tau)$; b) Média Anual de $u_* = f(\tau)$ em cm/s; c)	
Variação mensal de $u_*=f(au)$ a nível global (linha vermelha a tracejado) e para	
os diferentes Oceanos do Globo	107
Figura 7.04 – a) Scatter plot de comparação dos resultados de $u_* = f(\tau)$ com	
$u_* = f(C_D)$ valores em cm/s (linha a preto representa a recta $x = y$); e b)	
diferença global entre os campos da velocidade de fricção	108
Figura 7.05 – a) Médias zonais para o período 1957-2002 da ERA40 para DJF (linha a	
preto), MAM (linha a azul), JJA (linha verde), SON (linha cião) e anual (linha	
vermelha a tracejado) de C_D ; b) Média Anual de C_D	108
Figura 7.06 – Climatologia sazonal para o período 1957-2002 da ERA40 de u_S em cm/s :	
a) DJF, b) MAM, c) JJA e d) SON	111
Figura 7.07 – a) Médias zonais para o período 1957-2002 da ERA40 para DJF (linha a	
preto), MAM (linha a azul), JJA (linha verde), SON (linha cião) e anual (linha	
vermelha a tracejado) de $u_{ m S}$; b) Média Anual de $u_{ m S}$ em cm/s; c) Variação mensal	
de $u_{ m S}$ a nível global (linha vermelha a tracejado) e para os diferentes Oceanos do	
Globo	112
Figura 7.08 – a) Médias zonais para o período 1957-2002 da ERA40 para para DJF (linha	
a preto), MAM (linha a azul), JJA (linha verde), SON (linha cião) e anual (linha	
vermelha a tracejado) com projecção de u_s em $u_*=f(au);$ b) Climatologia anual	
do número turbulento de Langmuir para o período 1957-2002 com projecção de	
u_s em $u_* = f(\tau)$	114

Lista de Tabelas

Tabela 2.01 – Aquecimento global projectado para 2090-2099 em relação a 1980-1999	
utilizando diferentes cenários climáticos (IPCC 2007)	5
Tabela 4.01 – Os quatro RCP's (Moss et al., 2010).	16
Tabela 4.02 – Simulações efectuadas com o EC-Earth v2.3	17
Tabela 4.03 – Simulações efectuadas com o WRF v3.2.1.	27
Tabela 4.04 – Características das estações meteorológicas na Região Autónoma dos	,
Açores. As últimas 16 linhas referem-se aos postos udométricos	29
Tabela 4.05 – Características das estações meteorológicas na Região Autónoma da	
Madeira. As últimas 5 linhas referem-se aos postos udométricos	30
Tabela 4.06 – Características médias e disponibilidade de dados na Região Autónoma	
dos Açores	32
Tabela 4.07 – Características médias e disponibilidade de dados na Região Autónoma da	
Madeira.	33
Tabela 4.08 – Estatísticas diárias por grupo para a temperatura máxima nos Açores.	
(Sombreadas as simulações não sincronizadas com as observações; melhores	
resultados em bold)	35
Tabela 4.09 – Estatísticas mensais por grupo para a temperatura máxima nos Açores.	
(Sombreadas as simulações não sincronizadas com as observações; melhores	
resultados em bold).	36
Tabela 4.10 – Estatísticas diárias por grupo para a temperatura mínima nos Açores.	
(Sombreadas as simulações não sincronizadas com as observações; melhores	20
resultados em bold).	38
Tabela 4.11 – Estatisticas mensais por grupo para a temperatura minima nos Açores.	
(sombreadas as simulações não sincronizadas com as observações; meinores	10
Tabela 4.12 – Estatísticas diárias por grupo para a precipitação por Acoros (Sombroadas	40
rabela 4.12 – Estatísticas ularias por grupo para a precipitação nos Açõres. (Sombreadas	
bold)	42
Tabela 4.13 – Estatísticas mensais por grupo para a precipitação nos Acores	
(Sombreadas as simulações não sincronizadas com as observações: melhores	i
resultados em bold).	44
Tabela 4.14 – Estatísticas diárias para a temperatura máxima na Região Autónoma da	
Madeira. (Sombreadas as simulações não sincronizadas com as observações;	
melhores resultados em bold)	46
Tabela 4.15 – Estatísticas mensais para a temperatura máxima na Região Autónoma da	
Madeira. (Sombreadas as simulações não sincronizadas com as observações;	
melhores resultados em bold)	48

Tabela 4.16 – Estatísticas diárias para a temperatura mínima na Região Autónoma da	
Madeira. (Sombreadas as simulações não sincronizadas com as observações;	
melhores resultados em bold)	49
Tabela 4.17 – Estatísticas mensais para a temperatura mínima na Região Autónoma da	
Madeira. (Sombreadas as simulações não sincronizadas com as observações;	
melhores resultados em bold)	50
Tabela 4.18 – Estatísticas diárias para a precipitação na Região Autónoma da Madeira.	
(Sombreadas as simulações não sincronizadas com as observações; melhores	
resultados em bold).	51
Tabela 4.19 – Estatísticas mensais para a precipitação na Região Autónoma da Madeira.	
(Sombreadas as simulações não sincronizadas com as observações; melhores	
resultados em bold)	53
Tabela 4.20 – Estatísticas básicas da temperatura média diária prevista pelas simulações	
de controlo e do cenário RCP8.5	57
Tabela 4.21 – Percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99 previstos pelas simulações de	!
controlo e do cenário RCP8.5.	57
Tabela 4.22 – Estatísticas básicas da temperatura máxima diária previstas pelas	i
simulações de controlo e do cenário RCP8.5.	59
Tabela 4.23 – Percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99 previstos pelas simulações de	!
controlo e do cenário RCP8.5	60
Tabela 4.24 – Estatísticas básicas da temperatura mínima diária prevista pelas	;
simulações de controlo e do cenário RCP8.5.	62
Tabela 4.25 – Percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99 previstos pelas simulações de	!
controlo e do cenário RCP8.5	63
Tabela 4.26 – Estatísticas básicas da precipitação diária prevista pelas simulações de	
controlo e do cenário RCP8.5	65
Tabela 4.27 – Percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99 previstos pelas simulações de	!
controlo e do cenário RCP8.5	65
Tabela 4.28 – Estatísticas básicas da intensidade do vento previsto pelas simulações de	!
controlo e do cenário RCP8.5	69
Tabela 4.29 – Percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99 previstos pelas simulações de	:
controlo e do cenário RCP8.5	69
Tabela 4.30 – Estatísticas básicas da humidade específica prevista pelas simulações de	!
controlo e do cenário RCP8.5	71
Tabela 4.31 – Percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99 previstos pelas simulações de	!
controlo e do cenário RCP8.5	71
Tabela 4.32 – Estatísticas básicas e percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99, da	
temperatura média diária prevista pelas simulações de controlo e dos cenários	į
RCP4.5 e RCP8.5	73

Tabela 4.33 – Estatísticas básicas e percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99, da	
temperatura máxima diária prevista pelas simulações de controlo e dos cenários	
RCP4.5 e RCP8.5.	75
Tabela 4.34 - Estatísticas básicas e percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99, da	
temperatura mínima diária prevista pelas simulações de controlo e dos cenários	
RCP4.5 e RCP8.5	77
Tabela 4.35 – Estatísticas básicas e percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99, da	
precipitação diária prevista pelas simulações de controlo e dos cenários RCP4.5 e	
RCP8.5	81
Tabela 4.36 – Estatísticas básicas e percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99, da	
intensidade do vento diário prevista pelas simulações de controlo e dos cenários	
RCP4.5 e RCP8.5.	83
Tabela 4.37 – Estatísticas básicas e percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99, da	
humidade específica diária prevista pelas simulações de controlo e dos cenários	
RCP4.5 e RCP8.5.	86
Tabela 4.38 – Quadro resumo, para a Região Autónoma dos Açores, dos resultados	
obtidos nas simulações de controlo e do cenário RCP8.5.	88
Tabela 4.39 – Quadro resumo, para a Região Autónoma da Madeira, dos resultados	
obtidos nas simulações de controlo e dos cenários RCP4.5 e RCP8.5.	90

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Lista de Acrónimos	iv
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	xiii
Índice	xvi
1. Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Descrição da tese	2
2. Alterações Climáticas	3
2.1. Introdução	3
2.2. Modelos Climáticos	5
2.3. Cenários Climáticos	6
2.4. Regionalização	8
2.5. Projecção Climática para Portugal	10
3. Descrição dos Modelos	13
3.1. Introdução	13
3.2. EC-Earth	13
3.3. WRF	15
4. Regionalização de Cenários Climáticos	16
4.1. Introdução	16
4.2. Avaliação do Modelo Global	17
4.2.1. Clima Global Presente	17
4.2.2. Clima Global Futuro	22
4.3. Regionalização para as Regiões Autónomas dos Açores e Madeira	24
4.3.1 Regiões de Estudo	24
4.3.1.1 Região Autónoma dos Açores	24
4.3.1.2 Região Autónoma da Madeira	25
4.3.2 Descrição das Simulações	26
4.3.3 Dados Observacionais	28
4.3.4. Avaliação do Clima Presente	33
4.3.4.1. Região Autónoma dos Açores	34
4.3.4.1.1. Temperatura Máxima	34
4.3.4.1.2. Temperatura Mínima	38
4.3.4.1.3. Precipitação	42

4.3.4.2. Região Autónoma do Madeira	46
4.3.4.2.1. Temperatura Máxima	46
4.3.4.2.2. Temperatura Mínima	48
4.3.4.2.3. Precipitação	51
4.3.4.3. Apreciação global	54
4.3.5. Avaliação do Clima Futuro	55
4.3.5.1. Introdução	55
4.3.5.2. Região Autónoma dos Açores	56
4.3.5.2.1. Temperatura Média	56
4.3.5.2.2. Temperatura Máxima	59
4.3.5.2.3. Temperatura Mínima	61
4.3.5.2.4. Precipitação	64
4.3.5.2.5. Vento	68
4.3.5.2.6. Humidade Específica	70
4.3.5.3. Região Autónoma da Madeira	72
4.3.5.3.1. Temperatura Média	72
4.3.5.3.2. Temperatura Máxima	74
4.3.5.3.3. Temperatura Mínima	77
4.3.5.3.4. Precipitação	80
4.3.5.3.5. Vento	83
4.3.5.3.6. Humidade Específica	85
4.3.5.4. Apreciação Global	87
5. Conclusões	92
6. Referências	96
7. Anexo – Climatologia da Circulação de Langmuir	102
7.1. Motivação	102
7.2 Introdução	103
7.3. Velocidade de Fricção Atmosférica, u_{*}	105
7.3.1 Introdução	105
7.3.2. Climatologia	106
7.4. Deriva de Stokes	109
7.4.1 Introdução	109
7.4.2. Climatologia	111
7.5 Número Turbulento de Langmuir	113
7.5.1. Introdução	113
7.5.2. Climatologia	113

1. Introdução

1.1. Motivação

As alterações climáticas devido à acção Humana constituem um dos maiores desafios do próximo século. Nas últimas décadas, o interesse por este tema mereceu uma crescente atenção, devido especialmente ao aumento das concentrações de gases com efeito de estufa, à acumulação de evidências observacionais de uma tendência de subida da temperatura média do planeta e também de resultados de simulações numéricas, com modelos de circulação global independentes, indicando que os impactos potenciais das alterações podem ser elevados durante o próximo século.

Devido à sua alta vulnerabilidade e baixa capacidade de adaptação, os sistemas insulares são potencialmente muito sensíveis às alterações climáticas, constituindo regiões onde o estudo de medidas de adaptação merece interesse prioritário. De facto, apesar de as ilhas serem responsáveis por uma ínfima parte da libertação de gases com efeito de estufa, muitas já começaram a desviar recursos do desenvolvimento económico e a aplicá-los em medidas de adaptação si potenciais alterações climáticas que as poderão afectar (Nurse e Moore, 2005).

As alterações climáticas poderão desencadear nas ilhas uma série de impactos adversos, tais como perdas de terra nas regiões costeiras, erosão acelerada, secas e inundações mais frequentes, redução na quantidade e qualidade dos recursos hídricos, redução da produção agrícola devido a variações na precipitação, deslocamento de pessoas e infra-estruturas para o interior das ilhas e aumento da incidência de doenças como o dengue e a malária durante a estação quente. O turismo também pode ser afectado devido à perda de costa e devido a possíveis perdas de atracções ecológicas como recifes de corais.

Uma vez que os actuais modelos climáticos não têm resolução horizontal suficientemente fina para simular as ilhas, as projecções que actualmente existem referem-se às superfícies oceânicas próximas, com propriedades termodinâmicas muito diferentes de pontos de terra, existindo muito poucos estudos de regionalização das projecções para ilhas individuais (IPCC AR4, WG1, 2007). No entanto, o progresso já realizado na produção de cenários à escala global, razoavelmente validado em simulações da evolução climática recente, e os progressos igualmente importantes no desenvolvimento de modelos de área limitada para fins de previsão meteorológica, permitem a construção de cenários regionais em resoluções nas quais as ilhas são explicitamente representadas.

O projecto Assessing the Mid-Century Climate Transition (AMIC), no qual parte deste trabalho está inserido, integra os membros portugueses do consórcio europeu EC-Earth. O AMIC teve como objectivo contribuir para o quinto relatório do IPCC, fazendo uma simulação global que será um dos membros do próximo relatório do IPCC. Além de contribuir para o AR5, o projecto está a contribuir para a discussão das alterações climáticas em Portugal, produzindo um conjunto de simulações regionais de alta resolução para a Península Ibérica (Soares *et al.*, 2012) e para as Regiões Autónomas dos Açores e da Madeira. Neste trabalho, pretendemos estudar as possíveis

alterações climáticas que poderão vir a ocorrer nas Regiões Autónomas, e apesar da análise apresentada se focar exclusivamente em variáveis meteorológicos, os resultados podem contribuir para a adaptação destas regiões às alterações climáticas.

1.2. Descrição da Tese

A tese está organizada da seguinte forma. No capítulo 2 introduzimos a metodologia de análise e descrevemos as projecções climáticas pré-existentes para Portugal Continental e Regiões Insulares. No capítulo 3 apresentamos, os modelos utilizados durante esta dissertação. Apresentamos no capítulo 4, a avaliação do modelo global EC-Earth. Após esta avaliação, apresentamos as duas regiões aqui estudadas, e de seguida descrevemos as simulações numéricas regionais realizadas. Após a descrição dos dados observacionais usados para validação dos resultados das simulações histórica e de controlo, efectuamos uma avaliação dos resultados do modelo regional para o clima presente. Após esta avaliação do desempenho do modelo regional para o clima presente, procedemos a avaliação dos cenários projectados para clima futuro para os períodos 2040-2060 e 2080-2100, para as Regiões Autónomas dos Açores e da Madeira. No capítulo 5, apresentam-se as principais conclusões desta tese. Em anexo presentamos uma climatologia para o número turbulento de Langmuir, após apresentação de climatologias para a velocidade de fricção atmosférica e para a deriva de Stokes, descrevendo resultados preliminares sobre uma possível melhoria da representação da mistura vertical no oceano, respondendo a problemas detectados na análise de desempenho do EC-Earth.

2. Alterações Climáticas

2.1 Introdução

Desde a década de 1980, as evidências científicas sobre a possibilidade das alterações do clima à escala global despertam o interesse público e da comunidade científica. Em 1988, a Organização Mundial de Meteorologia (WMO) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) estabeleceram o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), quando a Assembleia Geral das Nações Unidas debateu o tópico *clima* pela primeira vez. O IPCC ficou encarregue de apoiar, com trabalhos científicos, as avaliações do clima e os cenários climáticos futuros.

O IPCC no seu Quarto Relatório de Avaliação (AR4) sobre Alterações Climáticas concluiu que o aumento da temperatura média global durante o século XX esta muito provavelmente ligado ao aumento observado das concentrações de gases de efeito estufa resultantes das actividades antropogénicas (IPCC, 2007). O aquecimento global é hoje evidente a partir das observações existentes do aumento da temperatura do ar e do oceano, derretimento generalizado da neve e gelo e da elevação do nível do mar.

As alterações climáticas afectam profundamente o meio ambiente e social. Por exemplo, alterações no clima sazonal ou interanual podem afectar fortemente a produção agrícola, a quantidade e qualidade dos recursos hídricos, e os recursos provenientes de ecossistemas terrestres e marinhos. O IPCC indica vários impactos importantes em diversos sectores que estão correlacionados com as alterações climáticas, tais como recursos hídricos e a sua gestão, ecossistemas, alimentos, produtos florestais, sistemas costeiros e áreas costeiras, indústria e saúde.

Os decisores e gestores de recursos requerem informações sobre futuras mudanças na média e variabilidade climática para melhor antecipar potenciais impactos das alterações climáticas. No entanto, os padrões climáticos futuros são difíceis de prever (Goodess, 2000). Em particular, é complicado quantificar o forçamento radiativo futuro devido à presença de gases de efeito estufa na atmosfera, uma vez que as emissões futuras dos gases referidos dependem de diversos factores e expectativas, como o crescimento da população, o uso de combustíveis fósseis como fonte de energia, desenvolvimento tecnológico e desenvolvimento económico (IPCC-TGICA, 2007). Por esta razão, têm sido desenvolvidos cenários climáticos de forma a investigar as possíveis consequências das alterações climáticas.

No último relatório do IPPC os dados observacionais apresentam uma tendência de aquecimento de 0,74 °C ± 0,18 °C entre 1906-2005. Este valor é superior à estimativa do Terceiro Relatório de Avaliação (TAR) de 0,60 °C ± 0,20 °C para o período 1901-2000, sendo esta diferença explicado com o facto de onze dos últimos doze anos encontrarem-se entre os anos mais quentes de que há registo. A tendência de aquecimento ao longo dos últimos 50 anos (1956-2005) é praticamente o dobro 0,13 °C/década ± 0,03 °C/década da tendência de aquecimento ao longo dos últimos 100 anos (IPCC, 2007). Os modelos climáticos usados no AR4 do IPCC projectam para

os próximos 100 anos, no cenário mais pessimista, um aumento de temperatura média global entre 2,4 °C a 6,4 °C (Tabela 2.01).

O aumento de temperatura é global e é mais sentido nas latitudes elevadas do hemisfério norte. As temperaturas médias do Árctico aumentaram duas vezes mais que a média global nos últimos 100 anos e as regiões terrestres aquecem mais rapidamente que os oceanos (Figura 2.01). As observações mostram que a temperatura global do oceano aumentou até profundidades de 3000 metros. Dados de satélite e observações de balões na média e baixa troposfera revelam taxas de aquecimento em altitude similares às observadas na superfície (IPCC FAR WGI, 2007).



Figura 2.01 – Alterações climáticas da temperatura à superfície observadas (linha preta) a nível global, resultados de modelos climáticos usando 19 simulações com forçamentos naturais (sombreado azul) e resultados de 58 simulações de modelos climáticos usando forçamentos naturais e antropogénicos (sombreada vermelho). A região sombreada mostra o intervalo 5% a 95% dos modelos e a linha preta tracejada representa regiões onde a cobertura espacial é inferior a 50% (IPCC, 2007).

O aumento do nível médio do mar é consistente com o aquecimento observado e apresenta uma tendência positiva de 1,8 mm/década ± 0,5 mm/década por ano durante 1961-2003 e a uma tendência positiva de 3,1 mm/década ± 0,7 mm/década por ano a de 1993 a 2003. Desde 1993, a expansão térmica dos oceanos contribui em cerca de 57% para o aumento do nível

do mar, a diminuição das calotes polares e glaciares é responsável pelo restante (IPCC FAR WGI, 2007).

Cenário	Melhor Estimativa	Variação Possível
Concentrações Constantes (2000)	0,6 °C	0,3 a 0,9 ℃
B1	1,8 °C	1,1 a 2,9 °C
A1T	2,4 °C	1,4 a 3,8 °C
B2	2,8 °C	1,4 a 3,8 ℃
A1B	2,8 °C	1,7 a 4,4 °C
A2	3,4 °C	2,0 a 5,4 °C
A1FI	4,0 °C	2,4 a 6,4 °C

Tabela 2.01 – Aquecimento global projectado para 2090-2099 em relação a 1980-1999 utilizando diferentes cenários climáticos (IPCC 2007).

O recuo observado da neve e gelo, também são consistentes com o aquecimento. Dados de satélite revelam que a extensão de gelo no mar Árctico recuou 2,7 %/década ± 0,6 %/década, existindo recuos mais significativos durante o Verão 7,4 %/década ± 2,4 %/década. Os glaciares e a cobertura de neve têm diminuído em ambos os hemisférios. A área média de solo congelado diminui em cerca de 7% no Hemisfério Norte (HN) desde 1900, com decréscimos na primavera que atingem os 15%. A temperatura da camada de gelo permanente no Árctico aumentou em cerca de 3 °C desde de 1980 (IPCC, 2007).

2.2 Modelos Climáticos

Embora os resultados apresentados anteriormente tenham por base dados observacionais, para estudarmos o futuro do sistema climático temos que recorrer a modelos físicos. O comportamento do sistema climático, das suas componentes e interacções, podem ser estudados recorrendo a modelos climáticos. Este modelos podem ser modelos globais atmosféricos (GCM) ou modelos acoplados Oceano-Atmosfera (AOGCM). Os modelos climáticos constituem actualmente a melhor forma de simular cenários de mudança climática. Estes modelos numéricos oferecem uma visão tridimensional do sistema climático, descrevendo os principais processos físicos, assim como as interacções entre as diferentes componentes do sistema climático e os mecanismos de retroalimentação, resolvendo um conjunto de equações que representam estes processos físicos. As equações são discretizadas no espaço e no tempo, em redes que cobrem todo o globo, com resoluções horizontais da ordem de centenas de quilómetros, e são integradas com passos de tempo da ordem dos 60 minutos. Os processos que ocorrem em escalas menores do que o espaçamento da malha têm de ser parametrizados.

Com o desenvolvimento de sistemas computacionais com maior capacidade de cálculo e com a implementação de modelos acoplados cada vez mais sofisticados, é possível reproduzir com uma precisão crescente os padrões de larga escala das distribuições sazonais dos campos climáticos. Actualmente existem diversos modelos climáticos capazes de reproduzir satisfatoriamente as principais características do clima passado (como se pode verificar na Figura 2.01), quando se tem em consideração as concentrações observadas de gases com efeito estufa e aerossóis.

Uma parte da incerteza inerente à simulação climática é traduzida pela diferença entre resultados de diferentes modelos. Uma forma simplificada de caracterizar um modelo climático consiste no cálculo da sua "sensibilidade", definida como a alteração de temperatura média em resposta à duplicação da concentração de CO₂ atmosférico. Por outro lado, a sensibilidade dos modelos pode ser aferida a partir dos resultados de simulações do clima recente, onde se encontram mudanças de temperatura de 0,15 °C a 0,3 °C por década entre 1990 e 2005. Este valor pode ser comparado com o registo observacional existente que sugere um aquecimento de 0,2 °C por década, o que reforça a confiança existente nos modelos actuais (IPCC FAR WGI, 2007).

2.3. Cenários Climáticos

Dadas as insuficiências dos modelos climáticos, e a incerteza associada aos cenários socioeconómicos e tecnológicos futuros, existem limites à nossa capacidade de prever o efeito das atividades humanas no clima. Assim, o estudo da mudança climática baseia-se na análise da evolução climática em cenários selecionados e não assume um caráter de previsão comparável à previsão do tempo na escala diária.

No quadro de um cenário de evolução da composição atmosférica, os modelos climáticos permitem obter estimativas do impacto das alterações climáticas futuras e, no seu conjunto, ajudar aa estimar potenciais incertezas para diferentes cenários. Um cenário climático refere-se a um clima futuro plausível que foi construído de forma a ser utilizado na investigação das potenciais consequências antropogénicas nas alterações do clima. Estes cenários devem representar condições futuras que traduzam as alterações climáticos apresentados no AR4 do IPCC (designados por SRES) foram criados a partir de estimativas de possíveis futuros, e agrupam-se em quatro categorias base (Nakicenovic *et al.*, 2000):

- Cenário A1: Descreve um mundo em rápido crescimento económico, onde a população mundial atinge um pico em meados do século XXI. Dentro deste cenário desenvolvem-se rumos alternativos dependendo da evolução tecnológica dos sistemas energéticos. O rumo A1F1 descreve um mundo que recorre a combustíveis fósseis intensamente, o rumo A1T descreve um mundo que utiliza combustíveis não fósseis, e o rumo A1B descreve um mundo que utiliza um balanço entre os dois tipos de combustíveis.
- Cenário A2: Descreve um mundo heterogéneo. A população mundial aumenta continuamente e o desenvolvimento económico *per capita* depende da região.

- Cenário B1: Descreve um mundo convergente onde a população mundial atinge um pico em meados do século XXI e entra depois em declínio, similar ao cenário A1, mas ao contrário do cenário A1 neste cenário as alterações económicas procuram a redução da utilização de combustíveis fósseis e a introdução de serviços com recurso a tecnologias limpas.
- Cenário B2: Descreve um mundo com enfase em soluções locais para a sustentabilidade económica e ambiental. O aumento da população mundial apresenta uma taxa mais baixa que o cenário A2 e níveis intermédios de desenvolvimento. Este cenário está orientado para a protecção ambiental no entanto essa protecção é feita a nível local e regional.

As estimativas para os diferentes cenários de aquecimento global para o fim do século XXI estão apresentadas na Tabela 2.01 e na Figura 2.02. Os resultados indicam que mesmo no cenário B1 (o mais optimista) a melhor estimativa para o aquecimento global é de 1,8 °C (variações possíveis entre 1,1 °C e 2,9 °C) e que no cenário A1FI (o mais pessimista) a melhor estimativa é de 4,0 °C (variações possíveis entre 2,4 °C e 6,4 °C). Estas novas estimativas do AR4 utilizam um conjunto de dados de modelos climáticos de maior complexidade e realismo quando comparada com o anterior relatório.



Figura 2.02 – As linhas representam a média dos modelos para o aquecimento global (relativamente a 1980-1999). A área sombreada representa o desvio padrão dos modelos em cada cenário. A direita as barras representam a melhor estimativa e as variações possíveis para cada cenário (IPCC, 2007).

Tendo em conta a grande variedade de possíveis futuros é necessário quantificar a incerteza dos resultados. Técnicas de *ensemble* (técnica que utiliza simulações paralelas para projecções climáticas que permite através da variabilidade de resultados dos seus membros quantificar a incerteza associada as projecções climáticas) envolvendo múltiplos modelos, podem ser usadas para quantificar essas incertezas. Em geral, a fonte de incertezas dos cenários climáticos são múltiplas. O sistema climático é demasiado complexo para ser representado com exactidão num modelo climático, e cada modelo contém um número de pressupostos e parametrizações que cada grupo de modelação resolve de maneira diferente. Existem ainda incertezas chave nas projecções futuras que levam a diferentes resultados:

- A incerteza existente nas emissões de aerossóis e gases com efeito estufa, actividades vulcânicas e solar que afectam o forçamento radiactivo do sistema climático;
- Incerteza na inclusão dos efeitos directos do aumento da concentração de CO₂ na atmosfera sobre a cobertura vegetal e o comportamento destas no futuro;
- Incertezas na sensibilidade do clima futuro e nos padrões regionais das projecções simulado pelos diferentes modelos. Cada modelo global representa os processos físicos e os feedbacks atmosféricos de diferentes formas. Estas diferenças levam a diferenças globais e regionais de algumas variáveis meteorológicas com a temperatura e precipitação.

Uma fonte adicional de incerteza está ligada à variabilidade natural do sistema climático. Parte desta variabilidade é consequência de perturbações internas do sistema climático (não dependentes de gases com efeito estufa), e a outra associada à poluição atmosférica e à libertação de gases com efeito estufa devido ao desenvolvimento industrial.

2.4. Regionalização

Os modelos climáticos globais podem oferecer informações sobre alterações do clima de grande utilidade para escalas continentais. No entanto, estes modelos não podem representar com precisão mudanças do clima à escala local como por exemplo precipitação devida a efeitos orográficos. A maior parte dos estudos de impacto ambiental das alterações climáticas requer informação de parâmetros meteorológicos com elevada resolução espacial e temporal, que são totalmente incompatíveis com as baixas resoluções fornecidas pelos modelos climáticos. Durante as últimas décadas foram desenvolvidos diferentes técnicas para mitigar as baixas resoluções espaciais e temporais fornecidas pelos modelos climáticos. Estas metodologias são conhecidas na comunidade científica por técnicas de regionalização e podem ser divididas em três grandes classes: interpolação simples, métodos estatísticos e métodos dinâmicos.

O método mais simples de regionalização é a interpolação simples dos campos simulados pelos modelos acoplados para o local ou região de interesse, usando para isso os pontos de grelha mais próximos e adicionar esta interpolação a um campo base observado (Neilson, 1998). A informação proveniente deste método pode ser muito semelhante aos padrões fornecidos pelos AOGCM se não se considerar dados adicionais, como a elevação do terreno, e portanto os resultados obtidos com este método podem ser enganadores. No entanto, devido à sua extrema simplicidade, este é um método amplamente aplicado no desenvolvimento de cenários (Houghton *et al.*, 2001).

A regionalização estatística envolve geralmente duas fases. Na primeira fase implica a determinação de relações estatísticas entre variáveis climáticas locais (por exemplo, temperatura do ar à superfície) e preditores de larga escala. Numa segunda fase aplica-se a relação estatística anteriormente determinada às saídas fornecidas pelos AOGCM, a fim de simular características climáticas locais, assumindo-se que a relação estatística permanece num clima futuro. Os métodos de downscaling estatístico podem ser abordados através de técnicas de regressão (Hewitson e Crane, 1996; Von Storch et al., 1993), correlação com os padrões climáticos regionais usando métodos estatísticos como transformadas de Fourier (Denis et al., 2002), ou geradores de tempo estocásticos (Wilks, 1992). Este tipo de método tem a vantagem de exigir pouco cálculo quando comparado com o método dinâmico, o que permite a sua aplicação rápida à saída de vários AOGCM. No entanto, este método não representa um processo físico e parte do pressuposto que a relação encontrada continua a ser válida no clima futuro. Além disso, o desenvolvimento de um método estatístico robusto requer uma extensa disponibilidade de dados observados. Em contraste com os métodos de interpolação simples, este método permite produzir alterações climáticas locais diferentes das estimativas do AOGCM (Houghton et al., 2001).

A regionalização dinâmica é baseada na utilização de modelos regionais de maior resolução espacial utilizados na área de interesse de forma a obter cenários climáticos de alta resolução. Este tipo de regionalização pode ser baseado em três tipos de abordagens (IPCC-TGICA, 2007): i) Utilizando uma simulação AOGCM completa usando uma maior resolução espacial e temporal só nos subperíodos de interesse, permanecendo o resto da simulação em baixa resolução espacial e temporal (Cubasch et al., 1996); ii) Utilizando uma simulação AOGCM completa com mais alta resolução sobre a área de interesse (Gibelin e Déqué, 2003); iii) Utilizando modelos de área limitada (LAM) de alta resolução utilizando forçamentos climáticos nas suas fronteiras provenientes dos AOGCM (Giorgi, 1990). Todos estes modelos dinâmicos de alta resolução baseiam-se nos mesmos sistemas de equações físicos utilizados nos AOGCM e são considerados como o melhor método para capturar o complexo sistema atmosférico (Price e Flanningan, 2000). Este método tem resoluções horizontais típicas de 20-50 km e 100 m de resolução vertical. Estas altas resoluções permitem aos modelos representar efeitos que os AOGCM não conseguem capturar como é o caso da precipitação de origem topográfica mas requerem uma grande capacidade computacional o que limita o número de cenários que podem ser simulados (Goodess, 2000).

Do mesmo modo que os métodos estatísticos dependem da precisão dos padrões climáticos produzidos pelos AOGCM, os LAM também dependem desta precisão nas suas fronteiras. No entanto, devido à sua alta resolução, os LAM representam melhor os processos físicos importantes e podem melhorar o realismo da circulação regional simulado. As duas primeiras abordagens do método dinâmico utilizam o próprio GCM sendo assim independentes das saídas do mesmo. Estas experiências são menos usadas uma vez que a sua resolução ainda é demasiado grosseira para diversos estudos de impacto, e a variabilidade temporal também é pobremente representada (Carter e La Rovere 2001).

As vantagens relativas das diferentes metodologias de regionalização têm sido objecto de discussão (Murphy, 1999; Gibelin e Déqué, 2003), parecendo existir vantagem na utilização de modelos regionais ou globais com resolução aumentada em relação às técnicas estatísticas, visto que estas assentam no pressuposto de que as relações estatísticas que ocorrem no clima presente se manterão inalteradas no clima futuro, mesmo com forçamentos diferentes dos que ocorrem no presente, o que pode ser fisicamente inconsistente.

2.5. Projecção Climática para Portugal

Em 2002 foi publicado o primeiro estudo sobre a evolução do clima em Portugal Continental no século XXI (Miranda *et al.*, 2002). O projecto *Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures* (SIAM) teve como objectivo realizar a primeira avaliação dos impactos e medidas de adaptação às alterações climática. Após a conclusão deste projecto, iniciou-se um novo estudo (SIAM II, Miranda *et al.*, 2006) que foi alargado às Regiões Autónomas da Madeira e Açores.

Em Portugal Continental a temperatura média do ar apresentou uma tendência crescente desde a década de 1970. As observações disponíveis mostram que o clima sofreu, durante o século XX, dois períodos de aquecimento (1910 a 1945 e 1976 a 2000) intercalados por um período de arrefecimento (Figura 2.03). A temperatura média apresentou em todas as regiões um aquecimento de 0,5 °C/década desde 1970, sendo que a temperatura mínima diária aumentou mais que a temperatura máxima (havendo um decréscimo da amplitude térmica diária).

Os dados observacionais da precipitação revelam uma tendência decrescente fraca, que se torna mais evidente após 1976, existindo uma redução significativa da precipitação durante a Primavera e uma redução da estação chuvosa. Os dados tanto revelam um aumento da tendência de números de dia de seca consecutivos, como a ocorrência de cheias. Também é de salientar que a tendência de secas, em particular nas regiões sul tem aumentado.

Na Região Autónoma dos Açores o estudo focou-se nas ilhas de São Miguel e da Terceira. Na estação da Nordela na Ponta Delgada registou-se um aquecimento após 1975 de 0,37 °C/década para a temperatura máxima e de 0,63 °C/década para a temperatura mínima. Na ilha Terceira também foi identificado um aquecimento significativo após 1975 com valores de 0,46 °C/década para a temperatura máxima e de 0,36 °C/década para a temperatura mínima. A precipitação na ilha de São Miguel apresentou uma tendência positiva de +6,1 mm/década. Apesar da tendência positiva analisada durante o período 1941-1970 e 1971-2000, verificamos que existe uma tendência negativa ao longo dos últimos 100 anos, havendo um decréscimo da precipitação durante os três primeiros meses no ano e um acréscimo nos meses de Agosto, Setembro e Dezembro. Na ilha Terceira os dados revelam que existe um decréscimo da precipitação acumulada, de 1968 a 1993, com uma tendência de -52 mm/década.



Figura 2.03 – Evolução da temperatura máxima e mínima em Portugal Continental. A linha representa o ajuste linear às curvas calculadas com os anos de mudança das tendências de Karl *et al.*, 2000. Os valores das tendências assinalados estão em °C/década (SIAM II).

Na Região Autónoma da Madeira, também foram identificados aquecimentos significativos após 1975, apresentando valores de 0,51 °C/década para a temperatura máxima e de 0,72 °C/década para a temperatura mínima (Figura 2.04). A precipitação no Funchal e em Porto Santo não apresentam uma tendência significativa.

As projecções feitas para o clima futuro disponíveis no projecto SIAM II, basearam-se em cenários de emissões obtidos a partir de diversos modelos de clima. Em Portugal, os modelos globais projectam aumentos de temperatura e alterações significativas da precipitação. Para Portugal Continental são estimados aumentos da temperatura máxima de 3 °C na região costeira e de 7 °C para o interior do país. Nas regiões insulares os aumentos de temperatura foram estimados como mais moderados, entre 2 °C e 3 °C para a Madeira, e entre 1 °C a 2 °C para os Açores. Em relação à precipitação, a incerteza do clima futuro é certamente maior. Todos os modelos disponíveis em 2001 apontavam para uma redução da precipitação em Portugal

Continental durante a Primavera, Verão e Outono, atingindo valores entre 20% a 40%, sendo mais pronunciada na região Sul. Para as Regiões Autónomas as estimativas eram diferentes, verificando-se que na Madeira existiria e uma importante redução da precipitação de Inverno, sendo mais ligeiro na Primavera e Outono e havendo um ligeiro aumento durante o Verão. Em termos gerais, a redução da precipitação na Madeira poderia atingir os 20% a 30%. Na Região Autónoma dos Açores o cenário obtido foi diferente não prevendo redução da precipitação anual, mas um aumento da precipitação durante o Inverno, compensada por reduções nas restantes estações.



Figura 2.04 – Evolução da temperatura máxima e mínima para o Funchal na ilha da Madeira. A linha representa o ajuste linear às curvas calculadas com os anos de mudança das tendências de Karl *et al.*, 2000. Os valores das tendências assinalados estão em °C/década (SIAM II).

3. Descrição dos Modelos

3.1. Introdução

Os modelos numéricos constituem a ferramenta preferencial dos estudos de mudança climática, sendo clara uma tendência para a sua utilização em resoluções horizontais e verticais cada vez mais altas e para um aumento do realismo da física simulada. À escala global, os novos modelos climáticos simulam explicitamente a interacção atmosfera-oceano na forma de modelos acoplados, o que constituiu um dos saltos mais significativos na modelação climática das últimas décadas. À escala regional, no entanto, a maior parte dos estudos publicados recorrem ainda a modelos atmosféricos acoplados a modelos de superfície, sendo o oceano interpolado a partir de uma simulação global.

Neste trabalho utilizaram-se fundamentalmente dois modelos numéricos. O modelo global *European Community Earth System Model* (EC-Earth), versão 2.3, foi utilizado no estudo das alterações climáticas em Portugal Continental e nas Regiões Autónomas dos Açores e Madeira, constituindo os resultados das suas simulações a condição fronteira para os estudos regionais em maior resolução. O *Weather Research and Forecasting Model* (WRF), versão 3.2.1, foi utilizado para fazer a regionalização dinâmica das simulações EC-Earth para as ilhas atlânticas portuguesas.

3.2. EC-Earth

O EC-Earth é um modelo climático recente, desenvolvido por um consórcio que reúne diversos serviços meteorológicos e universidades europeias. Neste consórcio Portugal está representado pelo Instituto Português do Mar e Atmosfera (IPMA) e pelo Instituto Dom Luiz da Universidade de Lisboa (IDL). A componente atmosférica do modelo é baseado no *Integrated Forecast System* (IFS; ECMWF, 2006) do *European Center for Medium Range Weather Forecast* (ECMWF), enquanto o oceano é representado pelo *Nucleus for European Modelling of the Ocean* (NEMO; Madec, 2008) que é desenvolvido no *Institute Pierre Simon Laplace* (IPSL). Nas simulações aqui apresentadas, ambos os modelos utilizam uma grelha horizontal de aproximadamente um grau e as componentes são acopladas através do *Ocean, Atmosphere, Sea Ice, Soil* (OASIS), desenvolvido no *Centre Européen de Recherche et Formation Avancées en Calcul Scientifique* (CERFACS; Valcke, 2006).

A componente atmosférica do modelo foi avaliada em Hazeleger *et al.* (2012), mostrandose que este consegue capturar com realismo as características de larga escala da atmosfera e quando comparado com modelos de igual complexidade o modelo apresenta um viés da mesma amplitude. Os maiores erros do modelo encontram-se nas variáveis de superfície, em média apresentando um viés negativo na temperatura. Em Sterl *et al.* (2012), a avaliação da componente oceânica mostra que as características médias do oceano são bem modeladas. A superfície é de modo geral fria, sendo o viés negativo na faixa 40 °N e 40 °S e positivo fora desta faixa. Também se verifica um viés positivo da temperatura da superfície do oceano nas zonas de afloramento costeiro. A performance do modelo na componente oceânica é similar a outros modelos de igual complexidade. De forma a incluir o modelo no projecto *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5), este foi melhorado de forma a incluir diferentes casos de concentrações de gases com efeito de estufa, aerossóis e usos de solo (Hazeleger *et al.*, 2010).

A componente atmosférica do EC-Earth é baseada no ciclo 31r1 do IFS. Este é um modelo de equações primitivas da atmosfera com especial cuidado na interacção da radiação de curto e longo comprimento de onda com as nuvens, podendo-se encontrar uma descrição detalhada da dinâmica e física no *website* do ECMWF em http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs/CY31r1. Neste trabalho e nas validações referidas anteriormente foi utilizada uma resolução horizontal T159 numa malha gaussiana reduzida N80. Nestas condições, os processos físicos são resolvidos numa grelha de 1,125 graus de resolução horizontal (excepto o modelo radiativo que corre numa grelha de maior resolução horizontal). Nesta malha, o modelo tem 62 níveis verticais que se estendem até aos 5 hPa, e corre com passos de tempo de 1 hora.

A componente da superfície terrestre é prevista pelo *Hydrology-Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchange over Land* (H-TESSEL) que utiliza uma melhor representação hidrológica que o TESSEL utilizado no IFS. As actualizações incluem uma parametrização explícita do escoamento superficial, variações espacias do tipo de solo e uma formulação diferente das propriedades hidráulicas do solo (van der Hurk e Viterbo, 2003). O modelo também inclui uma revisão da densidade da neve e formulação do albedo (Dutra *et al.*, 2010).

A componente oceânica é resolvida pela versão 2 do modelo NEMO. O NEMO é constituído por um modelo de circulação geral oceânico, o *Océan Parallélisé* na sua nona versão (OPA9), e um modelo de gelo flutuante, o *Louvain-la-Neuve Ice Model* na sua segunda versão (LIM2). A física do modelo é resolvida horizontalmente numa grelha Arakawa-C (Arakawa e Lamb, 1977). O modelo permite escolher diversas parametrizações físicas, bem como, diversos algoritmos numéricos. Para o EC-Earth as escolhas mais importantes são o esquema de energia cinética turbulenta (TKE) para a mistura vertical, a fronteira inferior e o uso da dissipação total de variância e o transporte de fluxo corrigido para o esquema horizontal de advecção (Sterl *et al.*, 2012). Detalhes das parametrizações podem ser encontrados em Madec (2008). O modelo LIM2 (Fichefet e Morales Maqueda, 1997) inclui um modelo dinâmico (Hibler, 1979) e três camadas para os cálculos termodinâmicos (Semtner, 1976).

O OASIS na sua terceira versão é utilizado para sincronizar as duas componentes e interpolar os campos entre as respectivas grelhas. Tanto o IFS como o OPA9 utilizam passos de tempo de 1 hora, mas o LIM2 utiliza passos temporais de 3 horas. Sendo assim os campos são interpolados e sincronizados a cada 3 horas entre os diferentes modelos. Do NEMO a concentração de gelo do mar, espessura de neve sobre o gelo, albedo do gelo e temperatura à superfície são passados para o IFS, no sentido inverso passam os fluxos de calor, água doce devida ao escoamento e momento.

3.3. WRF

O WRF (Skamarock *et al.*, 2008) é um modelo numérico de previsão de tempo de última geração, que foi desenvolvido de forma a ser utilizado tanto em investigação como para a previsão do estado do tempo. O modelo possui dois *cores* dinâmicos, um sistema de assimilação e uma arquitectura extremamente flexível podendo ser utilizado em diferentes sistemas computacionais. Este modelo pode ser utilizado num leque variado de aplicações meteorológicas que podem ir de escalas de centenas de quilómetros até metros. O desenvolvimento do WRF começou nos finais da década de 1990 e representa um esforço colectivo de diversas instituições norte americanas.

O conjunto de equações definidos no WRF são eulerianas, compressíveis e nãohidrostáticas e conservativas para as variáveis escalares. O modelo utiliza um sistema de coordenadas verticais que segue a topografia sendo o topo do modelo constituído por um nível de pressão constante. Uma grelha Arakawa-C (Arakawa e Lamb, 1977) é utilizada na horizontal. O esquema de integração temporal utiliza um sistema de terceira ordem de Runge-Kutta, e a discretização espacial utiliza esquemas de 2ª a 6ª ordem. O modelo foi escrito em Fortran 90 e é desenvolvido para ser utilizado em aplicações idealizadas e reais, sendo possível utilizar o modelo para aplicações de *Large Eddy Simulation* (LES) ou como modelo global. O modelo suporta aninhamentos uni e bidireccionais e opção de aninhamentos em movimento.

4. Regionalização de Cenários Climáticos

4.1. Introdução

O IPCC esta actualmente a preparar o seu quinto relatório (AR5), que irá incorporar modelos mais recentes e novos desenvolvimentos científicos, esperando-se que esteja concluído em meados de 2014. Este relatório irá utilizar novos cenários climáticos e considerar um alargado número de problemas de alterações climáticas entre as escala decadais e milenares. Para os decisores, a escala decadal é a mais apropriada pois refere-se a mudanças climáticas recentes e próximas num sistema actualmente em desequilíbrio.

O projecto Assessing the Mid-Century Climate Transition (AMIC), no qual parte deste trabalho está inserido, integra os membros portugueses do consórcio europeu EC-Earth. O AMIC tem como objectivo contribuir para o quinto relatório do IPCC com um conjunto significativo de resultados utilizando modelos que correspondem ao estado de arte. Dado que as simulações propostas utilizarão resoluções melhores que as do AR4, espera-se que elas sejam mais representativas da dinâmica sinóptica, aumentando a confiança nos diagnósticos dos sistemas meteorológicos que definem a variabilidade do clima.

Além de contribuir para o AR5, o projecto produziu um conjunto de simulações regionais para a Península Ibérica (Soares *et al.*, 2012) e para as Regiões Autónomas dos Açores e da Madeira. Estas simulações utilizaram o modelo numérico de mesoscala WRF, que representa uma nova geração de modelos desenvolvidos para a previsão do estado do tempo, mas que pode ser usado em simulações regionais de clima (Leung *et al.*, 2006). Este modelo foi utilizado com uma resolução de 9 km nas simulações ibéricas e de 6 km nas regiões autónomas. A regionalização do clima para as regiões autónomas, inclui uma simulação de controlo que utiliza condições de fronteira da ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011) para o período de 1989 a 2010, e mais 3 simulações que utilizam condições fronteiras do modelo EC-Earth (1989-2010, 2040-2060 e 2080-2100). As simulações permitem validar a metodologia de regionalização utilizada e caracterizar o clima actual e futuro.

Tabela 4.01 – Os quatro RCP's (Moss <i>et al.</i> , 2010).		
Nome	Forçamento Radiativo	Tipo de Forçamento
RCP8.5	> 8,5 Wm-2 em 2100	Crescente
RCP6.0	≈ 6,0 Wm-2 em 2100	Estabilização sem pico
RCP4.5	≈ 4,5 Wm-2 em 2100	Estabilização sem pico
RCP2.6	Pico de ≈ 3,0 Wm-2 antes de 2100 e declínio	Pico e declinio

Os antigos cenários SRES do AR4 serão neste novo relatório substituídos pelos *Representative Concentration Pathways* (RCP; Moss *et al.*, 2010), sendo estes baseados em cenários de forçamento radiativo que se destinam a servir de entrada nos modelos climáticos. Estes não são cenários novos, uma vez que não representam um determinado pacote socioeconómico e de emissões. Este novo método permite à comunidade científica ganhar tempo
no estudo e avaliação das alterações climáticas, uma vez que cada caminho radiativo pode representar diferentes cenários socioeconómicos e de emissões futuros. Foram seleccionados quatro caminhos diferentes que foram denominados conforme o forçamento radiativo total em 2100 (Tabela 4.01). A comunidade de modelação irá usar estes quatro cenários nas novas projecções das alterações climáticas no AR5 do IPCC.

4.2. Avaliação do Modelo Global

No âmbito do projecto do IDL foram efectuadas três simulações temporais longas para o estudo das alterações climáticas utilizando o modelo EC-Earth (Tabela 4.02). O modelo EC-Earth (versão 2.3) utiliza uma malha horizontal equivalente a 1,125° de resolução horizontal e 62 níveis verticais (T159L62), o que representa um aumento considerável de resolução quando comparado com os GCM utilizados no AR4 que utilizaram resoluções de aproximadamente 2,5° na horizontal e apenas 19 níveis verticais. De forma a estudar o clima presente e validar o modelo, efectuou-se uma simulação histórica para o período 1850-2010 (apenas o período 1850 a 2006 será usado no AR5) que utiliza condições pré-industriais como forçamento inicial. Para estudar o clima futuro, o IDL efectuou mais duas simulações (2006 a 2100) utilizando dois cenários de forçamento radiativo (RCP8.5 e RCP4.5). Ambas as simulações utilizam como condições iniciais os resultados obtidos para as 00UTC do dia 1 de Janeiro de 2006 da simulação histórica.

Tabela 4.02 – Simulações efectuadas com o EC-Earth v2.3.

Descrição	Resolução	Condições Iniciais
EC-Earth CMIP5 Historical Run	T159L62	Pré-Industriais
EC.Earth RCP4.5 Scenario Run	T159L62	EC-Earth CMIP5 Historical Run (2006/01/01 00h)
EC.Earth RCP8.5 Scenario Run	T159L62	EC-Earth CMIP5 Historical Run (2006/01/01 00h)

4.2.1. Clima Global Presente

Nesta primeira fase, vamos comparar os resultados obtidos na simulação global histórica com dados da reanálise ERA-Interim do ECMWF, de forma a ter uma ideia das anomalias existentes no EC-Earth que poderão afectar as simulações regionais realizadas posteriormente. A ERA-Interim representa a última geração de reanálise global atmosférica, que foi desenvolvida para substituir a reanálise ERA-40 do ECMWF. O modelo de previsão utilizado, os métodos de assimilação e os dados de entrada na reanálise são discutidos em Dee *et al.*, 2011. Esta foi desenvolvida de modo a mitigar alguns dos problemas encontrados na ERA-40, como por exemplo o excesso de precipitação sobre os oceanos após 1990. A ERA-Interim conta com maior resolução horizontal (Grelha espectral T255 com aproximadamente 0,75° de resolução) e vertical (60 níveis) que a sua predecessora e cobre o período de Janeiro de 1979 a Fevereiro de 2013, sendo ainda uma reanálise em quase tempo real, isto é, ainda continua a ser integrada tendo um atraso de cerca de dois meses em relação à realidade.



Figura 4.01 – Anomalia da temperatura média anual à superfície em relação à ERA-Interim. Valores em graus celsius (1989 a 2010). A grelha horizontal do EC-Earth foi interpolada de forma a corresponder à grelha da ERA-Interim.

Neste capítulo apenas iremos analisar de forma breve os dados da temperatura à superfície e precipitação, uma vez que estas são as únicas variáveis meteorológicas disponíveis para validação da técnica de regionalização. Na comparação de campos globais entre o modelo global e a reanálise, foi necessário interpolar ambas as malhas gaussianas reduzidas para uma grelha regular. Foi ainda necessário interpolar horizontalmente a grelha do modelo global com resolução de 1,125° para a malha regular da ERA-Interim com 0,75° de resolução. A interpolação da gaussiana reduzida para a malha regular introduz alguma contaminação nos resultados globais nas regiões polares, onde o número de pontos na malha original dos modelos é muito inferior ao da malha regular. De forma a mitigar esta contaminação os dados apresentados nas series temporais foram calculados usando as gaussianas reduzidas.

Na figura 4.01 comparamos a temperatura média global para o período 1979 a 2010 simulado pelo EC-Earth com a ERA-Interim. Nesta comparação podemos verificar que o EC-Earth é demasiado frio sobre os trópicos e sobre a terra, apresentando um viés positivo alto no hemisfério sul e nas regiões de afloramento costeiro. Este viés forte no hemisfério sul é uma característica comum dos GCM's que utilizam o NEMO como componente oceânica (Salas y Mélia *et al.*, 2005). Acredita-se que este está relacionado com a parametrização da camada de mistura oceânica do NEMO e/ou a incorrecta representação do campo de nuvens baixas (Hazeleger *et al.*, 2012).

As figuras 4.02 e 4.03 reforçam a ideia de que o modelo EC-Earth apresenta um viés negativo, apesar do ciclo mensal e sazonal estarem bem representados, existindo anomalias mensais médias de -1,13 °C \pm 0,11 °C em relação a ERA-Interim. Sazonalmente encontramos valores similares de -1,13 °C \pm 0,10 °C, havendo um desvio mais elevado em SON (Setembro-

Outubro-Novembro) e menor nas restantes estações. Na figura 4.03 podemos ver uma variabilidade interanual da temperatura e as anomalias da temperatura global anual em relação a reanálise, sendo o modelo consistentemente mais frio. Comparando as tendências projectadas pelo modelo para os últimos 100 anos contra os dados observacionais apresentados no TAR e no AR4, encontramos valores de 0,76 °C para o período do TAR e de 1,10 °C para o período do AR4. Apesar do valor projectado para o período do AR4 estar um pouco acima dos valores observacionais, o modelo apresenta uma correcta representação da tendência ao longo dos últimos 50 anos de cerca de 0,11 °C/década.



Figura 4.02 – Temperatura média mensal e sazonal e respectiva anomalia em relação à ERA-Interim (1989 a 2010).



19

A figura 4.04 apresenta a precipitação média anual (a) e as respectivas anomalias (b) em relação à ERA-Interim. Estes resultados são similares aos apresentados em Hazeleger *et al.* (2012). O EC-Earth apresenta um défice de precipitação na Zona Intertropical de Convergência (ITCZ), existindo uma tendência para a formação de uma dupla ITCZ sobre o Pacífico. No Atlântico Sul existe uma forte anomalia positiva, acompanhada por uma anomalia negativa a norte, o que indica um deslocamento latitudinal da ITCZ. Nas principais regiões de convergência no continente africano e sul-americano existe um viés negativo. Os ciclos mensais e sazonais da precipitação global estão atenuados no EC-Earth (Figura 4.05), apresentando um viés negativo de -0,08 mm/dia ± 0,04 mm/dia, claramente mais forte durante o Verão do Hemisfério Norte e mais fraco durante o Inverno.



Figura 4.04 – Precipitação média anual do EC-Earth (a) e anomalia da precipitação média anual em relação à ERA-Interim. Valores em mm/dia (1989 a 2010). A grelha horizontal do EC-Earth foi interpolada de forma a corresponder à grelha da ERA-Interim.



Figura 4.05 – Precipitação média mensal e sazonal e respectiva anomalia em relação à ERA-Interim (1989 a 2010).

Apesar das deficiências, inerentes a todos os modelos globais, o EC-Earth consegue descrever as principais características de larga escala da atmosfera sendo os maiores desvios encontrados nas variáveis à superfície terrestre (Hazeleger *et al.*, 2012). Globalmente, o modelo apresenta temperaturas mais frias e menos precipitação que a ERA-Interim, mas representa razoavelmente o ciclo anual global, apresentando também tendências de aquecimento similares aos dados observacionais disponíveis.

4.2.2. Clima Global Futuro

Depois de verificarmos que o modelo tem um bom desempenho na simulação do clima global presente, iremos analisar as projecções dos dois cenários corridos no IDL para o clima futuro. Como o principal objectivo deste trabalho é a regionalização dos resultados globais, não iremos fazer uma avaliação exaustiva dos resultados, e como anteriormente vamos apenas focar a análise na temperatura e precipitação. Analisaremos também os períodos 2040 a 2060 e 2080 a 2100 na nossa análise uma vez que estes são os períodos escolhidos para a regionalização dos resultados globais nas Regiões Autónomas dos Açores e Madeira.



Figura 4.06 – Evolução da temperatura média global e respectivas anomalias em relação à média global do período 1990 a 2010 projectado pelo EC-Earth.

A evolução temporal da temperatura (Figura 4.06) mostra uma tendência positiva em ambos os cenários. As projecções para o cenário RCP8.5 apontam para um aumento de temperatura de 3,94°C da temperatura média global nos próximos 100 anos, enquanto o cenário RCP4.5 apresenta um aumento de 1,65 °C. Para o mesmo período verificamos que a tendência de aquecimento de ambos os cenários é similar até por volta do ano 2030 apresentando acréscimos que rondam os 0,62 °C e só após este ano é que ambos os cenários começam a divergir. Após este

período o cenário RCP8.5 apresenta uma taxa de aquecimento de 0,47 °C/década e o cenário RCP4.5 aquece ao ritmo de 0,15 °C/década. Este desvio deve-se ao facto de ser por volta de 2030 que a concentração de CO2 de ambos os cenários começa a divergir. Após 2030, a tendência de crescimento da concentração de CO2 na atmosfera do cenário RCP4.5 diminui, atingindo a estabilização perto dos 550 ppm no fim do século XXI, ao contrário no cenário RCP8.5 onde a tendência de crescimento não diminui.



Figura 4.07 – Evolução da temperatura mensal e sazonal dos diferentes períodos de estudo, e respectivas anomalias em relação à média global do período 1990 a 2010 projectado pelo EC-Earth.



Figura 4.08 – Evolução da precipitação média diária global e respectivas anomalias em relação à média global do período 1990 a 2010 projectado pelo EC-Earth.

Para o fim do século XXI as projecções apontam (Figura 4.07), no cenário mais pessimista, para aumentos superiores a 3 °C todos os meses do ano. Este aumento para o cenário RCP4.5 é mais modesto apresentando aquecimentos mensais inferiores a 2 °C. Note-se que este aumento não é muito superior ao estimado pelo cenário RCP8.5 para o período 2040 a 2060. Independentemente do cenário e período analisado verificamos que existe um maior aquecimento nos meses de Outono e Inverno do Hemisfério Norte que irá contribuir para a diminuição da variabilidade sazonal da temperatura média global.

O aumento da precipitação ao longo do século XXI pode estar directamente ligada ao aumento de temperatura. Com o aumento da temperatura, as taxas de evaporação aumentam e a atmosfera também é capaz de reter mais humidade. Na figura 4.08 apresentamos a evolução da precipitação anual para ambos os cenários. Ambas as projecções apontam para um aumento da precipitação média global ao longo de todo o século XXI. A tendência do cenário RCP8.5 para o fim do século aponta para um aumento de 0,23 mm/dia e no cenário RCP4.5 existe um aumento menos acentuado de 0,09 mm/dia. Ambos os cenários apontam para um aumento de 0,07 mm/dia até meados de 2060, após este ano, no cenário RCP8.5, a tendência de crescimento duplica para 0,15 mm/dia e a tendência correspondente no cenário RCP4.5 é de apenas 0,02 mm/dia. Na escala mensal e sazonal (Figura 4.09) verificamos um aumento de precipitação em todos os meses e estações do ano, independentemente do período e cenário. À escala sazonal não existem diferenças significativas no aumento da precipitação.





Olhando agora para a distribuição espacial (Figura 4.10), as projecções apontam para um aquecimento superior a 10 °C em todo o Árctico o que irá contribuir para uma diminuição significativa da cobertura gelada do polo norte. Fora do Árctico, o aquecimento será mais

pronunciado nas regiões terrestres do globo e poderá atingir valores superiores a 5 °C na Islândia, regiões interiores e costeira dos Estados Unidos Ocidentais, Norte e Sul de Africa e Tibete. Sobre o oceano o aquecimento é menos acentuado rondando os 2 a 3 °C no Hemisfério Sul e 3 a 4 °C nos Hemisfério Norte. De notar também o aquecimento que ronda os 7 °C no Mar de Wendell e Okhotsk.

Ao longo do século XXI, as projecções apontam para um aumento da precipitação acima dos 40 °N e 40 °S. Este ganho é acompanhado por uma perda de precipitação nas regiões subtropicais (excluindo a região da monção Asiática). As projecções revelam as tempestades extratropicais a mover-se em direcção aos polos (Yin, 2005), contribuindo para o transporte de vapor de água das regiões subtropicais em direcção aos polos. De certo modo, podemos afirmar que, em geral, as regiões onde existe maior precipitação vão ser ainda mais húmidas e as regiões de menor precipitação tenderão a ficar mais secas. De notar também um grande ganho de precipitação na região equatorial que pode estar relacionada com um movimento para sul da ITCZ (Peterson *et al.*, 2000).



Figura 4.10 – Anomalias do cenário RCP8.5 no fim do século em relação à média global do período 1990 a 2010 projectado pelo EC-Earth: a) temperatura média global, valores em Celsius; e b) precipitação média global, valores em mm/dia.

4.3. Regionalização para as Regiões Autónomas dos Açores e Madeira

4.3.1 Regiões de Estudo

4.3.1.1 Região Autónoma dos Açores

A Região Autónoma dos Açores localiza-se no Atlântico Norte entre as latitudes 36 °N e 43 °N e as longitudes de 25 °W e 31 °W. Provavelmente descobertos em 1431, os Açores têm quase seis séculos de presença humana e um lugar importante na história portuguesa, sendo um local de escala para os descobrimentos e na rota para Índia das frotas portuguesas. Actualmente um importante centro de apoio à aviação militar e comercial. A região é constituída por 9 ilhas que ocupam uma grande área e estão distribuídas em três grupos de ilhas: o grupo oriental com as ilhas de São Miguel e Santa Maria; no grupo central encontramos as ilhas da Terceira, Faial, Pico, São Jorge e Graciosa; e o grupo ocidental engloba as ilhas das Flores e Corvo. As ilhas de origem vulcânica são relativamente jovens (a ilha do Pico tem apenas 300.000 anos) e apresentam um largo especto de áreas variando entre os cerca de 760 km² de São Miguel e os 17 km² do Corvo. O ponto mais alto de Portugal pode ser encontrado na ilha do Pico, aos 2351 metros.

O clima dos Açores é ameno e fortemente influenciado pelo Oceano em termos da temperatura (influência da corrente do Golfo) e o seu território é frequentemente afectado por sistemas depressionários associados a superfícies frontais que atravessam o Atlântico, com alto teor de humidade. Na escala regional o clima é influenciado pela orografia de cada ilha para além da influência recíproca entre ilhas próximas, como é o caso do Pico, São Jorge e Faial. O clima dos Açores é classificado como subtropical húmido, sendo chuvoso entre Setembro a Março devido à passagem frequente de sistemas depressionários associados à frente polar, e menos chuvoso durante os restantes meses devido à influência do anticiclone dos Açores.

4.3.1.2 Região Autónoma da Madeira

Descobertas oficialmente em 1419 no Atlântico Norte as ilhas de origem vulcânica da Madeira, Porto Santo, Desertas (3 ilhas) e Selvagens (3 ilhas) constituem o Arquipélago da Madeira. Centrada em 32°45'N e 17°W a ilha da Madeira é a maior ilha com uma área de 740 km², possuindo uma orografia bastante complexa sendo o centro da ilha dominado por montanhas de grande elevação separadas por ravinas profundas. Encontramos os pontos mais alto da ilha na região oriental, Pico Ruivo (1862 metros) e Pico do Areeiro (1818 metros) e na região ocidental localizamos o Planalto do Paul (1400 metros). A ilha de Porto Santo localizada a Nordeste da ilha da Madeira tem 43 km² e apresenta uma orografia muito mais suave tendo o ponto mais alto perto de 500 metros de altitude.

O clima da região é mediterrânico, sendo ameno durante todo o ano excluindo as zonas de grande elevação onde se encontram temperaturas mais baixas. Durante o Inverno sistemas depressionários que atravessam o Atlântico atingem a Madeira, observando-se igualmente a formação de depressões entre o arquipélago e Portugal Continental, que podem provocar eventos de precipitação intensa na região. No Verão os ventos que estão associados ao ramo leste do anticiclone dos Açores têm uma predominância do quadrante Norte. A orografia da ilha com altitudes muito elevadas favorece a ocorrência de precipitação orográfica tornando algumas zonas da ilha bastante húmidas e permitindo a existência de recursos hídricos significativos. Apesar de ser afectada pelos mesmos sistemas meteorológicos, a ilha de Porto Santo apresenta um clima muito mais seco, o que comprova a relevância da orografia na precipitação na ilha da Madeira.

4.3.2 Descrição das Simulações

Na regionalização das simulações climáticas, como anteriormente mencionado, foi utilizado o modelo WRF (versão 3.2.1). No presente estudo, o modelo foi configurado com duas malhas aninhadas, uma com 24 km e a segunda com 6 km de resolução horizontal, usando um aninhamento unidireccional. Nos Açores (Figura 4.11a) o domínio exterior está centrado sobre o grupo central e utiliza 136×136 pontos na horizontal. Devido à grande extensão da região autónoma dos Açores, optou-se de forma a minimizar o tempo de integração do modelo, criar 3 domínios interiores cada um deles centrado sobre um diferente grupo de ilhas. Os domínios têm 61×49 pontos na horizontal para o grupo central, 49×53 para o grupo oriental e 41×37 para o grupo ocidental. Para a Madeira (Figura 4.11b) a criação dos domínios foi mais simples, estando o domínio exterior e interior centrados sobre a ilha da Madeira, tendo o domínio exterior 70×70 pontos na horizontal e o domínio interior 61×65 pontos, sendo que este engloba as ilhas da Madeira e Porto Santo.



Figura 4.11 – Representação dos domínios simulados: a) Região autónoma dos Açores, a vermelho o domínio exterior, a verde, azul e ciano os domínios interiores; b) Região autónoma da Madeira, a vermelho o domínio exterior e a azul o domínio interior.

Uma análise à máscara oceano-terra e orografia do modelo regional e dos modelos globais revela uma diferença significativa na representação das ilhas das regiões autónomas. No caso da ERA-Interim e EC-Earth as ilhas aparecem como caixas com orografia baixa. Nos Açores o grupo ocidental é simplesmente ignorado pelos modelos e as ilhas que constituem o grupo central e oriental e também a Madeira e Porto Santo não estão separadas e encontram-se agregadas num único bloco. Este problema é em muito atenuado nas simulações de WRF a 6 km apesar de mesmo a esta resolução a orografia utilizada pelos modelos apresentar deficiências, em especial na ilha da Madeira, onde a sua orografia altamente complexa é demasiado suavizada, e na ilha do Pico onde o modelo apresenta um relevo muito inferior ao real. Mesmo assim, espera-se que a maior resolução horizontal do domínio interior ajude a melhorar as projecções climáticas presentes e futuras, em especial a representação da precipitação nas regiões autónomas.

De forma a mitigar a dificuldade dos modelos de regionais em representar as características de larga escala que são forçadas nas suas fronteiras (Jones *et al.*, 1995), foi aplicado *nudging* (Staufer e Seaman, 1990) no domínio exterior. O *nudging* é aplicado uma vez por dia acima do topo da camada limite planetária. Todos os domínios utilizam 50 níveis verticais que estão aproximadamente espaçados em 20 metros dentro da cada camada limite planetária sendo o topo do modelo localizado aos 5 hPa.

As parametrizações físicas seguem as utilizadas no estudo efectuado para Portugal Continental (Soares *et al.*, 2012). A microfísica é representada pelo esquema WSM6 (Hong e Lim, 2006), a camada limite planetária utiliza o esquema de Mellor-Yamada-Janjic (Janjic, 2001) e a convecção segue o esquema de Betts-Miller-Janjic (Betts, 1986; Betts e Miller, 1986; Janjic, 1990, 1994, 2000). O solo é representado pelo *Unified NOAH land-surface model* (Chen e Dudhia, 2001). A radiação de grande e pequeno comprimento de onda segue o esquema CAM (Collins *et al.*, 2004). Foi necessário fazer uma pequena modificação a este esquema de forma a ler adequadamente o ficheiro que contêm as estimativas das concentrações de dióxido de carbono, metano, dióxido de nitrogénio, tricloromonofluormetano e diclorodifluormetano dos dois cenários de forçamento futuro.

Região	Descrição	Designação	Resolução	Condições Iniciais	Período
Açores	Clima Presente (Síncrono)	WRFi 24km ; WRFi 6km	24 km e 6km	ERA-Interim	1989 a 2010
	Clima Presente Controlo	WRFe 24km ; WRFe 6km	24 km e 6km	EC-Earth	1989 a 2010
	Clima Futuro Cenário RCP4.5	-	24 km e 6km	EC-Earth RCP4.5	2040 a 2060
		-	24 km e 6km	EC-Earth RCP4.5	2080 a 2100
	Clima Futuro Cenário RCP8.5	-	24 km e 6km	EC-Earth RCP8.5	2040 a 2060
		-	24 km e 6km	EC-Earth RCP8.5	2080 a 2100
Madeira	Clima Presente (Síncrono)	WRFi 24km ; WRFi 6km	24 km e 6km	ERA-Interim	1989 a 2011
	Clima Presente Controlo	WRFe 24km ; WRFe 6km	24 km e 6km	EC-Earth	1989 a 2010
	Clima Futuro Cenário RCP4.5	-	24 km e 6km	EC-Earth RCP4.5	2040 a 2060
		-	24 km e 6km	EC-Earth RCP4.5	2080 a 2100
	Clima Futuro Cenário RCP8.5	-	24 km e 6km	EC-Earth RCP8.5	2040 a 2060
		-	24 km e 6km	EC-Earth RCP8.5	2080 a 2100

Tabela 4.03 – Simulações efectuadas com o WRF v3.2.1.

Para ambas as regiões efectuaram-se duas simulações para o clima presente e mais quatro para o clima futuro (Tabela 4.03). Para o clima presente realizou-se uma simulação das 0000UTC de 1 de Janeiro de 1989 até 0000UTC de 1 de Janeiro de 2010, que é forçada nas suas fronteiras por dados da reanálise ERA-Interim. Para o mesmo período efectuou-se ainda outra simulação que utiliza como forçamentos dados da simulação histórica do EC-Earth. A segunda simulação constitui a simulação de controlo, a simulação forçada pela reanálise permite uma avaliação quer do desempenho do modelo WRF na regionalização, visto que permite a comparação directa e sincronizada com observações, quer uma validação regional da simulação de controlo. No estudo do clima futuro, efectuaram-se quatro simulações de forma a avaliar as alterações climáticas nas regiões autónomas usando os dois cenários de emissões utilizados durante as simulações do modelo global. Para cada cenário efectuaram-se duas simulações, uma para representar o clima no meio do século XXI (0000UTC de 1 de Janeiro de 2040 a 0000UTC de 1 de Janeiro de 2060) e outra para o estudo do clima no fim do século XXI (0000UTC de 1 de Janeiro de 2080 a 0000UTC de 1 de Janeiro de 2100). Em todas as simulações, as condições fronteira do modelo e a temperatura da superfície do mar foram actualizadas de 6 em 6 horas no domínio exterior, sendo o domínio interior forçado nas suas fronteiras todas as horas por dados do domínio exterior.

Actualmente, as emissões apresentam valores ligeiramente superiores àqueles que são representados pelo cenário RCP8.5 para esta data, e dada a diferença de concentrações de gases de efeito estufa existente entre os cenários seria necessário existir uma redução muito significativa das emissões no futuro próximo de forma a aproximar as emissões daquelas que são representadas pelo cenário RCP4.5. Por este motivo e após quase ano e meio de simulações optou-se por não completar a corrida RCP4.5 para a Região Autónoma dos Açores. Mas note-se que todo o domínio exterior desta simulação para ambos os períodos se encontra completa, faltando apenas completar a simulação do domínio interior.



Figura 4.12 – Distribuição espacial das estações meteorológicas a azul e postos udométricos a vermelho na: a) Região Autónoma dos Açores; b) Região Autónoma da Madeira.

4.3.3 Dados Observacionais

Este estudo utiliza observações de superfície da temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação diária cedidas pelo IPMA no âmbito do projecto. Os dados observacionais disponibilizados contam com 48 pontos de observações na Região autónoma dos Açores, sendo 16 destes pontos postos udométricos (Tabela 4.04). Na Região Autónoma da Madeira, contamos com 26 pontos de observação sendo 5 postos udométricos (Tabela 4.05). A figura 4.12 mostra a distribuição espacial das estações em ambas as regiões. Nos Açores temos 24 pontos observacionais no grupo central, 17 no grupo oriental e 7 no grupo ocidental. Por seu turno, na Madeira, 2 dos pontos observacionais encontram-se na ilha de Porto Santo, sendo os restantes localizados na ilha da Madeira. Apesar do IPMA ter sujeito os dados a procedimentos básicos de controlo de qualidade, nomeadamente a validação temporal e consistência meteorológica dos dados, foi ainda necessário remover das séries temporais alguns valores anómalos, como por exemplo, temperaturas excessivamente altas (superiores a 99 °C) e dois ou três casos de precipitações com valores negativos.

Nome	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período
Sta Cruz das Flores	39° 27'	31° 08'	39	1970-1976
Barro Vermelho/Graciosa	39° 06'	28° 02'	27	1971-1977
Santa Cruz/Graciosa	39° 05'	28° 01'	27	1978-1994
Serra Branca/Graciosa	39° 02'	28° 02'	300	1970-1990
Madalena/Aeródromo/Pico	38° 33'	28° 26'	44	1983-2008
S.Jorge/Aeródromo	38° 40'	28° 15'	99	1987-1994
Nordeste/S.Miguel	37° 50'	25° 09'	140	1970-2009
Furnas/S.Miguel	37° 46'	25° 19'	290	1979-2009
Fajã de Cima/S. Miguel	37° 46'	25° 39'	175	1970-1982
Chã de Macela/S. Miguel	37° 46'	25° 32'	309	1970-2004
Cerrado dos Bezerros/S. Miguel	37° 45'	25° 22'	440	1973-2009
Fontinhas/Sta Maria	36° 57'	25° 05'	430	1970-1994
Capelo/Faial	38° 35'	28° 48'	196	1978-1994
Flores/Aeroporto	39° 27'	31° 07'	28	1970-2009
Flores/Aeroporto (EMA)	39° 27'	31° 07'	28	1996-2010
Corvo	39° 40'	31° 07'	28	1970-1994
Corvo (EMA)	39° 40'	31° 07'	18	2002-2010
Horta/Aeroporto/Faial	38° 31'	28° 30'	45	1972-2009
Horta/Obs. P. A. Monaco/Faial	38° 31'	28° 38'	60	1970-1994
Horta/Obs. P. A. Monaco/Faial (EMA)	38° 31'	28° 38'	60	1997-2010
Lages/Aero/Terceira	38° 45'	27° 05'	53	1970-2010
Lages/Aero/Terceira (SYNOP)	38° 45'	27° 05'	53	1996-2010
Angra do Heroísmo/Terceira	38° 40'	27° 13'	74	1970-2009
Angra do Heroísmo/Terceira (EMA)	38° 15'	27° 46'	90	2000-2010
Ponta Delgada/Nordela/S.Miguel	37° 44'	25° 42'	71	1970-2008
Ponta Delgada/Nordela/S.Miguel (EMA)	37° 44'	25° 42'	71	1996-2010
Ponta Delgada/Obs. A.Chaves/S.Miguel	37°44'	25° 39'	35	1947-2009
Santa Maria/Aeroporto	36° 58'	25° 10'	100	1970-2001
Santa Maria/Aeroporto (EMA)	36° 58'	25° 10'	100	2002-2010
Graciosa/Aeródromo (EMA)	39° 05'	28° 02'	25	2002-2010
Pico/Aeródromo (EMA)	38° 33'	28° 06'	33	2002-2010
Nordeste/S.Miguel (EMA)	37° 50'	25° 09'	251	2002-2010
Vila do Corvo/Corvo	39°40'	31°07'	30	1970-1996
Ponta Delgada/Flores	39°31'	31°12'	150	1973-1996
Vitória/Graciosa	39°04'	28°03'	50	1974-1996
Carapacho/Graciosa	39°01'	27 58'	10	1973-1996
Altares/Terceira	38°47'	27°18'	130	1970-2005
Serreta Farol/Terceira	38°46'	27°23'	85	1970-1996
Agualva/Terceira	38°46'	27°11'	160	1970-2005
Rosais/S.Jorge	38°43'	28°15'	246	1970-1996
Santa Barbara/Terceira	38°42'	27 20'	200	1973-1996
S. Bartolomeu/Terceira	38°41'	27°10'	110	1970-1996
Norte Grande/S.Jorge	38°40'	28°05'	400	1973-1996
S. Sebastião/Terceira	38°40'	2/°06'	150	19/3-1996
Jardim Junta Geral/Terceira	38°39'	2/°13'	30	1970-1996
I OPO/S.Jorge	38°33' 27°52	2/~4/	150	1970-1996
Wiosterros/S.Wiguer	3/ 33	25 49	25	1023 1000
Bretanna/S.iviiguei	3/ 33	25 40	125	13/2-1330

Tabela 4.04 – Características das estações meteorológicas na Região Autónoma dos Açores. As últimas 16 linhas referem-se aos postos udométricos.

No período em análise (1989 a 2010), algumas estações não têm dados disponíveis: no caso dos Açores, as estações de Santa Cruz das Flores, Barro Vermelho na ilha Graciosa e Fajã de Cima em São Miguel não têm dados de precipitação. Note-se que 6 estações meteorológicas foram

desactivadas em 1994 e praticamente todos os postos udométricos deixaram de funcionar em 1996. No caso da Madeira, as estações de Porto Moniz, Queimadas, Camacha, Sanatório do Monte e Bom Sucesso não se encontravam em funcionamento no período de análise e actualmente todos os postos udométricos encontram-se inactivos. Este facto reduz substancialmente a quantidade de dados disponível para verificação dos modelos. Nas tabelas 4.06 e 4.07 apresentamos a percentagem de dados diários disponíveis para as 3 variáveis no período em análise e as respectivas médias e variâncias dos valores diários para todas as estações, apresentando-se também duas séries temporais de precipitação e das temperaturas máximas e mínimas mais representativas para ambas as regiões (Figuras 4.13 e 4.14).

Nome	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período
Porto Moniz	32º 50'	17º 11'	673	1961-1979
Ponta Delgada	32° 49'	16° 59'	136	1961-1990
Santana	32° 48'	16° 53'	380	1942-2005
Santana (EMA)	32° 50'	16° 54'	185	2002-2010
Queimadas	32º 46'	16º 54'	860	1970-1979
Bica da Cana	32° 45'	17° 03'	1582.5	1961-2010
Arieiro	32° 43'	16° 54'	1610	1961-1995
Arieiro (EMA)	32° 43'	16° 55'	1510	2005-2010
Santo da Serra	32° 43'	16° 48'	668.4	1970-2010
Lugar de Baixo	32° 40'	17° 05'	40.1	1961-2009
Camacha	32° 40'	16° 50'	680	1961-1987
Sanatório do Monte	32° 39'	16° 54'	380	1961 -1988
Bom Sucesso	32° 39'	16° 54'	290	1961-1985
Funchal/Observ.	32° 38'	16° 53'	58	1949-2010
Funchal/Observ. (EMA)	32° 38'	16° 53'	58	1996-2010
Sta Catarina/Aerop	32° 41'	16° 46'	49	1961-1994
Sta Catarina/Aerop (EMA)	32° 41'	16° 46'	49	1995-2010
Porto Santo/Aerop.	33° 04'	16° 20'	78	1961-2000
Porto Santo/Aerop (EMA)	33° 04'	16° 20'	78	1996-2010
Ponta do Sol/Lugar de Baixo (EMA)	32° 40'	17° 05'	48	2005-2010
Calheta/Ponta do Pargo (EMA)	32° 49'	17° 16'	312	2005-2010
Caniçal	32º 43'	16º 44'	40	1970-1995
Ribeiro Frio	32º 43'	16º 52'	874	1970-2007
Poiso	32º 42'	16º 52'	1360	1970-2007
Machico	32º 43'	16º 46'	160	1970-2007
Encumeada de S. Vicente	32º 44'	17º 00'	1010	1970-2007

Tabela 4.05 – Características das estações meteorológicas na Região Autónoma da Madeira. As últimas 5 linhas referem-se aos postos udométricos

Apesar de muitos postos observacionais apresentarem uma cobertura temporal baixa, uma vez que muitos destes foram desactivados em datas anteriores à data final da simulação, optou-se por utilizar todos os dados disponíveis à escala diária de forma a maximizar a quantidade de dados e melhor representar o clima regional. Apesar de à escala diária todos os dados terem sido utilizados, ao fazer a comparação de resultados mensais e sazonais nem todos os meses e estações foram considerados. Na escala mensal admitimos que cada mês é válido se durante esse mês não existirem falhas observacionais ou existir apenas uma falha. Na escala sazonal admitimos apenas válidos as estações que tenham um máximo de três falhas diárias. Apesar destas

restrições, durante o período de actividade das estações não existe um número elevado de falhas, o que permite ter uma boa caracterização do clima regional.



Figura 4.13 – Evolução mensal da precipitação (gráfico de cima) e temperaturas máximas e mínimas (gráfico de baixo) para Angra do Heroísmo nos Açores.



Figura 4.14 – Evolução mensal da precipitação (gráfico de cima) e temperaturas máximas e mínimas (gráfico de baixo) para o Funchal na Madeira.

		Precipitaç	ão	Temp	eratura N	láxima	Temp	eratura N	línima
Fatacão	Val	Med	Var	Val	Med	Var	Val	Med	Var
Estação	(%)	(mm/d)	(mm/d)	(%)	(°C)	(°C)	(%)	(°C)	(°C)
Santa Cruz/Graciosa	27.3	2.2	33.3	27.0	20.2	12.4	27.1	14.5	12.0
Serra Branca/Graciosa	4.3	2.3	26.4	7.3	16.4	12.7	3.1	10.7	12.5
Madalena/Aeródromo/Pico	53.0	3.1	62.6	34.5	20.2	13.5	53.0	14.5	12.6
S.Jorge/Aeródromo	28.2	3.0	54.7	28.1	20.0	12.7	28.1	14.5	11.7
Nordeste/S.Miguel	63.1	4.2	110.4	63.1	19.0	12.3	61.8	13.7	11.4
Furnas/S.Miguel	81.7	5.6	163.0	81.7	19.8	12.1	81.0	11.8	12.4
Chã de Macela/S. Miguel	67.9	4.5	109.0	67.8	18.3	10.5	67.9	11.4	11.8
Cerrado dos Bezerros/S. Miguel	82.1	4.8	128.4	81.9	17.8	13.0	82.1	11.3	11.5
Fontinhas/Sta Maria	27.8	2.9	55.3	16.1	16.9	12.9	16.1	12.2	10.4
Capelo/Faial	27.8	3.3	68.1	27.7	18.8	12.5	27.8	13.4	11.7
Flores/Aeroporto	85.8	4.3	88.1	85.8	20.6	12.4	85.7	15.5	13.4
Flores/Aeroporto (EMA)	66.1	4.4	83.2	66.4	20.5	13.5	66.6	15.9	12.7
Corvo	8.0	2.7	49.6	7.9	19.9	11.6	8.0	15.5	10.8
Corvo (EMA)	28.1	2.7	41.8	29.6	20.5	12.0	30.2	16.8	10.8
Horta/Aeroporto/Faial	97.4	2.7	76.8	97.4	20.4	11.3	97.1	15.7	11.2
Horta/Obs. P. A. Monaco/Faial	28.2	2.5	47.3	28.2	20.3	14.8	28.2	15.2	11.0
Horta/Obs. P. A. Monaco/Faial									
(EMA)	44.9	3.2	65.0	46.6	20.2	12.5	48.2	15.9	10.2
Lages/Aero/Terceira	71.6	2.8	52.4	72.1	20.6	13.6	72.1	14.6	13.9
Lages/Aero/Terceira (SYNOP)	64.5	2.8	54.2	65.7	20.5	13.2	66.4	15.4	12.1
Angra do Heroísmo/Terceira	99.5	3.0	54.5	99.5	20.0	12.3	99.5	14.8	11.3
Angra do Heroísmo/Terceira (EMA)	44.9	2.9	48.5	43.7	19.9	11.7	45.3	15.0	10.6
Ponta Delgada/Nordela/S.Miguel	75.3	2.5	62.7	75.0	20.6	11.3	75.2	15.1	11.9
Ponta Delgada/Nordela/S.Miguel									
(EMA)	66.2	2.8	69.2	66.4	20.2	11.5	66.6	15.4	10.9
Ponta Delgada/Obs.									
A.Chaves/S.Miguel	70.7	2.8	54.6	70.8	20.6	11.4	70.8	15.1	11.3
Santa Maria/Aeroporto	36.1	1.9	41.0	34.7	20.7	12.1	36.1	15.6	10.7
Santa Maria/Aeroporto (EMA)	36.9	2.0	35.9	36.2	21.0	11.0	37.9	16.1	10.0
Graciosa/Aeródromo (EMA)	27.4	1.6	20.5	28.9	20.9	12.9	29.8	15.8	10.9
Pico/Aeródromo (EMA)	25.7	3.2	61.1	26.7	21.5	13.3	27.7	15.6	11.1
Nordeste/S.Miguel (EMA)	27.2	2.9	84.6	27.9	19.7	12.3	28.8	15.0	8.8
Vila do Corvo/Corvo	25.8	2.0	26.4	-	-	-	-	-	-
Ponta Delgada/Flores	28.5	4.4	113.4	-	-	-	-	-	-
Vitória/Graciosa	27.4	2.2	34.9	-	-	-	-	-	-
Carapacho/Graciosa	28.2	2.1	30.9	-	-	-	-	-	-
Altares/Terceira	77.4	3.4	77.2	-	-	-	-	-	-
Serreta Farol/Terceira	25.6	2.7	66.4	-	-	-	-	-	-
Agualva/Terceira	78.5	4.1	119.6	-	-	-	-	-	-
Rosais/S.Jorge	28.5	3.4	77.0	-	-	-	-	-	-
Santa Barbara/Terceira	37.7	3.2	64.6	-	-	-	-	-	-
S. Bartolomeu/Terceira	28.2	3.2	62.6	-	-	-	-	-	-
Norte Grande/S.Jorge	28.5	6.4	199.7	-	-	-	-	-	-
S. Sebastião/Terceira	37.7	3.2	76.6	-	-	-	-	-	-
Jardim Junta Geral/Terceira	28.2	2.7	50.3	-	-	-	-	-	-
Topo/S.Jorge	26.7	3.4	73.9	-	-	-	-	-	-
Mosteiros/S.Miguel	28.9	2.6	56.6	-	-	-	-	-	-
Bretanha/S.Miguel	28.2	3.2	73.7	-	-	-	-	-	-

Tabela 4.06 – Características médias e disponibilidade de dados na Região Autónoma dos Açores.

	Precipitação		ão	Temperatura Máxima			Temperatura Mínima		
Fataaãa	Val	Med	Var	Val	Med	Var	Val	Med	Var
Estação	(%)	(mm/d)	(mm/d)	(%)	(°C)	(°C)	(%)	(°C)	(°C)
Ponta Delgada	5.8	2.6	40.1	5.7	21.4	13.8	5.7	15.0	9.2
Santana	80.1	3.5	100.2	79.7	19.2	11.5	80.2	13.1	7.4
Santana (EMA)	33.7	1.7	29.1	33.9	21.0	13.8	34.4	15.4	7.3
Bica da Cana	95.3	7.0	281.3	93.1	13.3	30.0	82.5	6.5	21.7
Arieiro	28.5	6.4	298.8	28.5	12.4	28.2	28.5	3.3	19.0
Arieiro (EMA)	19.7	5.6	383.2	20.1	13.2	30.4	20.5	7.4	18.8
Santo da Serra	76.7	5.5	241.6	76.8	17.2	10.7	76.8	10.1	8.1
Lugar de Baixo	88.2	1.5	33.6	83.9	24.4	8.4	88.6	16.5	8.0
Funchel (Observ	100.								
Funchal/Observ.	0	1.6	40.9	99.6	22.7	8.4	99.8	17.0	8.3
Funchal/Observ. (EMA)	66.7	1.7	38.9	66.5	23.1	9.3	66.8	17.0	7.9
Sta Catarina/Aerop	27.7	1.9	50.9	27.7	21.6	9.8	27.8	16.4	8.1
Sta Catarina/Aerop (EMA)	70.8	1.7	38.4	71.0	22.1	9.6	71.7	17.0	8.3
Porto Santo/Aerop.	56.5	1.0	12.8	56.8	21.5	8.4	56.8	16.4	8.6
Porto Santo/Aerop (EMA)	66.4	1.0	12.7	66.8	21.5	9.1	66.9	16.6	8.9
Ponta do Sol/Lugar de Baixo (EMA)	21.8	1.6	36.7	22.0	23.7	8.2	22.0	17.8	6.5
Calheta/Ponta do Pargo (EMA)	8.1	2.0	53.3	21.8	21.5	12.0	22.0	15.6	7.2
Caniçal	29.5	1.7	41.5	-	-	-	-	-	-
Ribeiro Frio	89.6	7.8	559.9	-	-	-	-	-	-
Poiso	88.8	5.0	211.3	-	-	-	-	-	-
Machico	83.0	1.5	32.4	-	-	-	-	-	-
Encumeada de S. Vicente	45.0	6.9	337.6	-	-	-	-	-	-

Tabela 4.07 – Características médias e disponibilidade de dados na Região Autónoma da Madeira.

4.3.4. Avaliação do Clima Presente

Nesta parte do trabalho, vamos comparar as duas simulações regionais, os resultados do modelo global e a reanálise com as observações disponíveis, utilizando o ponto da malha do modelo mais próximo de cada uma das observações. As malhas da ERA-Interim e do EC-Earth foram interpoladas para uma malha regular com 0,75 e 1,125 graus de resolução, respectivamente. As temperaturas máximas e mínimas diárias do modelo WRF foram calculadas recorrendo às saídas horárias da temperatura aos 2 metros do modelo. No caso da ERA-Interim e EC-Earth, estas variáveis são guardadas a cada 3 horas, sendo necessário calcular as máximas e mínimas para cada dia (entre as 9 e as 9 UTC). A precipitação diária para cada modelo é calculada entre as 9 e as 9 UTC, sendo que no modelo de regionalização a precipitação é acumulada por hora durante a integração sendo apenas ser necessária desacumular a mesma. No modelo global e na reanálise a precipitação é calculada a cada três horas sendo neste caso necessário agregar estes valores em blocos diários.

Depois de localizar os pontos dos modelos mais próximos, é necessário efectuar uma correcção altimétrica aos dados da temperatura devido aos desvios existentes entre a altitude a que a observação foi efectuada e a altitude representada pelo modelo, tendo sido utilizado um decréscimo de temperatura de 6,5 K por cada km. Para a precipitação não foi efectuada nenhuma correcção uma vez que esta é muito mais complexa devido à sua dependência de muitos factores, como a topografia, humidade, flutuação e outras variáveis locais (Smith e Barstad, 2004). Para avaliar os erros do modelo foram utilizadas estatísticas padrão de comparação ponto a ponto,

nomeadamente a correlação, o viés, o erro médio quadrático, o erro médio absoluto e o desvio padrão normalizado. A correlação (CORR) mede o grau e tipo de relação existente entre variáveis; o viés (BIAS) mede a tendência do modelo em subavaliar ou sobrestimar uma determinada variável; o erro médio quadrático (RMSE) mede o erro típico do modelo; e o erro médio absoluto (MAE) representa a média das diferenças entre as previsões e observações. O desvio padrão normalizado (NSTD) mede a razão entre o desvio padrão da série simulada e o da série observada. Os eventos extremos são discutidos recorrendo aos quartis das variáveis. Apesar de os cálculos terem sido realizados para todas as simulações, e sempre com referência aos pontos de observação, é essencial ter presente que só a reanálise e a simulação que utiliza a reanálise como condição fronteira deveriam apresentar uma variabilidade sinóptica sincronizada com as observações, pelo que indicadores como a correlação, RMSE e MAE serão necessariamente muito piores nas simulações de controlo, onde a fronteira é dada pelo EC-Earth e a comparação só pode ser feita em termos de médias climáticas. O facto de, apesar disso, existir algum *skill* nas simulações de controlo resulta de uma boa representação de variabilidade não sinóptica, nomeadamente do ciclo anual, no caso das variáveis em que essa variabilidade é relevante.

Apesar de todas as estatísticas terem sido calculadas para todos os pontos de observação disponíveis, de forma a facilitar a análise dos resultados, estas foram agrupados por grupo na região dos Açores. Na região da Madeira os resultados são agregados por ilha.

4.3.4.1. Região Autónoma dos Açores

4.3.4.1.1. Temperatura Máxima

A tabela 4.08 sumariza as estatísticas obtidas à escala diária para a temperatura máxima diária para a região dos Açores. Como seria de esperar, a ERA-Interim e o modelo regional por esta forçado apresentam melhores resultados, tendo melhores correlações e menores erros médios que variam entre os 2,60 °C (ERA-Interim no grupo central) e 2,07 °C (WRFi 6km no grupo central) e os resultados apontam todos para uma subestimação da temperatura máxima diária. Apesar das correlações na simulação WRFi 6km serem (muito) ligeiramente inferior às da reanálise, as suas estatísticas de erro são melhores que as da reanálise. As correlações apresentadas pelo EC-Earth, WRFe 24km e WRFe 6km são cerca de 15% inferiores quando comparadas com a reanálise e simulação forçada por esta, o que é normal dada a falta de sincronização da variabilidade sinóptica e, de facto, indica que uma parte significativa da variância da temperatura na região dos Açores está associada ao ciclo anual. O viés das simulações associadas ao EC-Earth é, no entanto, superior em mais de 1,5 °C, apresentando um viés negativo com valores que rondam os 3 °C (entre -2,58 °C no grupo oriental na simulação WRFe 6km e -3,47 °C no grupo ocidental na simulação global). Apesar disso, as simulações de maior resolução apresentam uma redução de viés da ordem de 0,5 °C. Foi mostrado anteriormente que o modelo EC-Earth é globalmente frio, e o seu comportamento na região dos Açores tem o mesmo sinal. A variabilidade da temperatura máxima na Região Autónoma dos Açores, é na generalidade bem explicada por todas as simulações e reanálise como podemos ver pelos valores de NSTD

calculados, sendo esta variabilidade muito bem capturada nos domínios de maior resolução do modelo regional (WRFi 6km e WRFe 6km).

-	•			-			-
		EC- Earth	WRFe 24km	WRFe 6km	ERA- Interim	WRFi 24km	WRFi 6km
CORRELATION	G. Ocidental	0.75	0.77	0.76	0.92	0.91	0.91
(adi)	G. Central	0.74	0.75	0.72	0.91	0.89	0.89
	G. Oriental	0.76	0.76	0.73	0.90	0.88	0.87
RMSE	G. Ocidental	4.20	4.01	3.89	2.36	2.45	2.11
(°C)	G. Central	4.15	3.80	3.79	2.60	2.41	2.07
	G. Oriental	4.07	3.59	3.58	2.59	2.28	2.08
BIAS	G. Ocidental	-3.47	-3.32	-3.08	-1.86	-1.92	-1.50
(°C)	G. Central	-3.35	-2.90	-2.71	-2.04	-1.63	-1.18
	G. Oriental	-3.38	-2.65	-2.58	-2.04	-1.20	-1.07
MAE	G. Ocidental	3.62	3.47	3.30	2.00	2.05	1.71
(°C)	G. Central	3.58	3.22	3.14	2.20	1.98	1.66
	G. Oriental	3.54	3.03	2.98	2.20	1.87	1.64
NSTD	G. Ocidental	0.83	0.78	0.92	0.82	0.80	0.92
(adi)	G. Central	0.74	0.83	0.94	0.78	0.87	0.96
	G. Oriental	0.72	0.85	0.92	0.80	0.91	0.97

Tabela 4.08 – Estatísticas diárias por grupo para a temperatura máxima nos Açores. (Sombreadas as simulações não sincronizadas com as observações; melhores resultados em **bold**).



Figura 4.15 – Quartis de 0 a 1 com espaçamento de 0.01 da temperatura máxima diária. Nos gráficos do topo, apresentamos os resultados da reanálise e simulações WRFi 24km e WRFi 6km para os três grupos. Nos gráficos inferiores, apresentamos os resultados do modelo EC-Earth, WRFe 24km e WRFe 6km para cada grupo.

Na figura 4.15 apresentamos os quartis da temperatura máxima diária de 0 a 1 com espaçamento de 0.01, para os três grupos e para as diferentes simulações e reanálise. No grupo ocidental, o EC-Earth, ERA-Interim, WRFi 24km e WRFe 24km apresentam menores desvios nos

quartis inferiores que nos quartis altos, sendo que as simulações de alta resolução WRFe 6km apresentam uma tendência contrária. No grupo central os resultados indicam que os quartis mais baixos são melhor representados que os quartis mais elevados. Este último resultado é similar para o EC-Earth, ERA-Interim, WRFe 24km e WRFi 24km no grupo oriental, sendo que neste grupo os modelos WRFe 6km e WRFi 6km apresentam uma melhor representação dos percentis de baixa ordem.

Tabela 4.09 – Estatísticas mensais por grupo para a temperatura máxima nos Açores.

(Sombreadas as simulações não sincronizadas com as observações; melhores resultados em bold). EC-WRFe WRFi WRFe ERA-WRFi Earth 24km 6km Interim 24km 6km CORRELATION G. Ocidental 0.92 0.91 0.93 0.97 0.97 0.98 (adi) G. Central 0.90 0.91 0.93 0.96 0.97 0.99 G. Oriental 0.90 0.91 0.92 0.96 0.97 0.98 RMSE G. Ocidental 3.71 3.59 3.32 2.05 2.12 1.63 (°C) G. Central 3.69 3.24 2.99 2.28 1.85 1.39 G. Oriental 3.71 2.99 2.89 2.29 1.65 1.33 BIAS G. Ocidental -1.92 -3.47 -3.32 -3.09 -1.86 -1.49 (°C) -2.70 G. Central -3.34 -2.89 -2.03 -1.63 -1.18 G. Oriental -3.37 -2.64 -2.58 -2.04 -1.21 -1.08 MAE G. Ocidental 3.47 3.32 3.09 1.86 1.92 1.49 (°C) G. Central 3.36 2.92 2.76 2.05 1.66 1.28 G. Oriental 3.38 2.69 2.62 2.06 1.45 1.16 NSTD G. Ocidental 0.79 0.78 0.88 0.83 0.83 0.93 (adi) G. Central 0.72 0.81 0.86 0.79 0.88 0.93



Figura 4.16 – Evolução mensal da temperatura máxima no grupo central. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km.

Na tabela 4.09 apresentamos os resultados estatísticos da média mensal da temperatura máxima. Nesta tabela podemos verificar que em média mensal, os resultados de todos os modelos e reanálise apresentam melhorias significativas, como seria de esperar. No caso do EC-Earth e modelo regional por este forçado, existe uma grande melhoria na correlação atingindo valores de 90%, o que corresponde a eliminar uma grande parte do efeito da dessincronização sinóptica. Esta melhoria também ocorre no caso da reanálise e dos modelos que ela força. A operação de média mensal não tem, naturalmente, impacto no viés, e afecta por igual as diferentes sub-regiões. Como podemos verificar pela tabela, a maioria da variabilidade da temperatura máxima mensal é bem explicada, em especial nos domínios de maior resolução do modelo WRF. De modo geral, todas as estatísticas apresentam melhores resultados nas simulações com 6km de resolução horizontal.



Figura 4.17 – Evolução mensal da temperatura máxima no grupo oriental. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km.

Na figura 4.16 apresentamos o ciclo anual da média da temperatura máxima mensal para o grupo central da Região Autónoma dos Açores. Ambos os campos globais (ERA-I e EC-Earth controlo) apresentam viés negativo, mas uma boa representação do ciclo anual médio. As simulações WRF melhoram a representação do clima observado, especialmente nos meses de Verão e a melhoria é mais significativa na simulação de maior resolução. Os maiores desvios, no grupo central, são encontrados durante os meses de Verão, onde os desvios na ERA-Interim atingem os -3,7 °C em Julho e no EC-Earth os -5,5 °C em Agosto. Estes desvios melhoram significativamente nas respectivas simulações de alta resolução do modelo regional, onde obtemos anomalias de -2,0 °C em Julho para a simulação WRFi 6km e -4,1 °C em Agosto na simulação WRFe 6km. Estes resultados são similares no grupo ocidental. No grupo oriental (Figura 4.17) só nos meses com temperaturas máximas mais elevadas é que existe uma melhoria dos

resultados nas simulações WRFe 6km e WRFi 6km, e saliente-se também que os resultados das simulações WRFe 24km e WRFi 24km também apresentam melhorias em relação ao modelo global e reanálise. De modo geral, as simulações de alta resolução apresentam melhorias em quase todos os meses, sendo as melhorias maiores durante os meses mais quentes.

4.3.4.1.2. Temperatura Mínima

Na tabela 4.10 apresentam-se os dados estatísticos diários obtidos para a temperatura mínima diária. Os resultados mostram uma clara redução de correlação, um ligeiro aumento do erro médio quadrático, mas uma diminuição do viés em relação à temperatura máxima. Nesta variável, não é tão clara a vantagem do aumento de resolução, apesar de se observarem importantes reduções de viés (em relação à reanálise) em todos os grupos e ligeiras reduções de RMSE nos grupos central e oriental. Apesar de não haver sincronização da variabilidade sinóptica, os resultados as correlações obtidas pelo EC-Earth e os modelos por ele forçados, são novamente elevadas, mostrando uma vez mais que grande parte da variação da temperatura na região dos Açores esta associada ao ciclo anual. Olhando apenas para o viés, verificamos que existe sobreavaliação da temperatura mínima na reanálise, WRFi 24km e no EC-Earth (excluindo o grupo ocidental), as restantes simulações apresentam subestimação da temperatura mínima. Na simulação histórica os menores desvios, são encontrados na simulação WRFi 6km no grupo ocidental (-0,10 °C) e no grupo central (-0,56 °C), no entanto é na simulação WRFi 24km que encontramos o menor desvio no grupo oriental (0,04 °C). Na simulação de controlo, os menores desvios são encontrados no próprio modelo global nos grupos central (0,27 °C) e oriental (0,84 °C) e no grupo ocidental (-0,63 °C) o menor desvio em relação às observações é obtido na simulação WRFe 24km. Contrariamente ao que foi observado na temperatura máxima, o sinal do viés varia de caso para caso. No que toca a variabilidade, esta é melhor explica pelas resoluções de 6km nas simulações do modelo regional, apesar de em alguns casos a melhoria em relação às restantes simulações e reanálise não seja muito significativa.

(Sombreadas a										
		EC-	WRFe	WRFe	ERA-	WRFi	WRFi			
		Earth	24km	6km	Interim	24km	6km			
CORRELATION	G. Ocidental	0.68	0.69	0.64	0.85	0.83	0.82			
(adi)	G. Central	0.67	0.65	0.61	0.83	0.80	0.81			
	G. Oriental	0.67	0.61	0.59	0.81	0.77	0.78			
RMSE	G. Ocidental	2.98	2.74	3.57	2.11	2.20	2.21			
(°C)	G. Central	2.71	3.28	3.77	2.64	2.74	2.25			
	G. Oriental	2.75	3.40	3.63	2.96	2.62	2.42			
BIAS	G. Ocidental	-0.85	-0.63	-1.93	0.97	0.98	-0.10			
(°C)	G. Central	0.27	-0.79	-2.27	1.77	0.67	-0.56			
	G. Oriental	0.81	-1.49	-2.07	2.21	0.04	-0.48			
MAE	G. Ocidental	2.35	2.19	2.90	1.64	1.76	1.77			
(°C)	G. Central	2.14	2.68	3.10	2.14	2.25	1.81			
	G. Oriental	2.20	2.80	3.02	2.45	2.12	1.95			

Tabela 4.10 – Estatísticas diárias por grupo para a temperatura mínima nos Açores. (Sombreadas as simulações não sincronizadas com as observações: melhores resultados em **bold**)

NSTD	G. Ocidental	1.02	0.90	0.99	0.94	0.86	0.95
(adi)	G. Central	0.90	0.90	0.95	0.89	0.92	0.95
	G. Oriental	0.84	0.88	0.89	0.88	0.93	0.94



Figura 4.18 – Quartis de 0 a 1 com espaçamento de 0.01 da temperatura mínima. Nos gráficos do topo, apresentamos os resultados da reanálise e simulações WRFi 24km e WRFi 6km para os três grupos. Nos gráficos inferiores, apresentamos os resultados do modelo EC-Earth, WRFe 24km e WRFe 6km para cada grupo.

Na figura 4.18 apresentamos os quartis da temperatura mínima diária para os três grupos. No grupo ocidental, a ERA-Interim e WRFi 24km tendem a sobreavaliar todos os percentis, sendo que os percentis menores apresentam maiores desvios que os percentis superiores, observandose uma boa representação na simulação WRFi 6km, no entanto o acréscimo de resolução não funciona do mesmo modo na simulação de controlo onde os melhores resultados são obtidos pelo modelo global devido a interacção com o viés global. No grupo central a ERA-Interim apresenta sobreavaliação da temperatura mínima em todos os quartis, e o EC-Earth apresenta uma boa concordância entre quartis previstos e observados (excluindo os quartis mais extremos). A simulação WRFi 24km e WRFi 6km apresentam uma boa correlação entre previsões e observações. As simulações WRFe 24km e WRFe 6km apresentam sempre subavaliação, sendo esta quase constante em todos os quartis. No grupo oriental a reanálise e EC-Earth sobreavaliação quase todos os quartis em especial nas temperaturas mínimas menores. A simulação WRFi 6km apresenta sobreavaliação nos quartis inferiores e subavaliação no extremo oposto. A simulação WRFe 6km, apresenta subavaliação em todos os quartis, sendo os quartis inferiores pouco subavaliados.

Tal como aconteceu para a temperatura máxima, existe uma melhoria significativa dos resultados na escala mensal (Tabela 4.11). As correlações de todos os modelos e reanálise sobem para valores que acima os 90%, mesmo nas simulações de controlo (assíncronas), existindo um

decréscimo apreciável do erro médio quadrático e no erro médio absoluto. Na simulação histórica (ERA-Interim ou forçada pela ERA-Interim) a alta resolução tem um impacto positivo nos indicadores, especialmente no viés e no RMSE, mas tal não se verifica na simulação de controlo.

(
		EC-	WRFe	WRFe	ERA-	WRFi	WRFi	
		Earth	24km	6km	Interim	24km	6km	
CORRELATION	G. Ocidental	0.90	0.90	0.90	0.99	0.97	0.98	
(adi)	G. Central	0.91	0.90	0.91	0.98	0.97	0.98	
	G. Oriental	0.89	0.89	0.89	0.96	0.95	0.95	
RMSE	G. Ocidental	1.61	1.46	2.42	1.09	1.24	1.11	
(°C)	G. Central	1.22	2.07	2.70	1.73	1.78	0.97	
	G. Oriental	1.63	2.25	2.54	2.33	1.60	1.34	
BIAS	G. Ocidental	-0.86	-0.63	-1.93	0.96	0.97	-0.10	
(°C)	G. Central	0.12	-1.01	-2.43	1.65	0.48	-0.70	
	G. Oriental	0.82	-1.48	-2.07	2.21	0.04	-0.48	
MAE	G. Ocidental	1.31	1.21	2.15	0.99	1.08	1.00	
(°C)	G. Central	0.96	1.84	2.45	1.65	1.65	0.84	
	G. Oriental	1.34	1.99	2.27	2.22	1.42	1.14	
NSTD	G. Ocidental	1.04	0.94	0.97	1.00	0.94	0.98	
(adi)	G. Central	0.94	0.90	0.90	0.97	0.97	0.97	
	G. Oriental	0.89	0.86	0.84	0.97	0.97	0.96	

Tabela 4.11 – Estatísticas mensais por grupo para a temperatura mínima nos Açores. (Sombreadas as simulações não sincronizadas com as observações; melhores resultados em **bold**)



Figura 4.19 – Evolução mensal da temperatura mínima no grupo central. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km.

Nas figuras 4.19, 4.20 e 4.21 apresentamos a evolução mensal da temperatura mínima média nos diferentes grupos na região dos Açores. No grupo central e oriental, a simulação WRFi 24km apresenta uma comparação quase perfeita com as observações, enquanto a ERA-Interim

sobreavalia a temperatura mínima em todos os meses do ano sendo a sobreavaliação um pouco inferior durante os meses de Verão. O EC-Earth apresenta subavaliação da temperatura mínima nos grupos central e ocidental, e sobreavaliação no grupo oriental. Na simulação de controlo, o WRF tende a subestimar temperatura mínima, apresentando resultados piores que o próprio modelo global, para esta variável, sendo os maiores desvios encontrados durante os meses de Verão. Aqui, o modelo regional forçado pela ERA-Interim, reduz substancialmente o viés da reanálise que apresenta uma clara sobreavaliação da temperatura mínima mensal. Esta redução, infelizmente, não funciona a nosso favor na simulação de controlo, uma vez que o modelo EC-Earth apresenta já por si um viés muito reduzido em relação às observações.



Figura 4.20 – Evolução mensal da temperatura mínima no grupo ocidental. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km.



Figura 4.21 – Evolução mensal da temperatura mínima no grupo oriental. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km.

4.3.4.1.3. Precipitação

Na tabela 4.12 apresentamos os parâmetros estatísticos da precipitação diária na região dos Açores. Na escala diária, todos os modelos apresentam erros médios elevados e fracas correlações, sendo mais evidente nos modelos EC-Earth, WRFe 24km e WRFe 6km. Estes erros estão associados ao facto do modelo EC-Earth ser não sincronizado, o que também explica os maiores erros médios quadráticos. Os melhores resultados da ERA-Interim e das simulações WRFi 24km e WRFi 6km também não são particularmente estranhos, uma vez que a reanálise conta com um sofisticado sistema de assimilação que ajuda a minorar os erros neste caso. No global, o modelo forçado com a ERA-Interim tende a subestimar a precipitação e no caso do WRFe 6km encontramos sobrestimação nos grupos ocidental e central. Olhando para as diferentes ilhas, verificamos que nas ilhas com maior precipitação (Flores, São Jorge e São Miguel) encontramos os maiores erros e que existe uma grande variedade de resultados. No geral, à escala diária os modelos e reanálise apresentam resultados fracos, no entanto note-se que nas simulações de alta resolução (WRFi 6km e WRFe 6km) encontramos os menores desvios, e é nestes domínios que a variabilidade da precipitação na região é melhor explicada.

(Sombreadas a	(sombreadas as simulações não sincronizadas com as observações; memores resultados em bola).										
		EC-	WRFe	WRFe	ERA-	WRFi	WRFi				
		Earth	24km	6km	Interim	24km	6km				
CORRELATION	G. Ocidental	0.05	0.05	0.04	0.63	0.50	0.44				
(adi)	G. Central	0.06	0.05	0.05	0.56	0.44	0.41				
	G. Oriental	0.05	0.04	0.03	0.60	0.45	0.42				
RMSE	G. Ocidental	9.32	9.88	10.96	6.42	7.26	8.14				
(mm/dia)	G. Central	8.70	9.22	10.73	6.57	7.28	8.44				
	G. Oriental	9.47	9.87	10.67	7.33	8.13	8.54				
BIAS	G. Ocidental	-0.32	-0.29	0.09	-0.88	-1.06	-0.66				
(mm/dia)	G. Central	-0.55	-0.63	0.45	-0.86	-1.13	-0.16				
	G. Oriental	-1.36	-1.40	-0.82	-1.41	-1.74	-1.15				
MAPE	G. Ocidental	1.48	1.54	1.61	0.79	0.88	0.97				
(%)	G. Central	1.43	1.47	1.74	0.86	0.92	1.11				
	G. Oriental	1.30	1.35	1.45	0.83	0.91	0.99				
NSTD	G. Ocidental	0.61	0.78	1.03	0.60	0.70	0.92				
(adi)	G. Central	0.54	0.67	1.00	0.57	0.64	1.00				
	G. Oriental	0.41	0.51	0.71	0.48	0.51	0.76				

Tabela 4.12 – Estatísticas diárias por grupo para a precipitação nos Açores.

Na figura 4.22 apresentamos os quartis de 0 a 0,99 com espaçamento de 0,01 entre eles para os três grupos de ilhas na região dos Açores. Em todos os grupos a reanálise e o EC-Earth, apresentam subestimações em todos os quartis, e esta subestimação é maior nos quartis mais elevados. Os resultados das simulações WRFi 24km e WRFe a 24km apresentam algumas melhorias em relação aos seus forçamentos, no entanto ainda apresentam fortes subestimações nos percentis mais elevados. Nas simulações de alta resolução, os resultados são semelhantes no grupo oriental e central, havendo uma redução no viés da simulação WRFe 6km em relação à simulação WRFi 6km no grupo ocidental. Note-se também, que no grupo central a simulação WRFe 6km apresenta sobreavaliação em praticamente todos os quartis. Todas as simulações e reanálise são incapazes de reproduzir os eventos de precipitação mais extrema em cada grupo. Em quase todos os casos, os modelos subestimam a precipitação ocorrida, e como podemos verificar, a alta resolução ajuda bastante a mitigar as anomalias negativas que existe na reanálise, modelo global e no modelo regional na resolução de 24 km.



Figura 4.22 – Quartis de 0 a 0,99 com espaçamento de 0.01 para a precipitação. Nos gráficos no topo apresentamos os resultados da reanálise ERA-Interim, WRFi 24km e WRFi 6km para cada grupo. Nos gráficos em baixo encontramos os resultados do modelo EC-Earth, WRFe 24km e WRFe 6km para cada grupo.

Na tabela 4.13 apresentamos os resultados estatísticos para a precipitação média mensal. Como podemos verificar à escala mensal, os resultados mostram uma melhoria bastante significativa nas estatísticas da precipitação. A esta escala temporal o EC-Earth, WRFe 24km e WRFe 6km continuam a apresentar correlações fracas apesar da grande melhoria em relação à escala diária (simulações não sincronizadas). Os erros médios quadráticos reduzem-se substancialmente, no caso do WRFe 6km os erros rondam os 3 mm/dia e para o WRFi 6km esse erro ronda os 2 mm/dia. Isto traduz-se em erros que rondam os 64 a 83% na simulação WRFe 6km e erros menores que 51% no WRFi 6km. Continuamos a encontrar sobreavaliação da precipitação ocorrida no grupo ocidental e central na simulação de resolução mais alta forçada com o EC-Earth. A variabilidade na região é melhor explicada pelas simulações de alta resolução do WRF, sendo que no grupo ocidental a variabilidade é melhor representada pela simulação WRFe 24km no conjunto das corridas assíncronas.

(Sombreadas a	(sombreadas as simulações não sincronizadas com as observações; meinores resultados em bola).										
		EC-	WRFe	WRFe	ERA-	WRFi	WRFi				
		Earth	24km	6km	Interim	24km	6km				
CORRELATION	G. Ocidental	0.31	0.30	0.30	0.78	0.76	0.67				
(adi)	G. Central	0.22	0.21	0.21	0.80	0.73	0.71				
	G. Oriental	0.29	0.25	0.23	0.81	0.71	0.66				
RMSE	G. Ocidental	2.60	2.85	2.84	1.86	1.94	1.84				
(mm/dia)	G. Central	2.70	2.89	3.38	1.82	2.06	2.08				
	G. Oriental	2.97	3.14	3.04	2.29	2.65	2.32				
BIAS	G. Ocidental	-0.29	-0.25	0.12	-0.88	-1.06	-0.67				
(mm/dia)	G. Central	-0.57	-0.62	0.49	-0.90	-1.17	-0.16				
	G. Oriental	-1.36	-1.39	-0.81	-1.41	-1.75	-1.16				
MAPE	G. Ocidental	0.59	0.65	0.64	0.39	0.41	0.39				
(%)	G. Central	0.65	0.70	0.83	0.40	0.47	0.49				
	G. Oriental	0.65	0.70	0.69	0.48	0.57	0.51				
NSTD	G. Ocidental	0.83	1.06	1.17	0.67	0.75	0.83				
(adi)	G. Central	0.72	0.82	1.13	0.62	0.65	0.93				
	G. Oriental	0.55	0.63	0.78	0.53	0.54	0.72				

Tabela 4.13 – Estatísticas mensais por grupo para a precipitação nos Açores.



Figura 4.23 – Evolução mensal da precipitação no grupo central. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km.

Nos gráficos 4.23, 4.24 e 4.25 apresentamos a evolução mensal da precipitação para os diferentes grupos. No grupo central, verificamos rapidamente que as simulações WRFe 6km e WRFi 6km, em especial esta ultima, ajudam bastante a mitigar a falta de precipitação das restantes simulações e reanálise. Olhando mês a mês, como seria de espera nos meses de menor precipitação o desvio encontrado é menor. No grupo central, na simulação WRFi 6km, podemos verificar que excluindo os últimos quatro meses do ano onde existe subavaliação da precipitação ocorrida, os resultados são quase perfeitos. Nos restantes grupos a simulação WRFi 6km apresenta subavaliação em todos os meses (em especial no grupo oriental), mas de modo geral é nesta simulação que encontramos os menores desvios. Para a simulação WRFe 6km, existe uma

forte sobreavaliação da precipitação nos primeiros quatro meses e nos restantes meses existe alguma subavaliação. Este comportamento é similar no grupo ocidental. No grupo oriental, esta simulação apresentada subavaliações em todos os meses, sendo estas particularmente evidentes entre Agosto e Dezembro.



Figura 4.24 – Evolução mensal da precipitação no grupo ocidental. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km.



Figura 4.25 – Evolução mensal da precipitação no grupo oriental. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km.

4.3.4.2. Região Autónoma do Madeira

4.3.4.2.1. Temperatura Máxima

A tabela 4.14 sumariza os resultados da temperatura máxima diária na ilha da Madeira e Porto Santo na Região Autónoma da Madeira. Nas simulações históricas, a correlação atinge os 84% na simulação WRFi 6km na Madeira e 91% na ERA-Interim no Porto Santo, o RMSE é claramente inferior na simulação WRFi 6km em ambas as ilhas. O incremento de resolução também melhora claramente os resultados dos dois indicadores insensíveis à sincronização (o viés e o NSTD), com uma redução do viés em cerca de 1,5 °C entre os dados globais e as simulações WRF-6km, quer na simulação histórica quer no controlo e, talvez mais importante, uma recuperação da variabilidade para valores muito próximos das observações em ambas as simulações (*NSTD* \approx 1).

		EC- Earth	WRFe 24km	WRFe 6km	ERA- Interim	WRFi 24km	WRFi 6km
CORRELATION	Madeira	0.65	0.64	0.59	0.80	0.77	0.84
(adi)	Porto Santo	0.75	0.75	0.72	0.91	0.87	0.85
RMSE	Madeira	5.53	5.34	4.29	4.09	4.01	2.54
(°C)	Porto Santo	4.24	4.27	3.20	2.95	2.98	2.05
BIAS	Madeira	-4.63	-4.39	-2.47	-3.23	-3.07	-1.13
(°C)	Porto Santo	-3.77	-3.79	-2.36	-2.65	-2.58	-1.29
MAE	Madeira	4.82	4.61	3.52	3.47	3.35	2.03
(°C)	Porto Santo	3.82	3.84	2.66	2.68	2.61	1.53
NSTD	Madeira	0.58	0.57	0.99	0.63	0.64	1.02
(adi)	Porto Santo	0.72	0.72	0.92	0.80	0.79	0.96

Tabela 4.14 – Estatísticas diárias para a temperatura máxima na Região Autónoma da Madeira. (Sombreadas as simulações não sincronizadas com as observações; melhores resultados em **bold**).

Na figura 4.26 apresentamos os percentis da temperatura máxima diária. Na Madeira, todos os resultados indicam que as simulações WRF de alta resolução tendem a subestimar as temperaturas nos percentis 10 a 90 e a sobreavaliar a temperatura nos extremos. No caso de Porto Santo, todos as simulações e reanálise apresentam subestimação em todos os percentis, esta subestimação é quase constante nas simulações de alta resolução, havendo um desvio um pouco superior nos percentis mais elevados. As restantes simulações apresentam um viés que aumenta de forma quase constante à medida que o percentil aumenta, mostrando que o modelo tende a subestimar mais a temperatura nos dias mais quentes. Confirmando a vantagem das simulações WRF a 6km no que se refere à variabilidade (NSTD), é muito claro que as simulações WRF a 6km representam muito melhor o histograma da temperatura máxima que as simulações globais, observando-se que o histograma das simulações WRF a 24km é muito próximo dos resultados globais.

Na escala mensal, como seria de esperar, os resultados obtidos melhoram substancialmente no que se refere à correlação e ao RMSE (Tabela 4.15), indicando uma excelente representação do ciclo anual, especialmente nas simulações de alta resolução onde os

erros médios quadráticos decrescem perto de 1,0 °C. Apesar deste decréscimo, continuamos a verificar que existe um erro particularmente elevado, em especial nas altas resoluções do modelo regional, EC-Earth e ERA-Interim. A variabilidade mensal na região é particularmente bem representada pelas simulações de alta resolução do modelo regional.



Figura 4.26 – Quartis de 0 a 1 com espaçamento de 0.01 para a temperatura máxima. Nos gráficos do topo, apresentamos os resultados da reanálise e simulações WRFi 24km e WRFi 6km para a Madeira e Porto Santo. Nos gráficos inferiores, apresentamos os resultados do modelo EC-Earth, WRFe 24km e WRFe 6km para as duas ilhas na região da Madeira.

Como podemos verificar na figura 4.27, apesar do óbvio viés negativo em todas as simulações e reanálise, o ciclo mensal da temperatura máxima é bem representado, e as simulações de alta resolução do modelo regional tendem a atenuar fortemente o desvio existente entre observações e previsões, sendo esta correcção muito mais evidente durante a Primavera e Verão. Para a ilha da Madeira, todas as simulações regionais de baixa resolução e forçamentos apresentam desvios maiores em relação às observações no Verão e Primavera (chegando a atingir uma subestimação superior a 5,0 °C em JJA). As simulações de alta resolução apresentam um viés quase constante ao longo dos meses, sendo a subestimação um pouco maior durante o Verão.

Para a ilha de Porto Santo, encontramos os mesmos resultados sendo o viés neste caso um pouco menor.

				-			
		EC-	WRFe	WRFe	ERA-	WRFi	WRFi
		Earth	24km	6km	Interim	24km	6km
CORRELATION	Madeira	0.81	0.80	0.85	0.91	0.90	0.95
(adi)	Porto Santo	0.86	0.86	0.91	0.96	0.95	0.98
RMSE	Madeira	5.01	4.80	3.10	3.55	3.43	1.64
(°C)	Porto Santo	4.02	4.05	2.62	2.79	2.75	1.43
BIAS	Madeira	-4.61	-4.36	-2.46	-3.21	-3.05	-1.14
(°C)	Porto Santo	-3.76	-3.79	-2.35	-2.65	-2.57	-1.28
MAE	Madeira	4.63	4.39	2.69	3.24	3.09	1.41
(°C)	Porto Santo	3.76	3.79	2.37	2.65	2.57	1.29
NSTD	Madeira	0.65	0.64	0.97	0.71	0.72	1.02
(adi)	Porto Santo	0.73	0.73	0.83	0.80	0.79	0.88

Tabela 4.15 – Estatísticas mensais para a temperatura máxima na Região Autónoma da Madeira. (Sombreadas as simulações não sincronizadas com as observações; melhores resultados em **bold**).



Figura 4.27 – Evolução mensal da temperatura máxima na ilha da Madeira. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km.

4.3.4.2.2. Temperatura Mínima

As estatísticas da temperatura mínima diária são apresentadas da tabela 4.16, revelando correlações semelhantes àquelas que encontramos na temperatura máxima e erros médios quadráticos menores, em especial no EC-Earth e no modelo regional por ele forçado. Os desvios encontrados em relação às observações mostram uma redução de viés, sendo o viés negativo para as simulações de alta resolução forçadas pelo EC-Earth, mas quase nulo na simulação WRFi 6km na ilha da Madeira. Tal como, acontece nos Açores, a alta resolução não melhora a

representação da temperatura mínima nas simulações forçadas pelo EC-Earth. No entanto, convém salientar, que é nas simulações de alta resolução do modelo regional, que encontramos a melhor representação da variabilidade diária da temperatura mínima na região da Madeira.

		EC-	WRFe	WRFe	ERA-	WRFi	WRFi
		Earth	24km	6km	Interim	24km	6km
CORRELATION	Madeira	0.69	0.66	0.63	0.83	0.76	0.81
(adi)	Porto Santo	0.74	0.71	0.70	0.86	0.76	0.82
RMSE	Madeira	2.57	2.66	3.14	2.70	2.91	2.21
(°C)	Porto Santo	2.01	2.09	3.22	1.92	2.20	2.16
BIAS	Madeira	0.56	0.73	-1.17	1.91	1.93	0.13
(°C)	Porto Santo	0.14	0.03	-2.37	1.17	1.07	-1.31
MAE	Madeira	2.05	2.12	2.54	2.29	2.45	1.77
(°C)	Porto Santo	1.54	1.63	2.74	1.44	1.75	1.81
NSTD	Madeira	0.74	0.72	0.95	0.78	0.77	0.97
(adi)	Porto Santo	0.79	0.78	0.89	0.85	0.82	0.89

Tabela 4.16 – Estatísticas diárias para a temperatura mínima na Região Autónoma da Madeira. (Sombreadas as simulações não sincronizadas com as observações; melhores resultados em **bold**).



Figura 4.28 – Quartis de 0 a 1 com espaçamento de 0.01 da temperatura mínima. Nos gráficos do topo, apresentamos os resultados da reanálise e simulações WRFi 24km e WRFi 6km para a Madeira e Porto Santo. Nos gráficos inferiores, apresentamos os resultados do modelo EC-Earth, WRFe 24km e WRFe 6km para as duas ilhas na região da Madeira.

Analisando os quartis apresentados graficamente na figura 4.28 verificamos que na Madeira existe sobrestimação dos quantis inferiores, ou seja, o modelo não consegue representar bem os períodos com dias mais frios. Neste caso, podemos ainda estar a ser vitimas da falta de resolução que leva a uma topografia ainda muito suavizada no modelo regional, uma vez que o ponto mais alto representado no modelo situa-se pouco acima dos 1000 metros. Nesta variável não se observa uma clara vantagem da alta resolução: no Porto Santo as simulações de baixa resolução apresentam um histograma mais próximo das observações, na Madeira os resultados são mistos, com zonas do histograma melhor representadas por cada simulação. Os histogramas do WRF a 24km são quase coincidentes com os das simulações globais.

À escala mensal (Tabela 4.17), verificamos uma melhoria significativa em termos de correlação. Os erros médios absolutos decrescem entre 3% a 8% em todas as simulações e forçamentos, e verificamos também, que existe um decaimento do erro médio quadrático em especial nas simulações de alta resolução do modelo regional. O viés encontrado varia entre os 0,04 °C (Porto Santo na simulação WRFe 24km) e os -2,37 °C (Porto Santo na simulação WRFe 6km). A variabilidade mensal é bem explicada por todas as simulações e reanálise, sendo a variabilidade mensal melhor explicada nas altas resoluções do modelo regional.

		EC- Earth	WRFe 24km	WRFe 6km	ERA- Interim	WRFi 24km	WRFi 6km
CORRELATION	Madeira	0.85	0.84	0.86	0.95	0.92	0.96
(adi)	Porto Santo	0.90	0.89	0.92	0.98	0.94	0.98
RMSE	Madeira	1.75	1.85	2.12	2.16	2.28	1.25
(°C)	Porto Santo	1.16	1.22	2.59	1.31	1.43	1.44
BIAS	Madeira	0.57	0.75	-1.16	1.92	1.94	0.13
(°C)	Porto Santo	0.15	0.04	-2.37	1.17	1.08	-1.31
MAE	Madeira	1.43	1.52	1.82	1.98	2.03	1.07
(°C)	Porto Santo	0.92	0.98	2.37	1.17	1.18	1.32
NSTD	Madeira	0.79	0.75	0.92	0.84	0.81	0.96
(adi)	Porto Santo	0.81	0.78	0.86	0.88	0.82	0.88

Tabela 4.17 – Estatísticas mensais para a temperatura mínima na Região Autónoma da Madeira. (Sombreadas as simulações não sincronizadas com as observações; melhores resultados em **bold**).

Na figura 4.29 apresentamos as médias mensais da temperatura mínima diária, verificamos um excelente comportamento das simulações históricas em alta resolução (WRFi 6km) e resultados mistos nas simulações de controlo, com clara vantagem para a alta resolução no Inverno mas desvantagem no período de Verão. Em geral, é clara a falta de amplitude do ciclo anual na simulação EC-Earth, parcialmente corrigida na simulação WRFe 6km, mas com viés negativo em todos os meses.



Figura 4.29 – Evolução mensal da temperatura mínima na ilha da Madeira. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km.

4.3.4.2.3. Precipitação

As estatísticas da precipitação diária na região da Madeira estão sumarizadas na tabela 4.18. Nas simulações históricas (ERA-Interim ou por elas forçadas) as correlações são significativas mas baixas (61% na Madeira), o que traduz a existência de erros de sincronização da passagem de sistemas meteorológicos e justifica valores elevados do RMSE. A precipitação apresenta viés negativo em todas as simulações, mas o seu valor é bastante reduzido nas simulações de maior resolução. Estas simulações, no caso da Madeira, apresenta, também melhorias significativas na representação da variabilidade, muito subestimada nos modelos globais e no WRF a 24km, e ainda subestimada a 6km. No Porto Santo, no entanto, as simulações WRF a 6km têm tendência para sobrestimar a variabilidade.

(sombleadas as sinulações não sincionizadas com as observações, memores resultados em bola).							
		EC-	WRFe	WRFe	ERA-	WRFi	WRFi
		Earth	24km	6km	Interim	24km	6km
CORRELATION	Madeira	0.04	0.04	0.05	0.61	0.53	0.52
(adi)	Porto Santo	0.03	0.02	0.02	0.65	0.54	0.45
RMSE	Madeira	11.39	11.68	14.02	9.95	10.12	9.77
(mm/dia)	Porto Santo	4.34	4.87	6.36	2.72	3.07	4.07
BIAS	Madeira	-2.75	-2.75	-1.07	-2.60	-2.82	-1.30
(mm/dia)	Porto Santo	-0.16	-0.20	-0.02	-0.04	-0.29	-0.13
MAPE	Madeira	1.18	1.20	1.58	0.88	0.88	0.95
(%)	Porto Santo	1.58	1.59	1.76	0.91	0.94	1.07
NSTD	Madeira	0.23	0.33	0.88	0.22	0.26	0.76
(adi)	Porto Santo	0.69	0.95	1.56	0.66	0.69	1.17

Tabela 4.18 – Estatísticas diárias para a precipitação na Região Autónoma da Madeira. (Sombreadas as simulações não sincronizadas com as observações: melhores resultados em **bold**)

Analisando as diferenças entre os quartis observados e previstos (Figura 4.30) verificamos que todos os quartis são subestimados na ilha da Madeira e Porto Santo. As simulações a 6km, no entanto, melhoram muito significativamente a representação dos histogramas de precipitação diária. Note-se que ao contrário do que aconteceu nos Açores, para a região da Madeira os percentis previstos e observados só começam a divergir após o percentil 10, pois este percentil corresponde a ausência de chuva. De modo geral, os modelos e reanálise são incapazes de reproduzir com precisão os eventos de precipitação mais extrema ocorridos na região da Madeira.



Figura 4.30 – Quartis de 0 a 0,99 com espaçamento de 0.01 da precipitação. Nos gráficos do topo, apresentamos os resultados da reanálise e simulações WRFi 24km e WRFi 6km para a Madeira e Porto Santo. Nos gráficos inferiores, apresentamos os resultados do modelo EC-Earth, WRFe 24km e WRFe 6km para as duas ilhas na região da Madeira.

Na escala mensal (Tabela 4.19) verificamos que existe uma melhoria significativa da correlação e os erros médios quadráticos reduzem-se significativamente. Os erros médios absolutos decrescem para valores inferiores a 100% e observamos que à escala mensal o viés sofre um ligeiro aumento. As simulações a 6km continuam a apresentar vantagem em indicadores muito relevantes (BIAS, NSTD, RMSE, na Madeira).
(Sombleadas a	s sinnulações na			obsei vaçue	s, memores	resultatios	en bolu).
		EC-	WRFe	WRFe	ERA-	WRFi	WRFi
		Earth	24km	6km	Interim	24km	6km
CORRELATION	Madeira	0.28	0.21	0.22	0.76	0.71	0.69
(adi)	Porto Santo	0.38	0.30	0.22	0.86	0.82	0.78
RMSE	Madeira	5.68	5.75	5.51	5.22	5.36	4.22
(mm/dia)	Porto Santo	1.13	1.26	1.58	0.55	0.69	0.73
BIAS	Madeira	-3.08	-3.09	-1.41	-2.94	-3.15	-1.62
(mm/dia)	Porto Santo	-0.16	-0.21	-0.03	-0.04	-0.28	-0.13
MAPE	Madeira	0.84	0.87	0.90	0.70	0.75	0.57
(%)	Porto Santo	0.75	0.81	0.94	0.35	0.44	0.46
NSTD	Madeira	0.18	0.23	0.61	0.18	0.19	0.52
(adi)	Porto Santo	0.79	0.92	1.31	0.79	0.71	1.00

Tabela 4.19 – Estatísticas mensais para a precipitação na Região Autónoma da Madeira.



Figura 4.31 – Evolução mensal da precipitação na ilha da Madeira. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km.

Olhando para as precipitações mensais médias ocorridas da ilha da Madeira (Figura 4.31) verificamos que apenas nos meses Janeiro e Março existe uma sobrestimação da precipitação ocorrida na simulação de controlo (WRFe 6km), sendo observada subestimação em todos os outros meses e simulações. As simulações a 6 km têm, no entanto, muito valor acrescentado, mitigando o deficit de precipitação dos campos globais, uma indicação da forte influência topográfica na precipitação nesta região. É provável que houvesse vantagem em resoluções ainda mais altas. No Porto Santo (Figura 4.32) os resultados são bastante melhores, nos meses de Novembro e Dezembro existe uma forte subavaliação da precipitação ocorrida em especial nas simulações feitas usando dados do modelo global como forçamento (2,5 mm/dia observados e 1,5 mm/dia previstos). Nos restantes meses existe uma boa correspondência entre os dados

observados e previstos. O ciclo anual é muito melhor representado pelas altas resoluções, aparecendo fortemente atenuado nas outras simulações.



Figura 4.32 – Evolução mensal da precipitação na ilha de Porto Santo. No topo resultados da reanálise e modelos WRFi 24km e WRFi 6km. No gráfico inferior resultados do modelo EC-Earth e simulações WRFe 24km e WRFe 6km.

4.3.4.3. Apreciação global

Os resultados mostram que a ERA-Interim é superior ao EC-Earth. Este facto não é estranho porque apesar de ambos terem como base o IFS, a reanálise apresenta uma grande vantagem em relação ao EC-Earth: a assimilação de dados. Ao usar assimilação, a reanálise compensa deficiências no pacote físico do IFS. É claro, por outro lado, que só no caso da simulação histórica (a reanálise ou o WRF forçado por reanálise) tem sentido calcular indicadores de erro que dependem da sincronização das séries. De modo geral, também verificamos que a simulação de regionalização na sua resolução mais grosseira apresenta resultados muito semelhantes aos do forçamento, o que resulta quer da fraca influência topográfica nessa resolução, quer da utilização de *nudging*. De modo geral, o modelo regional na sua mais alta resolução (WRFe 6km e WRFi 6km) apresenta melhorias significativas em relação aos forçamentos e à simulação de baixa resolução, principalmente no que toca à precipitação.

Olhando agora só para o domínio de alta resolução do modelo regional forçado com EC-Earth à escala mensal e sazonal, simulação e período temporal com maior interesse para a secção seguinte uma vez que será a que iremos utilizar para avaliar as alterações climáticas. Na região dos Açores, o modelo consegue modelar bem o ciclo anual da temperatura máxima e mínima, mas com subavaliação da temperatura máxima em todos os meses e estações por cerca de 2,5 °C a 3,0°C. As mesmas conclusões podem ser aplicadas à temperatura mínima. Na precipitação, existe sobreavaliação da precipitação no grupo ocidental e central, sendo o viés pouco significativo no grupo ocidental e no grupo oriental o modelo tende a subestimar a precipitação ocorrida. Saliente-se que em todos os grupos a precipitação ocorrida durante o Verão é bastante subestimada e que para o grupo central e ocidental existe forte sobrestimação nos primeiros quatro meses do ano. Na região da Madeira, a temperatura máxima também é subestimada existindo um erro maior que nos Açores apesar da alta resolução na Madeira oferecer um ganho maior entre a baixa e alta resolução do modelo. Encontramos subestimação da temperatura mínima na região sendo o erro de -1,17 °C na Madeira e de -2,37 °C em Porto Santo. Tal como acontece nos Açores, apesar da subestimação, os resultados mostram que o ciclo anual médio é bem representado. Na ilha da Madeira, a alta resolução é particularmente relevante na precipitação, pois sem a mesma o ciclo anual é muito sub-representado. Mesmo assim ainda existe um viés considerável na ilha da Madeira, sendo a precipitação ocorrida na ilha de Porto Santo bastante bem capturada. Globalmente, o modelo regional na resolução de 6km consegue capturar bem o ciclo anual da precipitação e temperatura nas Regiões Autónomas dos Açores e Madeira e apresenta uma melhor representação estatística das distribuições observadas.

4.3.5. Avaliação do Clima Futuro

4.3.5.1. Introdução

Devido à sua alta vulnerabilidade e baixa capacidade de adaptação, as ilhas têm de estar atentas às alterações climáticas futuras e tentar, na medida do possível, mitigar os efeitos que elas terão nas suas regiões. Apesar de as ilhas serem responsáveis apenas por uma ínfima parte da libertação de gases com efeito de estufa, muitas ilhas já começaram a desviar recursos do desenvolvimento económico e a aplicá-los em medidas de adaptação às potenciais alterações climáticas que as poderão afectar (Nurse e Moore, 2005).

As alterações climáticas poderão desencadear nas ilhas uma série de impactos adversos, tais como perdas de terra nas regiões costeiras, erosão acelerada, secas e inundações mais frequentes, redução na quantidade e qualidade dos recursos hídricos, redução da produção agrícola devido a variações na precipitação, deslocamento de pessoas e infra-estruturas para o interior das ilhas e aumento de algumas doenças como o dengue e malária durante a estação quente. O turismo também pode ser afectado devido à perda de costa e devido a possíveis perdas de atracções ecológicas como recifes de corais. Nesta parte do trabalho, pretendemos estudar as possíveis alterações climáticas que poderão vir a ocorrer nas Regiões Autónomas dos Açores e Madeira. Apesar da análise apresentada se focar exclusivamente em variáveis meteorológicas os resultados podem contribuir para a definição de estratégias de adaptação destas regiões às alterações climáticas.

Para avaliar as alterações climáticas nas ilhas dos Açores e Madeira, vamos analisar dados da temperatura média, máxima e mínima, precipitação, vento e humidade à escala diária, mensal e sazonal usando o cenário RCP8.5 como forçamento radiativo. Na secção anterior, as simulações regionais foram comparadas ponto a ponto com as observações. Nesta secção, em vez de usar uma comparação ponto a ponto optou-se por obter médias (somas no caso da precipitação) de

todos os pontos de modelo sobre as ilhas, usando a mascara terra-mar do modelo regional como referência. Note-se que a ilha do Corvo não é representada no modelo, mesmo na resolução de 6 km, devido à sua pequena área (aproximadamente 17 km²). Neste caso, foi escolhido o ponto (de mar) mais próximo na grelha do modelo regional da localização do Corvo. De forma a simplificar as conclusões, nos Açores os resultados são agregados na maioria das vezes por grupos de ilhas. Esta agregação só é possível devido à proximidade que existe entre as ilhas de cada grupo. Apesar de haver agregação de resultados nos Açores, serão apresentados resultados ilha a ilha em algumas tabelas. Ao contrário da secção anterior onde as temperaturas mínimas, máximas e precipitação se referiam ao período das 09 UTC às 09 UTC, os resultados subsequentemente apresentados referem-se ao período das 00 UTC às 00 UTC. As temperaturas máximas e mínimas e média foram calculadas a partir das saídas horárias do modelo, não havendo lugar a nenhum tipo de correcção altimétrica. A precipitação foi desacumulada dia a dia e a humidade específica e as componentes zonal e meridional do vento foram obtidas recorrendo às saídas horárias do modelo. Os dados analisados referem-se apenas aos domínios com 6 km de resolução horizontal e a simulação WRFe 6km, validada na secção anterior, será usada como referência para o clima presente (controlo) na Região Autónoma dos Açores e Madeira.

4.3.5.2. Região Autónoma dos Açores

4.3.5.2.1. Temperatura Média

Na tabela 4.20 apresentamos a média (MED), desvio padrão (STD) e a anomalia da temperatura média (ΔT) e do desvio padrão (ΔSTD) para cada ilha, e os resultados agregados por grupo para a região dos Açores. Os resultados nos períodos futuros indicam que existe uma tendência de aquecimento na região dos Açores. Para o meio do século XXI o aquecimento estimado é próximo de 1 °C, encontramos os valores mínimos no grupo ocidental (Corvo, 0,97 °C; Flores, 1,14 °C) e os valores máximos no grupo oriental (São Miguel, 1,25 °C; Santa Maria, 1,29 °C). No fim do século XXI, estes aumentos são significativamente maiores, sendo a subida menor registada na ilha do Corvo (2,37 °C), e as maiores encontrados nas ilhas Santa Maria (2,77 °C) e São Miguel (2,73 °C). Convém não esquecer que o Corvo não é representado no modelo e por esta razão. Apesar de existirem algumas diferenças, os aumentos de temperatura média previstos não diferem muito entre os diferentes grupos, existindo um aumento de temperatura menor no grupo ocidental (1,06 °C em 2040-2060 e 2,50°C em 2080-2010), maior no grupo oriental (1,27 °C em 2040-2060 e 2,75 °C em 2080-2010) e o aquecimento registado no grupo central é ligeiramente inferior ao que encontramos no grupo oriental. Estes últimos resultados parecem apontar para um aquecimento na região dos Açores que depende da longitude. O aquecimento registado entre o presente e o período 2040-2060 indica uma tendência de aumento aproximada de 0,4 °C/década. Esta tendência praticamente duplica entre 2040-2060 e 2080-2100 para valores aproximados a 0,7 °C/década. Os desvios padrão encontrados mostram que a variabilidade da temperatura média diária também será maior nos dois períodos futuros, aumentando em cerca de 3 a 4% para o meio do século XXI e entre 7 e 8% no fim do século. O aumento da variabilidade no período 2040-2060 a 2080-2100 excede o verificado entre 1889-2010 e 2040-2060.

	Controlo	RCP 8.	5 2040	RCP 8.	5 2080	Controlo	RCP 8	.5 2040	RCP 8.5 2080		
	MED (°C)	MED (°C)	ΔT (°C)	MED (°C)	ΔT (°C)	STD (°C)	STD (°C)	ΔSTD (adi)	STD (°C)	ΔSTD (adi)	
G.Ocidental	14.81	15.87	1.06	17.31	2.50	3.42	3.51	0.03	3.70	0.08	
G.Central	13.96	15.17	1.21	16.65	2.69	3.17	3.29	0.04	3.43	0.08	
G.Oriental	14.65	15.92	1.27	17.40	2.75	2.94	3.02	0.03	3.13	0.07	
Flores	13.55	14.69	1.14	16.17	2.62	3.41	3.50	0.03	3.67	0.08	
Corvo	16.08	17.05	0.97	18.45	2.37	2.92	3.09	0.06	3.36	0.15	
Faial	14.02	15.21	1.19	16.71	2.69	3.09	3.22	0.04	3.36	0.09	
Graciosa	15.05	16.20	1.15	17.67	2.62	3.04	3.19	0.05	3.32	0.09	
Pico	13.05	14.29	1.24	15.79	2.74	3.18	3.30	0.04	3.44	0.08	
São Jorge	14.12	15.32	1.20	16.80	2.68	3.08	3.22	0.04	3.35	0.09	
Terceira	13.57	14.80	1.23	16.28	2.71	3.11	3.22	0.04	3.36	0.08	
São Miguel	13.80	15.05	1.25	16.53	2.73	2.89	2.97	0.03	3.10	0.07	
Santa Maria	15.50	16.79	1.29	18.27	2.77	2.74	2.81	0.03	2.92	0.06	

Tabela 4.20 – Estatísticas básicas da temperatura média diária prevista pelas simulações de controlo e do cenário RCP8.5.

Na tabela 4.21 apresentamos os percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99, para a simulação do clima presente e as duas simulações do clima futuro, da temperatura média diária para os três grupos de ilhas Açorianos. Na figura 4.33 fazemos uma comparação visual entre os histogramas obtidos na simulação para os períodos futuros e a simulação do clima presente. No grupo ocidental os histogramas revelam um aumento da temperatura média com uma pequena variação da forma do histograma, os aumentos são maiores nos percentis mais elevados havendo um ligeiro alongamento da cauda nos percentis mais elevados e uma ligeira diminuição nos percentis inferiores. No grupo central e oriental o comportamento encontrado é semelhante.

Tabela 4.21 – Percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99 previstos pelas simulações de controlo e do cenário RCP8.5.

		P ₁	P₅	P ₁₀	P 25	P ₅₀	P ₇₅	P ₉₀	P ₉₅	P ₉₉
G.Ocidental	Controlo	6.31	8.92	10.35	12.56	14.86	17.36	19.36	20.20	21.32
	2040-2060	7.33	9.99	11.32	13.50	15.83	18.58	20.54	21.43	22.62
	2080-2100	8.86	11.29	12.57	14.64	17.09	20.30	22.31	23.15	24.37
G.Central	Controlo	6.46	8.60	9.76	11.72	13.98	16.48	18.06	18.82	20.07
	2040-2060	7.58	9.60	10.81	12.79	15.22	17.77	19.40	20.21	21.56
	2080-2100	8.99	11.02	12.17	14.13	16.54	19.49	21.18	21.96	23.18
G.Oriental	Controlo	7.87	9.77	10.74	12.52	14.71	16.94	18.51	19.22	20.38
	2040-2060	8.83	10.84	11.90	13.72	16.00	18.30	19.86	20.56	21.63
	2080-2100	10.32	12.20	13.29	15.10	17.41	19.99	21.53	22.25	23.27

A evolução mensal da temperatura média diária mensal e anomalias nos cenários climáticos em relação à simulação de controlo para o grupo ocidental são apresentados na figura 4.34. No grupo ocidental para o período 2040 a 2060 existe uma tendência menor de aquecimento entre Fevereiro e Abril, enquanto nos restantes meses existem aquecimentos superiores a 1,0 °C, sendo os meses de Outubro e Novembro os que apresentam maior aquecimento. Estes resultados mensais traduzem-se num aquecimento um pouco mais pronunciado durante o Verão e Outono. Olhando para o futuro mais longínquo os resultados não são muito diferentes. Os primeiros

meses do ano continuam a apresentar subidas de temperaturas menores e o mês de Agosto apresenta o maior aumento de temperatura média (3,20 °C). Comparando os dois cenários entre 2040-2060 e 2080-2100, existe uma taxa de aquecimento mais pronunciada entre Julho e Janeiro, havendo um aumento perto dos 2,0 °C entre Julho e Setembro.



Figura 4.33 – Histogramas da temperatura média prevista para os três grupos de ilhas da Região Autónoma dos Açores, nos dois cenários (linhas a azul e preto) e da simulação de controlo (linha a vermelho).



Figura 4.34 – No topo a evolução mensal das temperaturas médias previstas no grupo ocidental e no gráfico inferior as anomalias mensais em relação à simulação de controlo.

Continuando a comparar os cenários, verificamos que entre Março e Maio o aquecimento que ocorre entre 1981-2010 e 2040-2060 não difere muito do que se regista entre 2040-2060 e 2080-2100. Estes resultados traduzem-se à escala sazonal (não mostrado) num aumento perto dos 3,0 °C durante a Verão e Outono e a aumentos menores nas restantes estações, em especial na Primavera.

No grupo central e ocidental, encontramos subidas de temperatura um pouco mais pronunciadas e entre Fevereiro a Abril não existe uma diferença tão grande em relação aos restantes meses do ano em especial no grupo oriental. A nível sazonal, tal como para o grupo ocidental encontramos subidas de temperatura mais pronunciadas durante o Verão e Outono e menores no Inverno e Primavera. Sendo assim, no futuro estamos à espera de um prolongamento do Verão e de um maior contraste de temperaturas entre a Primavera e Verão, em especial no grupo oriental e será muito mais pronunciado no fim do século XXI.

4.3.5.2.2. Temperatura Máxima

Na tabela 4.22 apresentamos, para os períodos em análise, a média, desvio padrão e variação entre as simulações da temperatura máxima para todas as ilhas e o resultado agregado para grupo. Tal como seria de esperar existe, um aumento da temperatura máxima diária, mas em todas as ilhas a tendência do aumento da temperatura máxima é menor do que o aumento registado para a temperatura média. A meio do século XXI os aumentos da temperatura máxima variam entre 6% a 8% para os três grupos, olhando para as diferentes ilhas o Corvo apresenta o menor aquecimento (0.94 °C) e as ilhas do Pico (1,23 °C), Santa Maria (1,31 °C) e São Miguel (1,27 °C) o maior aumento de temperatura máxima. No fim do século XXI os aumentos variam entre 15% a 17%, a ilha do Corvo apresenta o menor aquecimento (2,28 °C) e a ilha de Santa Maria o maior (2,81 °C). Tal como a temperatura média, não existe diferenças significativas entre as ilhas e grupos. Mais uma vez verificamos que existe uma tendência para o aumento do desvio padrão sendo este aumento superior ao que encontramos à temperatura média.

	Presente	RCP 8.	5 2040	RCP 8.	5 2080	Presente	RCP 8	.5 2040	RCP 8	.5 2080
	MED	MED	ΔΤ	MED	ΔΤ	STD	STD	ΔSTD	STD	ΔSTD
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(adi)	(°C)	(adi)
G.Ocidental	16.39	17.42	1.03	18.83	2.44	3.21	3.34	0.13	3.56	0.35
G.Central	16.33	17.52	1.19	19.03	2.70	3.37	3.47	0.10	3.61	0.25
G.Oriental	17.17	18.46	1.29	19.95	2.78	3.17	3.23	0.06	3.34	0.17
Flores	15.80	16.92	1.11	18.40	2.59	3.50	3.61	0.11	3.80	0.30
Corvo	16.98	17.92	0.94	19.26	2.28	2.76	2.97	0.21	3.25	0.49
Faial	16.32	17.49	1.16	19.02	2.70	3.26	3.37	0.11	3.53	0.27
Graciosa	17.51	18.65	1.14	20.13	2.62	3.20	3.35	0.15	3.49	0.29
Pico	15.29	16.52	1.23	18.04	2.75	3.35	3.43	0.08	3.61	0.26
ão Jorge	16.55	17.76	1.21	19.24	2.69	3.30	3.41	0.11	3.55	0.25
Terceira	15.98	17.20	1.22	18.70	2.72	3.32	3.41	0.09	3.56	0.24
São Miguel	16.24	17.50	1.27	18.99	2.75	3.12	3.18	0.06	3.31	0.18
Santa Maria	18.10	19.41	1.31	20.91	2.81	2.94	2.98	0.05	3.10	0.16

Tabela 4.22 – Estatísticas básicas da temperatura máxima diária previstas pelas simulações de controlo e do cenário RCP8.5.

Na tabela 4.23 apresentamos alguns percentis relevantes para a temperatura máxima diária e na figura 4.35 podemos encontrar uma comparação entre os percentis do clima presente e futuro para o grupo central. Todos os percentis que representam os dois cenários mostram uma tendência para o aumento da temperatura. Em todos os grupos existem maiores aumentos da temperatura máxima diária nos percentis mais elevados e uma tendência do histograma de apresentar um alongamento da distribuição nos percentis mais elevados. Este comportamento é similar nos restantes grupos.

		Ρ ₁	P ₅	P ₁₀	P ₂₅	P ₅₀	P ₇₅	P ₉₀	P ₉₅	P ₉₉
G.Ocidental	Presente	8.41	11.13	12.40	14.27	16.16	18.98	20.77	21.44	22.40
	2040-2060	9.48	11.99	13.25	15.08	17.12	20.18	21.91	22.61	23.83
	2080-2100	11.05	13.34	14.52	16.13	18.42	21.94	23.71	24.47	25.62
G.Central	Presente	8.45	10.83	12.08	13.93	16.22	18.96	20.79	21.71	23.13
	2040-2060	9.67	11.88	13.10	14.99	17.43	20.24	22.07	23.03	24.59
	2080-2100	10.97	13.28	14.48	16.34	18.81	21.97	23.88	24.82	26.22
G.Oriental	Presente	9.99	12.02	13.07	14.84	17.19	19.58	21.39	22.25	23.50
	2040-2060	10.99	13.15	14.24	16.07	18.50	20.94	22.74	23.58	24.81
	2080-2100	12.44	14.57	15.58	17.46	19.89	22.60	24.37	25.26	26.49

Tabela 4.23 – Percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99 previstos pelas simulações de controlo e do cenário RCP8.5.



Figura 4.35 – Histogramas da temperatura máxima prevista para os três grupos de ilhas da Região Autónoma dos Açores, nos dois cenários (linhas a azul e preto) e da simulação de controlo (linha a vermelho).

Na figura 4.36 apresentamos a evolução mensal da temperatura máxima diária e anomalias mensais entre o clima presente e futuro. Tal como acontece para a temperatura média para o período Fevereiro e Abril (inferiores a 1,0 °C), encontramos a meio do século as menores subidas de temperatura máxima. Os maiores aumentos são encontrados entre Agosto e Dezembro sendo o maior aumento registado em Outubro (1,8 °C). Tal como a temperatura média na escala sazonal (não mostrado) encontramos maiores aumentos no Verão e Outono e aumentos de menor amplitude na Primavera. Para o fim do século encontramos aumentos menores entre Fevereiro e Maio e nos restantes meses do ano o aumento da temperatura máxima previsto é superior 2,6 °C, sendo este aumento superior a 3,0°C entre Julho e Outubro. A nível sazonal estes resultados levam a um maior gradiente de temperatura entre a Primavera e Verão. Globalmente, os restantes grupos apresentam resultados semelhantes. No grupo ocidental a variação de temperatura entre a Primavera e Verão será similar mas no grupo oriental esta será mais reduzida. Tal como acontece na temperatura média, o aquecimento é maior no grupo ocidental e menor no grupo oriental. Em todos os grupos, de modo geral, o aquecimento estimado entre o presente e o período 2040-2060 (1,0 a 1,3 °C para os diferentes grupos) é menor do que aquele que ocorre entre 2040-2060 e 2080-2100 (1,4 °C a 1,5 °C nos diferentes grupos) em especial nos meses de Verão, ou seja, as alterações serão mais intensas entre o fim e meio do século XXI.



Figura 4.36 – No topo a evolução mensal das temperaturas máximas previstas no grupo central e no gráfico inferior as anomalias mensais em relação à simulação de controlo.

4.3.5.2.3. Temperatura Mínima

Na tabela 4.24 podemos encontrar a média, desvio padrão e anomalias nas simulações climáticas na Região Autónoma dos Açores. A meio do século XXI são espectáveis aumentos de 1,10 °C e 1,27 °C da temperatura mínima nos diferentes grupos, sendo estes aumentos entre 2,59 °C e 2,77 °C para o fim do século. Ilha por ilha, os aumentos de temperatura mínima no meio do século XXI variam entre 1,02 °C na ilha do Corvo e 1,28 °C em Santa Maria, no fim do século XXI são estimadas anomalias positivas entre 2,47 °C (Corvo) e 2,78 °C (Terceira). No grupo ocidental encontramos uma diferença significativa entre as ilhas das Flores e Corvo, em especial no fim do século XXI. Convém não esquecer que a representação da ilha do Corvo pode estar a ser prejudicada pela sua não existência (como ponto de terra) na grelha simulada no modelo regional. Nos restantes grupos não existem diferenças substanciais entre as ilhas durante os dois períodos aqui em estudo. Olhando para os valores encontrados para a temperatura máxima e mínima, notamos que a amplitude térmica diária não apresenta grandes variações (Figura 4.37). No grupo central existe uma diminuição da amplitude térmica em todas as estações do ano, com a maior variação perto dos 0,12 °C em JJA (2040-2060), no grupo ocidental existe também diminuição da amplitude térmica em todas as estações e encontramos variações que rondam os 0,20 °C em DJF e MAM, o grupo oriental difere um pouco em DJF e MAM encontramos aumentos da amplitude térmica em DJF e MAM e nas restantes estações do ano existe um aumento em particular em JJA em todas as estações as variações não ultrapassam os 0,10 °C.

	Presente	RCP 8	.5 2040	RCP 8	.5 2080	Presente	RCP 8	.5 2040	RCP 8	.5 2080
	MED	MED	ΔΤ	MED	ΔΤ	STD	STD	ΔSTD	STD	ΔSTD
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(adi)	(°C)	(adi)
G.Ocidental	13.18	14.28	1.10	15.77	2.59	3.87	3.93	0.05	4.07	0.19
G.Central	11.67	12.90	1.24	14.41	2.74	3.23	3.38	0.15	3.48	0.26
G.Oriental	12.29	13.56	1.27	15.06	2.77	2.96	3.06	0.10	3.16	0.20
Flores	11.25	12.44	1.19	13.97	2.71	3.58	3.67	0.09	3.79	0.22
Corvo	15.11	16.13	1.02	17.58	2.47	3.13	3.26	0.13	3.49	0.36
Faial	11.82	13.05	1.23	14.56	2.74	3.15	3.32	0.17	3.42	0.27
Graciosa	12.61	13.79	1.18	15.30	2.69	3.16	3.33	0.18	3.43	0.27
Pico	10.88	12.16	1.27	13.66	2.77	3.25	3.40	0.15	3.52	0.26
São Jorge	11.78	13.01	1.23	14.52	2.74	3.15	3.31	0.16	3.42	0.26
Terceira	11.25	12.51	1.27	14.02	2.78	3.16	3.30	0.14	3.42	0.26
São Miguel	11.53	12.80	1.27	14.30	2.77	2.91	3.03	0.12	3.15	0.24
Santa Maria	13.04	14.32	1.28	15.82	2.77	2.80	2.90	0.10	2.98	0.18

Tabela 4.24 – Estatísticas básicas da temperatura mínima diária prevista pelas simulações de controlo e do cenário RCP8.5.



Figura 4.37 – Boxplot da amplitude térmica diária para os diferentes grupos e períodos em estudo. A linha em vermelho representa a mediana, a caixa os limites entre os percentis 25 e 75 e a preto os percentis 1 e 99.

Tal como acontece com a temperatura média e máxima, os aumentos são maiores no grupo ocidental e menores no grupo oriental e no grupo central as variações de temperatura nos três casos não são muito inferiores ao que encontramos no grupo oriental. Esta aparente dependência da variação do aumento da temperatura com a longitude é bem ilustrada na figura 4.38. Nesta figura representamos as anomalias das temperaturas máxima, média e mínima para os três grupos, sendo à esquerda representado o grupo ocidental e à direita o grupo oriental. Nos três gráficos de cima representamos as anomalias previstas para o período 2040-2060 e nos três gráficos inferiores as anomalias encontradas para o período 2080-2100. Como a escala vertical é igual nos seis gráficos, é fácil verificar que no grupo ocidental o aumento de temperatura apresenta sempre valores inferiores aos restantes. Encontramos as maiores anomalias no grupo oriental, sendo em geral cerca de 0,1 °C superior as que encontramos no grupo central. Também é fácil ver que em geral as anomalias da temperatura mínima são superiores às encontradas nas restantes.

Na tabela 4.25, apresentamos os percentis 1,5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99 da temperatura mínima diária na região dos Açores. Como podemos verificar pelo gráfico 4.39 existe uma tendência positiva em todo o histograma. Nos extremos da distribuição de temperatura mínima encontramos diminuição nos percentis de ordem inferior e aumento nos percentis de alta ordem.

A distribuição em 2040-2060 apresenta um alongamento nos percentis mais elevados e um decréscimo nos percentis inferiores. Nos restantes grupos o comportamento encontrado é igual.



Figura 4.38 – Anomalias da temperatura máxima, média e mínima para os três grupos que constituem a Região Autónoma dos Açores: no gráfico superior as anomalias para o período 2040-2060 e no gráfico inferior para o período 2080-2100.

		P ₁	P ₅	P ₁₀	P ₂₅	P ₅₀	P 75	P ₉₀	P ₉₅	P ₉₉
G.Ocidental	Presente	3.74	6.38	7.94	10.67	13.37	15.89	18.30	19.34	20.75
	2040-2060	4.94	7.35	9.00	11.73	14.37	17.11	19.50	20.58	22.02
	2080-2100	6.40	8.85	10.33	13.02	15.75	18.78	21.32	22.36	23.74
G.Central	Presente	4.13	6.11	7.29	9.36	11.84	14.18	15.76	16.57	17.87
	2040-2060	5.15	7.06	8.26	10.48	13.09	15.54	17.17	18.02	19.46
	2080-2100	6.66	8.56	9.73	11.80	14.48	17.24	18.94	19.74	21.00
G.Oriental	Presente	5.48	7.30	8.29	10.14	12.41	14.59	16.08	16.77	18.08
	2040-2060	6.52	8.32	9.39	11.35	13.69	15.97	17.47	18.17	19.35
	2080-2100	8.01	9.77	10.75	12.70	15.19	17.62	19.11	19.82	21.01

Tabela 4.25 – Percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99 previstos pelas simulações de controlo e do cenário RCP8.5.

Na escala mensal, e para a temperatura mínima no grupo oriental (Figura 4.40), encontramos anomalias positivas em todos os meses. No período 2040-2060, nos meses de Fevereiro (0,8 °C) e Abril (0,8 °C) apresentam as menores anomalias sendo a maior encontrada em Outubro (1,6 °C). Em 2080-2100 encontramos anomalias inferiores a 2,7 °C entre Janeiro e Junho sendo as menores encontradas entre Fevereiro e Abril. Nos restantes meses encontramos aquecimentos superiores a 3,0 °C sendo o máximo encontrado em Julho (3,3 °C). Nos restantes grupos encontramos comportamentos similares. Sazonalmente (não apresentado), as anomalias encontradas em DJF e MAM são semelhantes e inferiores aos valores que encontramos em JJA e SON. Para o fim do século XXI as anomalias de JJA e SON são novamente similares, existindo no

fim do século um aumento menos pronunciado da temperatura mínima mensal de MAM em relação a DJF. Nos grupos central e ocidental, a diferença das anomalias encontradas em SON são ligeiramente inferiores às que encontramos em JJA em ambos os períodos em estudo e assistimos a um aumento da diferença entre DJF e MAM no fim do século sendo o aumento de temperatura entre estas estações semelhante a meio do século XXI. Comparando os dois períodos em análise, verificamos novamente que o aquecimento previsto é maior entre o 2040-2060 e 2080-2100 que entre o presente e 2040-2060.



Figura 4.39 – Histogramas da temperatura mínima prevista para os três grupos de ilhas da Região Autónoma dos Açores, nos dois cenários (linhas a azul e preto) e da simulação de controlo (linha a vermelho).



Figura 4.40 – No topo a evolução mensal das temperaturas mínimas previstas no grupo Oriental e no gráfico inferior as anomalias mensais em relação à simulação de controlo.

4.3.5.2.4. Precipitação

Na tabela 4.26 mostramos os resultados obtidos para a precipitação diária nas diferentes ilhas e grupos na região dos Açores. Nos dois períodos em análise existe perda de precipitação na região dos Açores. A meio do século é expectável existir um decréscimo de precipitação entre 2 a 6%, existindo um diferença razoável entre o grupo ocidental e os restantes. Ilha a ilha, verificamos

que a meio do século XXI só encontramos um ganho de precipitação no Faial, sendo que as restantes ilhas apresentam perdas de precipitação. Neste período existe um ligeiro aumento da variabilidade da precipitação diária. No fim do século XXI o grupo ocidental apresenta uma diminuição ligeiramente superior à que encontramos a meio do mesmo. Nos restantes grupos existe uma perda de precipitação, as variações situam-se entre os 0,13 mm/dia na ilha Graciosa e os 0,57 mm/dia no Pico. As ilhas do Pico, Terceira, São Miguel e Santa Maria apresentam, neste ultimo período, perdas de precipitação superiores a 10%. Também verificamos que em relação a 2040-2060, no fim do século existe uma pequena diminuição da variabilidade da precipitação diária em S. Miguel.

	Duccouto		F 2040		F 2000	Duccente		- 2040		- 2000
	Presente	RCP 8.	5 2040	RCP 8.	5 2080	Presente	RCP 8.	5 2040	RCP 8.	5 2080
	MED	MED	ΔΡ	MED	ΔΡ	STD	STD	ΔSTD	STD	ΔSTD
	(mm/dia)	(adi)	(mm/dia)	(adi)						
G.Ocidental	3.48	3.28	-0.06	3.27	-0.06	8.05	8.16	0.01	8.38	0.04
G.Central	3.66	3.57	-0.02	3.34	-0.09	8.19	8.80	0.07	8.71	0.06
G.Oriental	2.30	2.24	-0.02	2.04	-0.11	5.88	6.42	0.09	5.77	-0.02
Flores	4.18	4.04	-0.03	3.97	-0.05	9.01	9.09	0.01	9.30	0.03
Corvo	2.79	2.52	-0.09	2.57	-0.08	6.89	7.03	0.02	7.27	0.06
Faial	3.32	3.36	0.01	3.12	-0.06	7.45	8.24	0.11	8.09	0.09
Graciosa	2.50	2.42	-0.03	2.37	-0.05	6.21	6.59	0.06	6.89	0.11
Pico	5.27	5.16	-0.02	4.70	-0.11	10.89	11.59	0.06	11.32	0.04
São Jorge	3.00	2.92	-0.03	2.78	-0.07	6.61	7.27	0.10	7.50	0.14
Terceira	4.18	3.96	-0.05	3.72	-0.11	8.65	9.16	0.06	8.89	0.03
São Miguel	3.02	2.98	-0.01	2.69	-0.11	6.98	7.46	0.07	6.77	-0.03
Santa Maria	1.58	1.51	-0.04	1.39	-0.12	4.40	5.08	0.15	4.46	0.01

Tabela 4.26 – Estatísticas básicas da precipitação diária prevista pelas simulações de controlo e do cenário RCP8.5.

Comparando os percentis previstos para o clima presente com os percentis simulados para o clima futuro (Tabela 4.27), verificamos que todos os percentis futuros apresentam menos precipitação, sendo apenas nos percentis mais elevados que encontramos mais precipitação, ou seja, no futuro é expectável existirem eventos de precipitação diária mais extremos. No gráfico 4.41 podemos verificar que nos três grupos existe uma diminuição da diferença entre os percentis 75 e 25, zona que representa 50% da precipitação ocorrida. Esta diminuição é mais evidente nos grupos ocidental e central, facto que ajuda a explicar a perda de precipitação encontrada.

Tabela 4.27 – Percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99 previstos pelas simulações de controlo e do cenário RCP8.5.

		P ₁	P ₅	P ₁₀	P ₂₅	P 50	P ₇₅	P ₉₀	P ₉₅	P ₉₉
G.Ocidental	Presente	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	3.07	10.75	17.49	38.02
	2040-2060	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	2.63	9.84	17.06	39.06
	2080-2100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	2.23	9.83	18.00	39.56
G.Central	Presente	0.00	0.00	0.00	0.01	0.45	3.14	11.23	18.82	38.64
	2040-2060	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	2.69	10.44	18.69	43.13
	2080-2100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	2.29	9.31	17.77	42.78
G.Oriental	Presente	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	1.59	6.47	12.48	28.95
	2040-2060	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	1.40	5.95	11.59	29.86
	2080-2100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	1.26	5.22	10.95	27.87

Na figura 4.42 apresentamos o número de dias com precipitação no gráfico superior e os dias com precipitação muito forte (superior a 50 mm/dia) no gráfico inferior, para as diferentes ilhas e grupos. Verificamos que o número de dias com precipitação diminui substancialmente entre o controlo e simulação RCP8.5. Os resultados obtidos além da diminuição do número de dias com precipitação também apontam para um aumento do número de dias com precipitação 2080-2100. No grupo oriental existe um aumento do número de dias com precipitação entre o presente e o futuro mais próximo, seguido por uma diminuição da precipitação diária intensa entre 2040-2060 e 2080-2100.



Figura 4.41 – Quartis de 0 a 0,99 com espaçamento de 0.01 da precipitação para os três grupos da Região Autónoma dos Açores.

A nível mensal para o grupo ocidental (Figura 4.43) existe, para os dois períodos futuros, aumentos de precipitação nos meses de Maio, Julho, Novembro e no período 2040-2060 em Dezembro. Encontramos as maiores anomalias nos meses com mais precipitação e, regra geral, as anomalias negativas são maiores que as positivas. A nível sazonal (não mostrado) e no grupo ocidental não existe uma grande diferença em MAM e JJA para ambos os períodos, em DJF ambos os períodos apresentam perdas significativas apesar de existir um aumento de precipitação no período 2080-2100 em relação da precipitação existente em 2040-2060.

Para o grupo central a nível mensal registam-se perdas de precipitação de Janeiro a Abril e Setembro em ambos os períodos em analise. Em Outubro, Julho e Julho as diferenças entre o cenário futuro e o histórico são quase nulas. Em 2040-2060 encontramos aumentos nos meses menos chuvosos e no fim do século existe um aumento de 0,48 mm/dia em Novembro existindo perdas de precipitação nos restantes meses do ano. A nível sazonal (não mostrado), no grupo central para o fim do século XXI existe uma perda acentuada de precipitação em DJF e MAM e durante JJA e SON não se verificam grandes diferenças entre o clima presente e futuro. O cenário a meio do século é um pouco diferente, pois continuamos a encontrar uma anomalia negativa significativa em DJF (-0,44 mm/dia), e nas restantes estações encontramos uma perda em MAM (-0,12 mm/dia) e ganhos em JJA (0,22 mm/dia) e SON (0,13 mm/dia).

No grupo oriental, a nível mensal, no fim do século XXI, as projecções apontam para perdas de precipitação em quase todos os meses do ano, sendo as anomalias mais significativas encontradas em Janeiro (-0,82 mm/dia), Março (-0,63 mm/dia) e Abril (-0,68 mm/dia). Neste

período só existem ganhos ligeiros em Fevereiro (0,11 mm/dia), Julho (0,04 mm/dia) e Novembro (0,15 mm/dia). Estas alterações a nível mensal traduzem-se em perdas de precipitação em quase todas as estações do ano em especial durante MAM (-0,42 mm/dia). No meio do século XXI, encontramos uma perda significativa em Janeiro (-0,95 mm/dia) e Março (-0,54 mm/dia) e entre Setembro (-0,25 mm/dia) e Outubro (-0,27 mm/dia) e fortes ganhos em Novembro (0,30 mm/dia) e Dezembro (0,45 mm/dia). A nível sazonal estes resultados levam a perdas de precipitação nas estações mais chuvosa e a um ganho durante o Verão.



Figura 4.42 – No gráfico superior o número de dias com precipitação, e no gráfico inferior o número de dias com precipitação intensa para os diferentes grupos e ilhas da região dos Açores.



Figura 4.43 – No topo a evolução mensal da precipitação prevista no grupo ocidental e no gráfico inferior as anomalias mensais em relação à simulação de controlo.

No que toca à precipitação, tal como aconteceu com a temperatura, existe de certa forma uma assimetria entre os três grupos. No grupo ocidental existem anomalias negativas significativas nos meses de Inverno e Outono, e grosso modo, podemos afirmar que durante a Primavera e Verão não existem diferenças entre o presente e o futuro. Avançando para o oriente, encontramos também perdas relevantes durante a Primavera e uma diminuição menor durante o Outono. De modo geral, todas as ilhas apresentam perdas, cuja diminuição tem de ser abordada com cuidado uma vez que a água é um recurso vital numa região como os Açores.

4.3.5.2.5. Vento

Na tabela 4.28 apresentamos os resultados para a média da intensidade do vento diário na região dos Açores. Nas projecções para o clima futuro, encontramos uma anomalia negativa na intensidade do vento em todas as ilhas. Esta perda é mais acentuada entre o clima presente e o período 2040-2060 do que entre 2040-2060 a 2080-2100. A meio do século XXI, os dados apontam para perdas de 5% no grupo ocidental enquanto no grupo oriental, e central as perdas são de 4%. Olhando para as intensidades, a maior perda ocorre nas Flores (0,36 m/s) e a menor em São Miguel (0,26 m/s). Neste período, também encontramos uma diminuição na variabilidade diária da intensidade do vento, que pode estar associada a um decréscimo do número de tempestades no Atlântico Norte (Knutsen *et al.*, 2008; Emanuel *et al.*, 2008). Para o fim do século, as perdas são ligeiramente superiores, e ao contrário do período anterior as perdas variam de ilha para ilha. Novamente encontramos as menores anomalias em São Miguel (0,29 m/s) e a maior ocorre na ilha do Corvo (0,49 m/s). Entre 2040-2060 e 2080-2100, existe um pequeno aumento da variabilidade e o decréscimo da intensidade do vento é cerca de um terço da que encontramos entre o clima presente e o meio do século XXI.

No gráfico 4.44 apresentamos os histogramas da intensidade do vento para os três grupos e a distribuição dos percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90 e 99 é apresentada na tabela 4.29. Verificamos que no geral o clima futuro irá apresentar uma menor frequência de eventos com intensidade de vento extremo. As diferenças que encontramos entre o percentil 25 e 75 tendem a diminuir nos cenários futuros. Este facto é importante pois indica que em 50% dos dias irá existir menos vento, o que implica uma diminuição do recurso para aproveitamento energético.



Figura 4.44 – Histogramas da intensidade do vento prevista para os três grupos de ilhas da Região Autónoma dos Açores, nos dois cenários (linhas a azul e preto) e da simulação de controlo (linha a vermelho).

	Presente	RCP 8.	5 2040	RCP 8.	5 2080	Presente	RCP 8.	5 2040	RCP 8.	5 2080
	MED (m/s)	MED (m/s)	ΔV (adi)	MED (m/s)	ΔV (adi)	STD (m/s)	STD (m/s)	ΔSTD (adi)	STD (m/s)	ΔSTD (adi)
G.Ocidental	7.27	6.93	-0.05	6.79	-0.07	3.59	3.42	-0.05	3.46	-0.04
G.Central	7.10	6.82	-0.04	6.70	-0.06	3.60	3.39	-0.06	3.42	-0.05
G.Oriental	6.70	6.43	-0.04	6.38	-0.05	3.30	3.08	-0.06	3.10	-0.06
Flores	7.37	7.01	-0.05	6.89	-0.06	3.64	3.44	-0.05	3.48	-0.04
Corvo	7.17	6.85	-0.05	6.69	-0.07	3.54	3.40	-0.04	3.44	-0.03
Faial	7.15	6.87	-0.04	6.76	-0.05	3.53	3.33	-0.06	3.35	-0.05
Graciosa	7.01	6.74	-0.04	6.61	-0.06	3.58	3.38	-0.06	3.44	-0.04
Pico	7.30	7.01	-0.04	6.87	-0.06	3.82	3.62	-0.05	3.62	-0.05
São Jorge	7.06	6.78	-0.04	6.67	-0.06	3.53	3.32	-0.06	3.35	-0.05
Terceira	6.98	6.71	-0.04	6.62	-0.05	3.50	3.29	-0.06	3.34	-0.05
São Miguel	6.79	6.54	-0.04	6.51	-0.04	3.39	3.18	-0.06	3.19	-0.06
Santa Maria	6.61	6.33	-0.04	6.26	-0.05	3.19	2.98	-0.07	3.00	-0.06

Tabela 4.28 – Estatísticas básicas da intensidade do vento previsto pelas simulações de controlo e do cenário RCP8.5.

Tabela 4.29 – Percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99 previstos pelas simulações de controlo e do cenário RCP8.5.

		P ₁	P₅	P ₁₀	P ₂₅	P ₅₀	P 75	P ₉₀	P ₉₅	P 99
G.Ocidental	Presente	0.91	2.03	2.85	4.57	6.87	9.62	12.27	13.83	16.52
	2040-2060	0.87	1.93	2.69	4.36	6.57	9.15	11.62	13.24	15.58
	2080-2100	0.82	1.82	2.59	4.19	6.37	8.94	11.64	13.27	15.79
G.Central	Presente	0.89	1.98	2.78	4.44	6.61	9.36	12.14	13.78	16.68
	2040-2060	0.89	1.92	2.72	4.33	6.40	8.92	11.61	13.13	15.66
	2080-2100	0.75	1.79	2.58	4.20	6.26	8.78	11.45	13.05	15.98
G.Oriental	Presente	0.86	1.99	2.79	4.30	6.28	8.63	11.28	12.95	15.71
	2040-2060	0.88	1.91	2.67	4.22	6.12	8.27	10.57	12.14	14.78
	2080-2100	0.86	1.87	2.62	4.10	6.07	8.23	10.55	12.07	14.86

No gráfico 4.45 apresentamos a evolução do vento médio para o grupo central. Neste podemos verificar que para o período 2040-2060, de modo geral, existem perdas de vento em Janeiro (0,97 m/s) e Fevereiro (1,05 m/s) e nos restantes meses as anomalias são principalmente negativas existindo pequenos ganhos no Verão. No fim do século XXI todos os meses apresentam menos vento, sendo as perdas superiores a 0,4 m/s na maioria dos meses. Comparando os dois períodos, as perdas registadas em Janeiro e Fevereiro para o meio do século são atenuadas, existindo nos restantes meses anomalias negativas mais fortes. Sazonalmente (não mostrado), estes resultados levam a perdas significativas de vento no Outono, Inverno e Primavera e a um ligeiro aumento do vento durante o Verão em 2040-2060. No fim do século existem perdas em todas as estações, sendo as perdas superiores a 0,4 m/s no Outono, Inverno e Primavera. Estes resultados são equivalentes aos que encontramos no grupo oriental. Novamente existe um desacoplamento entre o grupo ocidental e os restantes, as anomalias neste grupo em 2040-2060 são semelhantes às que encontramos nos restantes, mas no fim do século XXI todos os meses apresentam maiores perdas do recurso levando a perdas superiores a 0,35 m/s em todas as estações do ano.



Figura 4.45 – No topo a evolução mensal da intensidade do vento prevista no grupo central e no gráfico inferior as anomalias mensais em relação à simulação de controlo.

4.3.5.2.6. Humidade Específica

Os resultados das simulações para o clima presente e futuro da humidade específica para a região dos Açores são apresentados na tabela 4.30. As projecções do clima futuro obtidas apontam para um aumento substancial da humidade específica em ambos os períodos em estudo. Entre o presente e 2040-2060, as anomalias apontam para aumentos que rondam os 9% e no fim do século os aumentos são de 20% em quase todas as ilhas, sendo o aumento que ocorre entre 2040-2060 e 2080-2100 um pouco superior ao que ocorre entre o presente e o meio do século XXI. Estes aumentos também são acompanhados por um aumento da variabilidade diária da humidade específica. Estes resultados não são surpreendentes e estão intimamente ligados ao aumento de temperatura e diminuição da precipitação, isto porque, com o aumento da temperatura a capacidade da atmosfera reter vapor de água aumenta, levando a uma subida da quantidade de vapor de água presente na atmosfera.



Figura 4.46 – Histogramas da humidade específica prevista para os três grupos de ilhas da Região Autónoma dos Açores, nos dois cenários (linhas a azul e preto) e da simulação de controlo (linha a vermelho).

No gráfico 4.46 apresentamos a evolução dos percentis da humidade específica para os diferentes grupos e simulações, sendo os mais importantes discriminados na tabela 4.31. Como podemos verificar, existe um aumento significativo da média e da distância entre os quartis 25 e 75. Os percentis extremos apresentam comportamentos diferentes, nos percentis inferiores existe um pequeno aumento, enquanto nos percentis mais elevados existe um aumento superior.

	Presente	RCP 8.	5 2040	RCP 8.	5 2080	Presente	RCP 8.	5 2040	RCP 8.	P 8.5 2080	
	MED	MED	Δq	MED	Δq	STD	STD	ΔSTD	STD	ΔSTD	
	(g/kg)	(g/kg)	(adi)	(g/kg)	(adi)	(g/kg)	(g/kg)	(adi)	(g/kg)	(adi)	
G.Ocidental	9.47	10.28	0.09	11.29	0.19	2.29	2.54	0.11	2.88	0.26	
G.Central	8.76	9.59	0.09	10.54	0.20	1.99	2.24	0.12	2.51	0.26	
G.Oriental	8.87	9.71	0.09	10.65	0.20	1.87	2.07	0.11	2.34	0.25	
Flores	8.84	9.65	0.09	10.62	0.20	2.22	2.45	0.11	2.76	0.24	
Corvo	10.10	10.91	0.08	11.97	0.19	2.19	2.47	0.13	2.85	0.30	
Faial	8.87	9.71	0.10	10.68	0.20	2.03	2.28	0.12	2.56	0.26	
Graciosa	8.84	9.68	0.09	10.63	0.20	2.06	2.31	0.12	2.59	0.26	
Pico	8.61	9.42	0.09	10.36	0.20	1.93	2.17	0.13	2.44	0.26	
São Jorge	8.80	9.63	0.09	10.59	0.20	1.98	2.23	0.12	2.51	0.26	
Terceira	8.67	9.49	0.09	10.43	0.20	1.94	2.18	0.12	2.45	0.26	
São Miguel	8.72	9.54	0.09	10.48	0.20	1.84	2.05	0.11	2.31	0.25	
Santa Maria	9.03	9.87	0.09	10.82	0.20	1.88	2.09	0.11	2.35	0.25	

Tabela 4.30 – Estatísticas básicas da humidade específica prevista pelas simulações de controlo e do cenário RCP8.5.

A nível mensal para o grupo ocidental (Figura 4.47), os resultados mostram como seria de esperar, anomalias positivas em todos os meses sendo as maiores anomalias encontradas nos meses em que encontramos maiores aumento de temperatura. A meio do século XXI não encontramos diferenças muito grandes entre os doze meses do ano e no fim do século existe um aumento mais diferencial entre os meses, sendo que nos meses em que encontramos anomalias maiores na temperatura são os meses que registam maiores aumentos da humidade específica. A nível sazonal (não mostrado), os resultados mensais levam a maiores anomalias no Verão e Outono. Ao contrário do que acontece com a temperatura, na humidade específica não encontramos uma assimetria entre o grupo ocidental e os restantes.

Tabela 4.31 – Percentis 1, 5, 10, 25, 50, 7	5, 90, 95 e 99 previstos pelas s	simulações de controlo e do cenário RCP	8.5.
---	----------------------------------	---	------

		Ρ ₁	P ₅	P ₁₀	P ₂₅	P 50	P ₇₅	P ₉₀	P ₉₅	P ₉₉
G.Ocidental	Presente	4.64	5.76	6.50	7.81	9.41	11.07	12.63	13.39	14.50
	2040-2060	5.00	6.20	6.98	8.47	10.15	12.07	13.83	14.60	15.84
	2080-2100	5.46	6.76	7.62	9.21	11.02	13.44	15.41	16.26	17.54
G.Central	Presente	4.64	5.47	6.08	7.31	8.78	10.18	11.39	12.04	13.18
	2040-2060	5.00	5.88	6.57	7.95	9.59	11.21	12.55	13.28	14.49
	2080-2100	5.40	6.39	7.19	8.72	10.46	12.34	13.99	14.74	15.95
G.Oriental	Presente	4.95	5.80	6.35	7.48	8.91	10.24	11.31	11.88	13.00
	2040-2060	5.30	6.23	6.91	8.19	9.73	11.23	12.43	13.05	14.18
	2080-2100	5.80	6.77	7.53	8.95	10.60	12.41	13.75	14.44	15.65



Figura 4.47 – No topo a evolução mensal da humidade específica previstas no grupo ocidental e no gráfico inferior as anomalias mensais em relação à simulação de controlo.

4.3.5.3. Região Autónoma da Madeira

4.3.5.3.1. Temperatura Média

Na tabela 4.32 apresentamos a temperatura média (MED), desvio padrão (STD), a variação da temperatura média (Δ T), e a variação do desvio padrão (Δ STD) entre o presente e os cenários futuros, e os valores dos percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99 para a ilha da Madeira e Porto Santo. Os resultados mostram que todos os cenários futuros apresentam temperaturas médias mais elevadas. Para o meio do século os resultados apontam para uma subida de temperatura de 0,92 °C no cenário RCP4.5 e 1,49 °C no cenário RCP8.5. No fim do século o aumento previsto da temperatura na Madeira ascende aos 1,53 °C no cenário RCP4.5 e para o RCP8.5 o aumento é de 2,85 °C. Apesar da proximidade geográfica entre as ilhas da Madeira e Porto Santo, o aquecimento previsto pelo modelo regional na ilha de Porto Santo é menor do que o previsto na ilha da Madeira. Esta diferença atinge os 0,35 °C no fim do século para o cenário RCP8.5 e nas restantes simulações varia entre 0,23 °C e 0,26 °C. Esta diferenciação tende a ser maior no fim do século XXI em ambos os cenários. A variabilidade diária da temperatura média irá aumentar, em especial no fim do século XXI. Este aumento é superior a 50%, no caso extremo (RCP 8.5 no final do século). Comparando os percentis na ilha da Madeira, existe subida em todos eles no clima futuro, sendo o aumento maior nos percentis mais elevados. Na ilha de Porto Santo acontece o oposto, sendo os percentis menores mais incrementados.

			Madeira			Porto Santo					
	Controlo	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	Controlo	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	
	Controlo	2040	2040	2080	2080	Controlo	2040	2040	2080	2080	
MED (°C)	13.95	14.87	15.45	15.48	16.80	16.57	17.26	17.81	17.86	19.06	
ΔT (°C)	-	0.92	1.50	1.53	2.85	-	0.69	1.24	1.29	2.49	
STD (°C)	5.18	5.74	6.67	4.95	8.06	9.30	9.17	10.77	9.83	12.08	
ΔSTD (adi)	-	0.11	0.29	-0.04	0.56	-	-0.01	0.16	0.06	0.30	
P ₀₁	7.71	8.41	9.12	9.35	10.45	11.24	11.91	12.60	12.53	14.01	
P ₀₅	9.19	9.86	10.52	10.68	11.74	12.55	13.21	13.78	13.86	15.08	
P ₁₀	10.07	10.71	11.35	11.47	12.58	13.29	13.88	14.44	14.59	15.77	
P ₂₅	11.54	12.39	12.88	13.06	14.26	14.59	15.28	15.78	15.88	17.07	
P 50	13.78	14.72	15.38	15.27	16.69	16.47	17.22	17.74	17.75	19.04	
P 75	16.32	17.17	17.76	17.76	19.16	18.69	19.38	19.99	19.99	21.13	
P ₉₀	17.91	19.03	19.50	19.56	20.97	19.99	20.60	21.16	21.23	22.40	
P ₉₅	19.02	20.40	20.89	20.85	22.21	20.46	21.15	21.71	21.74	22.93	
P ₉₉	21.77	23.36	24.28	23.58	25.03	21.42	22.20	22.94	22.80	23.87	

Tabela 4.32 – Estatísticas básicas e percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99, da temperatura média diária prevista pelas simulações de controlo e dos cenários RCP4.5 e RCP8.5.

No cenário RCP4.5, as tendências de aumento são de 0,18°C/década para o meio do século XXI de 0,17 °C/década para o fim do século, e entre estes dois períodos a tendência neste cenário é de 0,15 °C/década. Para o cenário RCP8.5 a visão é um pouco diferente, pois a tendência calculada para o meio do século é de 0,30 °C/década, aumentando para 0,32 °C/década entre o presente e o fim do século XXI e entre os dois períodos em estudo, a tendência é de 0,34 °C/década. Estas diferenças entre os cenários é explicada pela forma como os cenários foram construídos. No cenário RCP8.5 o forçamento radiativo apresenta sempre uma taxa de crescimento entre o presente e o fim do século XXI, o que explica o aumento da tendência entre as tendências calculadas. No cenário RCP4.5, apesar de apresentar também um aumento do forçamento radiativo até 2100, a taxa de crescimento começa a diminuir após aproximadamente 2030, o que explica a diferença entre as taxas calculadas. Estas diferenças entre os cenários também explicas o facto do aumento de temperatura médio previsto para o meio do século no cenário RCP8.5 ser maior que o previsto para o fim do século usando o cenário radiativo RCP4.5.

Na ilha da Madeira à escala mensal (Figura 4.48) a meio no século e no cenário RCP4.5, encontramos aumentos de temperatura que variam entre os 0,20 °C (Fevereiro) e 1,21 °C (Maio). Para o fim do século, as estimativas apontam para aumentos de temperatura de 1,21 °C (Fevereiro) e 1,84 °C (Julho), e em ambos os períodos os maiores aquecimentos são encontrados entre Março e Julho, indicando um aumento da amplitude do ciclo anual. Olhando para os dois períodos em estudo é durante os meses mais quentes que encontramos a menor subida entre os períodos em análise. Em Porto Santo encontramos a menor subida em Fevereiro (0,36 °C) e as maiores entre Março e Maio e em Novembro a meio do século XXI, no final do século o aumento é mais sentido em Março (1,51 °C) e menor em Julho (1,07 °C) e excluindo Fevereiro todos os meses apresentam aumentos menores entre 2040-2060 a 2080-2100 do que entre 1989-2010 a 2040-2060.

No cenário RCP8.5, a meio do século XXI a subida de temperatura na ilha da Madeira só é inferior a 1,0 °C em Fevereiro, sendo que os restantes meses apresentam quase todos, subidas

superiores a 1,3 °C, com a maior subida registada em Maio (2,15 °C). Em Porto Santo, todos os meses apresentam aumentos superiores a 1,0 °C, sendo o maior aumento em Maio (1,50 °C) e menor em Março (1,04 °C). No fim do século, na ilha da Madeira, o aquecimento é mais sentido entre Maio e Julho (> 3,0 °C) e menor nos meses de Fevereiro, Março e Outubro (< 2,6 °C). Em Porto Santo o aquecimento é, de modo geral, igualmente sentido em todos os meses variando entre 2,29 °C (Março) e 2,65 °C (Janeiro). Comparando os dois períodos verificamos que em Porto Santo o aquecimento é menor durante o Verão e maior no Outono e Inverno, enquanto a ilha da Madeira aquece mais durante os meses de Verão e Outono e menor na Primavera. Apesar destas diferenças a nível global, em ambas as ilhas, não existe uma assimetria significativa no fim do século para ambos os cenários e a meio do século XXI o aumento de temperatura é menos sentido no Inverno no cenário RCP4.5.



Figura 4.48 – No topo a evolução mensal das temperaturas médias previstas na ilha da Madeira e no gráfico inferior as anomalias mensais em relação à simulação de controlo.

4.3.5.3.2. Temperatura Máxima

Os resultados da tabela 4.33 mostram as estatísticas básicas e percentis obtidos nas simulações do clima presente e cenários futuros para a ilha da Madeira e Porto Santo. Os resultados obtidos apresentam uma tendência para o aumento da temperatura máxima diária, este aumento é superior em 0,1 °C a 0,2 °C ao que encontramos para a temperatura média diária. A meio o século, a subida será entre 1,04 °C e 1,69 °C para a ilha da Madeira e entre 0,73 °C e 1,34 °C na ilha de Porto Santo. No fim, o aumento da temperatura poderá variar entre 1,63 °C e 3,05 °C na Madeira, e em Porto Santo o aquecimento será um pouco menor variando entre 1,31 °C e 2,53 °C. Verificamos novamente que existe um aquecimento diferenciado entre as duas ilhas, sendo que a ilha da Madeira apresenta um aumento da temperatura máxima superior. Também

verificamos que este diferencial é maior no fim do século, onde a diferença atinge os 0,33 °C no cenário RCP4.5 e 0,52 °C no cenário RCP 8.5.

Olhando para os percentis na tabela 4.33 e histogramas na figura 4.49, onde representamos os resultados dos diferentes cenários para as duas ilhas, verificamos que para além do óbvio aquecimento, os percentis mais elevados apresentam, em geral, nas duas ilhas na região, aumentos superiores aos que encontramos no extremo oposto e verificamos que nas temperaturas inferiores os histogramas tendem a apresentar menores frequências compensadas por um ligeiro aumento no extremo oposto.

		-	-								
			Madeira			Porto Santo					
	Droconto	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	Droconto	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	
	Fresente	2040	2040	2080	2080	Presente	2040	2040	2080	2080	
MED (°C)	16.66	17.70	18.29	18.35	19.71	19.32	20.05	20.62	20.66	21.85	
ΔT (°C)	-	1.04	1.64	1.69	3.05	-	0.73	1.31	1.34	2.53	
STD (°C)	6.78	7.62	7.87	6.28	9.56	11.12	11.32	12.20	12.26	14.39	
ΔSTD (adi)	-	0.12	0.16	-0.07	0.41	-	0.02	0.10	0.10	0.29	
P ₀₁	9.61	10.21	11.04	11.05	12.41	13.35	14.08	14.77	14.71	16.19	
P ₀₅	11.24	11.93	12.64	12.86	13.94	14.88	15.59	16.19	16.28	17.55	
P ₁₀	12.21	12.97	13.60	13.78	14.98	15.74	16.40	17.03	17.10	18.29	
P ₂₅	13.92	14.91	15.44	15.56	16.88	17.29	18.02	18.60	18.64	19.84	
P 50	16.48	17.57	18.16	18.14	19.58	19.25	20.04	20.55	20.57	21.82	
P ₇₅	19.30	20.31	20.93	20.91	22.41	21.52	22.23	22.85	22.87	23.94	
P ₉₀	21.21	22.45	22.91	22.99	24.38	22.89	23.56	24.18	24.22	25.36	
P ₉₅	22.45	23.94	24.43	24.36	25.83	23.40	24.18	24.74	24.76	25.93	
P ₉₉	25.56	27.19	28.23	27.52	28.83	24.70	25.69	26.27	26.15	27.20	

Tabela 4.33 – Estatísticas básicas e percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99, da temperatura máxima diária prevista pelas simulações de controlo e dos cenários RCP4.5 e RCP8.5.

Olhando para as possíveis alterações a nível mensal para a ilha de Porto Santo (Figura 4.50), verificamos que para o meio do século XXI no cenário RCP4.5, as taxas de aquecimento são sempre inferiores a 1,0 °C, sendo o menor aumento encontrado em Fevereiro (0,36 °C) e entre Março e Maio e Outubro e Novembro encontramos as maiores anomalias (> 0,87 °C). No cenário RCP8.5 ao contrário, encontramos um aumento que varia entre 1,12 °C em Fevereiro e máximos de 1,68 °C Maio e 1,51 °C em Janeiro. Comparando os dois cenários verificamos que durante os meses de Outono e Primavera não existe uma grande diferença entre eles. Durante o Verão e Inverno o cenário RCP8.5 apresenta valores que quase duplicam os que encontramos no outro cenário analisado. Entre este período e o fim do século, no cenário RCP4.5, quase todos os meses apresentam aumentos inferiores aos que encontramos entre o presente e o futuro próximo. De notar que em Fevereiro o aumento de temperatura atinge os 0,89 °C. No fim do século no cenário mais optimista, os aumentos de temperatura no Inverno e Verão (não mostrado) são um pouco inferiores aos que encontramos nas restantes estações. No cenário mais pessimista existe um aumento ligeiramente superior durante o Inverno em relação as restantes estações.



Figura 4.49 – Histogramas da temperatura máxima diária para a ilha da Madeira à esquerda e para a ilha de Porto Santo na direita. Nos gráficos superiores os dados representados são do cenário radiativos RCP4.5 e nos gráficos inferiores os dados referem-se ao cenário RCP8.5.

Na ilha da Madeira, a meio do século XXI para o cenário mais optimista, as previsões apresentam aumentos entre 0,19 °C e 1,36 °C em Maio. Entre os dois períodos em análise a maior subida de temperatura máxima na ilha da Madeira é registada em Fevereiro, que apresenta um aumento de 1,12 °C entre os dois períodos. Nos restantes meses, as variações variam dos 0,18 °C de Abril até aos 0,93 °C de Janeiro. Neste cenário, no fim do século, encontramos variações entre 1,30 °C em Fevereiro e os 2,09 °C em Março. Entre a Primavera e o Verão não existem grandes diferenças nos aumentos registados e nas restantes estações do ano o aumento é ligeiramente inferior. No cenário RCP8.5 no futuro mais próximo, são estimados aumentos que variam entre 0,95 °C novamente em Fevereiro e um máximo de 2,38 °C em Maio. Na escala sazonal (não mostrado) os aumentos no Inverno são apenas um pouco inferiores aos que são expectáveis nas restantes estações. Para o fim do século encontramos o menor aumento novamente em Fevereiro, e como acontece em Porto Santo, é neste mês que registamos o maior aumento de temperatura entre os dois períodos. Os maiores aumentos ocorrem em Junho (3,43 °C) e Julho (3,36 °C). Neste cenário o aumento de temperatura é ligeiramente maior durante o Verão, mas como não existem diferenças muito grandes entre as diferentes estações podemos afirmar que o aumento das temperaturas máximas é igualmente distribuído em todas as estações do ano.



Figura 4.50 – No topo a evolução mensal das temperaturas máxima previstas na ilha e Porto Santo e no gráfico inferior as anomalias mensais em relação à simulação de controlo.

4.3.5.3.3. Temperatura Mínima

Na tabela 4.34 apresentamos os resultados básicos da temperatura mínima diária obtidos para as simulações realizadas no âmbito do projecto para a Região Autónoma da Madeira. Tal como acontece na região dos Açores verificamos que o aumento da temperatura mínima é inferior aos aumentos que encontramos para a temperatura média e máxima diária. Esta discrepância leva a um aumento da amplitude térmica diária existente na região da Madeira.

Tabela 4.34 – Estatísticas básicas e percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99, da temperatura mínima diária prevista pelas simulações de controlo e dos cenários RCP4.5 e RCP8.5.

			Madeira		Porto Santo					
	Presente	RCP4.5 2040	RCP8.5 2040	RCP4.5 2080	RCP8.5 2080	Presente	RCP4.5 2040	RCP8.5 2040	RCP4.5 2080	RCP8.5 2080
MED (°C)	11.79	12.64	13.20	13.25	14.53	14.14	14.82	15.34	15.41	16.66
ΔT (°C)	-	0.85	1.41	1.46	2.74	0.00	0.68	1.20	1.27	2.51
STD (°C)	3.01	3.69	4.77	3.53	6.58	6.33	6.96	7.87	6.81	9.11
ΔSTD (adi)	-	0.22	0.58	0.17	1.18	0.00	0.10	0.24	0.08	0.44
P ₀₁	5.77	6.49	7.23	7.43	8.42	8.47	9.37	10.02	10.13	11.32
P ₀₅	7.29	7.94	8.51	8.73	9.82	9.96	10.63	11.15	11.31	12.55
P ₁₀	8.10	8.78	9.37	9.49	10.60	10.74	11.38	11.88	12.03	13.23
P ₂₅	9.57	10.32	10.86	10.98	12.18	12.14	12.74	13.22	13.38	14.59
P 50	11.67	12.55	13.15	13.11	14.54	14.05	14.80	15.28	15.27	16.65
P ₇₅	14.01	14.85	15.42	15.42	16.73	16.21	16.94	17.52	17.51	18.78
P ₉₀	15.47	16.40	16.88	16.97	18.30	17.73	18.29	18.83	18.98	20.08
P ₉₅	16.41	17.58	18.02	18.04	19.40	18.33	18.96	19.47	19.57	20.74
P ₉₉	18.83	20.31	20.93	20.51	21.86	19.24	20.06	20.58	20.60	21.80



Figura 4.51 – Histogramas da temperatura mínima diária para a ilha da Madeira à esquerda e para a ilha de Porto Santo na direita. Nos gráficos superiores os dados representados são do cenário radiativos RCP4.5 e nos gráficos inferiores os dados referem-se ao cenário RCP8.5.

As simulações efectuadas apresentam aumentos da temperatura mínima diária na Madeira que variam entre 0,85 °C e 1,41 °C para o futuro mais próximo e variações entre 1,46 °C e 2,74 °C, no fim do século XXI. Para a ilha de Porto Santo, o aumento previsto é menor, variando entre 0,68 °C e 1,19 °C, aumentando para o final do século para valores entre 1,27 °C e 2,52 °C. Encontramos também um aumento considerável da variabilidade diária, em especial no fim do século na ilha da Madeira. Olhando para os histogramas da temperatura mínima diária para ambas as ilhas (Figura 4.51) e resultados da tabela 4.34, podemos verificar além do aquecimento que os aumentos de temperatura nos percentis menores é menor aos que encontramos nos percentis de ordem superior. Também é evidente que as variações da temperatura mínima diária no cenário 4.5 são menores entre 2040-2060 e 2080-2100 do que entre o presente e 2040-2060 e que o aquecimento ocorrido no cenário RPC8.5 em 2040-2060 é, pelo menos, similar ao que ocorre no cenário RCP4.5 em 2080-2100.

Na escala mensal para a ilha da Madeira (Figura 4.52) no cenário RCP4.5 a meio do século excluindo o mês de Fevereiro que apresenta uma anomalia muito inferior às restantes (0,14 °C), encontramos anomalias entre 0,67 °C em Janeiro e os 1,12 °C de Maio, entre Maio e Julho e em Novembro todas as anomalias encontradas são a 1,0 °C. Neste cenário o aumento da temperatura

em DJF é inferior aos encontrados nas outras estações (não mostrado). Entre 2040-2060 e 2080-2100 as simulações apresentam um aumento de temperatura de 0,61 °C, ou seja o aquecimento é menor em relação ao que temos entre o clima presente e futuro próximo. Neste período as maiores subidas de temperatura são registadas nos meses de Verão e Inverno, com pouco impacto na amplitude do ciclo anual da temperatura mínima. À escala sazonal (não mostrado) no fim do século, os aumentos de temperatura são menores no Inverno, sendo que os aumentos registados nas restantes estações são bastante similares. Neste cenário os resultados em Porto Santo nos dois períodos são similares apresentando anomalias menores. A nível sazonal encontramos a menor anomalia no Inverno e nas restantes estações as anomalias rondam os 1,5 °C (acontecendo o mesmo em Porto Santo).



Figura 4.52 – No topo a evolução mensal das temperaturas mínimas previstas na ilha da Madeira e no gráfico inferior as anomalias mensais em relação à simulação de controlo.

No cenário RCP8.5 para a ilha da Madeira encontramos na escala mensal as menores anomalias em Fevereiro (0,85 °C) e Março (1,08 °C) e a maior anomalia é encontrada em Maio (1,93 °C), nos restantes meses as variações rondam os 1,40 a 1,60 °C. A nível sazonal, as anomalias rondam os 1,5 °C sendo ligeiramente inferiores no Outono e Inverno. No fim do século encontramos na escala mensal uma anomalia mínima de 2,42 °C em Março e anomalias que rondam os 3,0 °C em Junho, Julho, Novembro e Dezembro. Olhando para as diferentes estações do ano encontramos anomalias superiores a 2,6 °C em todas elas, sendo o Inverno e Verão as estações que apresentam maiores anomalias. Em Porto Santo encontramos os mesmos resultados e as maiores anomalias a nível sazonal rondam os 2,6 °C. Como já foi mencionado, as diferentes tendências de crescimento das temperaturas máximas e mínimas leva a uma alteração da amplitude térmica diária.

4.3.5.3.4. Precipitação

Na tabela 4.35 apresentamos os resultados estatísticos básicos da precipitação diária para a região da Madeira. Os resultados são preocupantes, uma vez que a precipitação é a única fonte de água numa ilha isolada. As estimativas para o meio do século XXI apontam para um decréscimo na ilha da Madeira entre 19% (0,46 mm/dia) a 24% (0,58 mm/dia) e estes valores para o fim do século variam entre os 27% (0,65 mm/dia) e 32% (0,76 mm/dia). Na ilha de Porto Santo esta diminuição também é bastante significativa, e agravada pelo facto de as taxas de precipitação na ilha de Porto Santo serem já muito menores que na ilha da Madeira. Para o futuro próximo as estimativas apontam para variações entre os 10% (0,10 mm/dia) e os 25% (0,25 mm/dia), e num futuro mais distante as perdas variam entre 19% (0,19 mm/dia) e 27% (0,27 mm/dia).



Figura 4.53 – Comparação entre os percentis dos cenários e a simulação histórica para a ilha da Madeira à direita e para a ilha de Porto Santo à esquerda. Nos gráficos superiores os dados relativos ao cenário RCP4.5 e nos gráficos inferiores os dados do cenário RCP8.5. A linha a vermelho representa a recta y = x e os percentis são representados pelos pontos e espaçados de 1 em 1.

Como podemos verificar na tabela 4.35 e Figura 4.53, para ambas as ilhas, todos os percentis das simulações apresentam redução de valor em comparação com os percentis da simulação de controlo. Entre os percentis 25 e 75, zona que caracteriza a maioria dos dias com

precipitação, existe uma redução considerável de intervalo, o que explica em parte a perda de precipitação. O número de dias sem chuva (Figura 4.54) aumenta de 28% para valores superiores a 32% a meio do século para ambos os cenários e no fim do século este valor aumenta para 34% outro facto que explica a perda de precipitação. Ao contrário do que acontece nos Açores, o número de dias com precipitação acima de 50mm/dia diminui, no entanto convém notar que os máximos absolutos previstos nas simulações futuros apresentam valores bastante superiores ao máximo obtido na simulação histórica a meio do século XXI enquanto no fim do século esses máximos são menores que os simulados para o clima presente.

Madeira Porto Santo RCP4.5 **RCP8.5** RCP4.5 RCP8.5 RCP4.5 **RCP8.5** RCP4.5 RCP8.5 Presente Presente 2040 2040 2080 2080 2040 2040 2080 2080 MED (mm/dia) 2.41 1.84 1.95 1.76 1.65 0.97 0.72 0.87 0.70 0.78 ΔP (adi) -0.19 -0.27 -0.32 0.00 -0.25 -0.19 -0.27 -0.24 -0.10 STD (mm/dia) 8.09 6.49 7.57 5.94 6.02 5.26 3.63 5.34 4.99 3.90 ΔSTD (adi) -0.20 -0.06 -0.27 -0.26 0.00 -0.31 0.01 -0.05 -0.26 P₀₁ 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 P₀₅ 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 \mathbf{P}_{10} 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 P₂₅ 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 P 50 0.08 0.06 0.03 0.04 0.03 0.01 0.01 0.00 0.00 0.01 P₇₅ 1.12 0.96 0.71 0.76 0.73 0.19 0.18 0.14 0.14 0.17 P₉₀ 5.53 4.11 4.20 4.18 3.56 1.30 0.99 0.86 0.84 0.86 P₉₅ 12.37 9.31 9.99 9.17 8.20 4.16 2.90 2.81 2.69 2.49 P₉₉ 38.71 29.52 30.54 28.25 27.40 20.97 14.43 19.96 16.93 14.71





Figura 4.54 – Número de dias com precipitação na ilha da Madeira para a simulação de controlo e para os dois cenários radiativos, para os diferentes períodos em análise.

À escala mensal na ilha da Madeira (Figura 4.55) no cenário RCP4.5 para 2040-2060, existe uma perda de precipitação considerável em Janeiro (2,36 mm/dia) e Março (2,16 mm/dia), sendo ligeiramente atenuada com um ganho de precipitação em Fevereiro (1,54 mm/dia). Nos restantes meses as perdas são obviamente superiores nos meses com precipitação mais elevada. No fim do século, neste cenário, o modelo regional prevê perdas em todos os meses sendo as maiores registadas ainda em Janeiro (1,92 mm/dia) e Marco (1,95 mm/dia). No cenário RCP8.5 existem pequenos ganhos de precipitação em Abril (0,11 mm/dia), Junho (0,17 mm/dia) e Agosto (0,42 mm/dia) enquanto os restantes meses apresentam perdas de precipitação sendo estas maiores em Janeiro (1,51 mm/dia), Março (1,57 mm/dia) e Setembro (1,08 mm/dia). No fim do século a previsão ainda é mais pessimista, tirando um acréscimo de precipitação em Fevereiro (0,71 mm/dia), todos os meses apresentam anomalias negativas e os meses de Março (2,03 mm/dia) e Dezembro (2,24 mm/dia) destacam-se pela negativa. A nível sazonal para a ilha da Madeira (não mostrado) no cenário RCP4.5 encontramos perdas superiores a 0,6 mm/dia no Outono, Primavera e Verão no futuro mais próximo e no fim do Século as perdas crescem no Outono e Inverno, existindo uma recuperação na Primavera. No cenário RCP8.5 no futuro mais próximo existe um pequeno ganho de precipitação durante o Verão, e durante os restantes meses as perdas são superiores a 0,5 mm/dia, sendo maiores no Outono e Inverno. No fim do século as perdas são superiores.



anomalias mensais em relação à simulação de controlo.

Em Porto Santo as anomalias no cenário RCP4.5 são superiores a 0,3 mm/dia na Primavera e Outono e apresentam valores que rondam os 0,1 mm/dia nas restantes estações em 2040-2060. No fim do século existe uma perda ainda maior durante o Inverno, no entanto esta anomalia é cancelada com recuperação de precipitação nas restantes estações, existindo durante 2080-2100 uma recuperação de precipitação em relação a 2040-2060. No cenário RCP8.5 encontramos um

ganho de 2,0 mm/dia durante o Verão e perdas superiores a 2,0 mm/dia durante o Outono e Inverno no futuro mais próximo, para o fim do século todas as estações apresentam perdas, existindo uma recuperação de precipitação durante o Inverno em comparação com o período anterior e aumento das perdas nas restantes estações.

4.3.5.3.5. Vento

Os resultados estatísticos básicos da intensidade do vento para a região da Madeira são apresentados na tabela 4.36. Estas apontam para perdas relativamente baixas na ilha da Madeira, da intensidade do vento. Para o meio do século as estimativas apontam para perdas que variam entre 1% (0,07 m/s) a 5% (0,25 m/s), sendo esta diminuição ligeiramente superior no final século, variando entre 3% (0,18 m/s) e 5% (0,27 m/s). Na ilha de Porto Santo as perdas são menos sentidas, apontando todas as estimativas para perdas com valores abaixo dos 3%, verificando assim uma pequena assimetria entre as duas ilhas. De notar também que no cenário RCP8.5 existe entre 2040-2060 e 2080-2100 um aumento da intensidade do vento prevista pelo modelo regional. Apesar destas perdas, podemos afirmar que de maneira geral, as anomalias são pouco significativas. Na ilha de Porto Santo a meio do século, existe uma diminuição significativa da variabilidade diária do vento, mas para o fim do século verificamos um aumento muito considerável da mesma. Na Madeira, no cenário RCP4.5, a variabilidade diminui a meio do século e apresenta um aumento bastante significativo para o fim do século.

VENTO			Madeira			Porto Santo					
	Presente	RCP4.5 2040	RCP8.5 2040	RCP4.5 2080	RCP8.5 2080	Presente	RCP4.5 2040	RCP8.5 2040	RCP4.5 2080	RCP8.5 2080	
MED (m/s)	5.47	5.40	5.21	5.29	5.20	6.77	6.74	6.56	6.62	6.64	
ΔV (adi)	-	-0.01	-0.05	-0.03	-0.05	-	0.00	-0.03	-0.02	-0.02	
STD (m/s)	0.08	0.07	0.08	0.21	0.07	0.14	0.10	0.04	0.22	0.35	
ΔSTD (adi)	-	-0.11	0.04	1.71	-0.16	-	-0.29	-0.70	0.61	1.58	
P ₀₁	0.66	0.61	0.60	0.62	0.62	1.29	1.08	1.00	1.14	1.27	
P ₀₅	1.45	1.37	1.32	1.32	1.41	2.59	2.48	2.41	2.42	2.60	
P ₁₀	1.98	1.95	1.89	1.90	1.94	3.49	3.47	3.35	3.29	3.49	
P ₂₅	3.32	3.40	3.17	3.21	3.25	5.01	5.05	4.83	4.89	5.04	
P 50	5.34	5.22	4.97	5.15	5.02	6.79	6.76	6.50	6.64	6.70	
P ₇₅	7.36	7.28	7.09	7.16	6.92	8.46	8.47	8.21	8.31	8.19	
P ₉₀	9.03	8.92	8.78	8.85	8.63	9.94	9.93	9.72	9.90	9.69	
P ₉₅	10.09	9.90	9.84	9.81	9.56	10.91	10.79	10.75	10.73	10.64	
Poo	12.05	11.68	12.04	11.62	11.60	13.05	12.64	13.04	12.45	12.56	

Tabela 4.36 – Estatísticas básicas e percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99, da intensidade do vento diário prevista pelas simulações de controlo e dos cenários RCP4.5 e RCP8.5.

No intervalo entre o percentil 25 e 75, os cenários futuros apontam para perdas ligeiras na ilha da Madeira, que são inferiores a 0,11 m/s no cenário RCP4.5 e 0,28 m/s no cenário mais pessimista. Na ilha de Porto Santo as perdas neste intervalo são quase nulas para o cenário RPC4.5 e variam entre 0,08 m/s e 0,14 m/s no outro cenário em análise. Todos os percentis apresentam pequenas anomalias negativas (Figura 4.56), existindo uma diminuição significativa

no evento mais extremo simulado pelo modelo. De modo geral, a disponibilidade do vento nos cenários futuros não é muito afectada pelas alterações climáticas, o que são boas notícias para o aproveitamento energético deste importante recurso.



Figura 4.56 – Comparação entre os percentis dos cenários e a simulação de controlo para a ilha da Madeira à direita e para a ilha de Porto Santo à esquerda. Nos gráficos superiores os dados relativos ao cenário RCP4.5 e nos gráficos inferiores os dados do cenário RCP8.5. A linha a vermelho representa a recta y = x e os percentis são representados pelos pontos e espaçados de 1 em 1.

Na ilha da Madeira e Porto Santo verificamos que a nível mensal o vento apresenta médias mensais quase constantes ao longo do ano, havendo apenas uma pequena diminuição da disponibilidade entre Setembro e Dezembro. Na ilha de Porto Santo (Figura 4.57) no cenário RCP4.5, as maiores perdas são previstas em Março (0,40 m/s), Setembro (0,36 m/s) e Dezembro (0,49 m/s). Estas perdas são quase anuladas com os ganhos registados em Fevereiro (0,35 m/s), Maio (0,31 m/s) e Junho (0,34 m/s) no futuro próximo. Para o fim do século, prevêem-se perdas maiores em Março (0,42 m/s), Julho (0,41 m/s), Novembro (0,37 m/s) e Dezembro (0,49 m/s) e apenas encontramos um ganho significativo em Outubro (0,37 m/s). No cenário RCP8.5, os resultados são de grosso modo similares destacando-se apenas as perdas significativas que ocorrem em Agosto, algo que não acontece no outro cenário. Globalmente verificamos que existe

um ganho de vento entre os dois períodos em estudo. De modo geral, os resultados da ilha da Madeira são iguais havendo em geral anomalias de maior magnitude. A nível sazonal na ilha de Porto Santo (não mostrado) existem para 2040-2060 pequenas perdas no Inverno e Outono. Nas restantes estações encontramos uma diferença entre os dois cenários, registando-se perdas significativas na Primavera e Verão no cenário de maior forçamento radiativo, não existindo grandes diferenças entre as simulações do clima presente e futuro para o outro cenário. No fim do século existem perdas similares entre os dois cenários no Inverno e Verão, e no cenário RCP4.5 existem perdas menores na Primavera e Outono, algo que não encontramos no outro cenário. Na ilha da Madeira existem em todos os cenários anomalias negativas em todos os meses do ano. No futuro próximo, os dois cenários apresentam diferenças significativas na Primavera e Verão, onde no cenário mais pessimista se verificam perdas substancialmente maiores, não havendo nas restantes estações do ano grandes diferenças entre os dois cenários. No fim do século, na Primavera e Inverno, os dois cenários apresentam anomalias similares e no Inverno e Verão as estimativas apontam para perdas mais significativas no cenário RCP8.5.



Figura 4.57 – No topo a evolução mensal da intensidade do vento previstas na ilha de Porto Santo e no gráfico inferior as anomalias mensais em relação à simulação de controlo.

4.3.5.3.6. Humidade Específica

Na tabela 4.37 apresentamos os resultados básicos obtidos para a humidade específica para as simulações efectuadas para a região da Madeira. Tal como acontece nos Açores, e sem surpresas, o conteúdo de água disponível à superfície apresenta anomalias positivas. Estas anomalias são menores no cenário RCP4.5 visto que o aquecimento previsto para este cenário é menor. No cenário com menor forçamento radiativo para a ilha da Madeira os aumentos variam entre os 4% (0,35 g/kg) e os 7% (0,57 g/kg) para o futuro mais próximo. Para o fim do século, as

estimativas apontam para aumentos de 8% (0,66 g/kg) a 17% (1,41 g/kg). Na ilha de Porto Santo as anomalias encontradas são um pouco maiores, para o período 2040-2060 as estimativas revelam aumentos entre 5% (0,44 g/kg) a 8% (0,74 g/kg) e no futuro mais distantes as anomalias variam entre os 9% (0,82 g/kg) e os 18% (1,73 g/kg). A variabilidade da humidade específica aumenta mais na ilha da Madeira, sendo os aumentos maiores encontrados no fim do século XXI. Nas simulações do clima futuro, em ambos os cenários, todos os percentis apresentam aumentos. Estes aumentos são menores nos percentis de ordem inferior quando comparados com os percentis mais elevados. Tal como acontece nos Açores, apesar de existir muito mais água disponível na atmosfera, esta fica retida na mesma e não precipita na região.

SHUM			Madeira			Porto Santo						
	<u> </u>	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	Presente	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5		
	Presente	2040	2040	2080	2080		2040	2040	2080	2080		
MED (g/kq)	8.15	8.50	8.72	8.81	9.56	9.63	10.07	10.37	10.45	11.36		
Δq (adi)	-	0.04	0.07	0.08	0.17	-	0.05	0.08	0.09	0.18		
STD (g/kg)	3.28	3.47	3.85	3.81	4.66	4.73	4.94	4.99	4.92	5.67		
ΔSTD (adi)	-	0.06	0.17	0.16	0.42	-	0.05	0.06	0.04	0.20		
P ₀₁	5.09	5.31	5.40	5.46	5.90	5.86	5.94	6.28	6.30	6.82		
P ₀₅	5.86	6.11	6.24	6.31	6.80	6.67	6.93	7.11	7.26	7.79		
P ₁₀	6.27	6.54	6.62	6.75	7.28	7.21	7.50	7.67	7.82	8.40		
P ₂₅	7.05	7.34	7.46	7.58	8.18	8.23	8.57	8.81	8.89	9.67		
P 50	8.06	8.40	8.61	8.75	9.44	9.52	9.97	10.27	10.37	11.28		
P ₇₅	9.19	9.59	9.93	9.96	10.88	11.03	11.60	11.97	11.98	13.09		
P ₉₀	10.11	10.58	10.89	10.95	11.96	12.13	12.71	13.08	13.18	14.28		
P ₉₅	10.67	11.17	11.47	11.53	12.55	12.75	13.34	13.71	13.84	14.98		
P ₉₉	12.14	12.37	12.85	12.89	13.86	13.74	14.50	14.87	14.93	16.12		

Tabela 4.37 – Estatísticas básicas e percentis 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 99, da humidade específica diária prevista pelas simulações de controlo e dos cenários RCP4.5 e RCP8.5.



Figura 4.58 – No topo a evolução mensal da humidade específica previstas na ilha da Madeira e no gráfico inferior as anomalias mensais em relação à simulação de controlo.

Na ilha da Madeira a nível mensal (Figura 4.58), encontramos anomalias positivas em todas as simulações do modelo regional. Em ambos os períodos, as anomalias encontradas são maiores nos meses de Verão e Outono e menores na Primavera. Entre o cenário RCP4.5 num futuro distante e o cenário RCP8.5 num futuro mais próximo, não existem grandes diferenças, havendo um claro destaque para o aumento no cenário RCP8.5 no fim do século XXI. Os resultados na ilha de Porto Santo são similares aos que descrevemos para a ilha da Madeira. A nível sazonal na ilha da Madeira (não mostrado), e também na ilha de Porto Santo, existem aumentos significativos no Verão e Outono e anomalias menores nas restantes estações. Estes resultados são iguais em ambos os cenários analisados e a diferenciação entre as diferentes estações do ano são maiores no final do século XXI.

4.3.5.4. Apreciação Global

Na tabela 4.38 apresentamos um resumo dos resultados por ilha, obtidos nas simulações do clima presente e futuro para a Região Autónoma dos Açores. No arquipélago dos Açores as estimativas apontam para um aumento generalizado das temperaturas média, máxima e mínima. Este aquecimento rondara os 1,1 °C a meio do século XXI e atingira valores próximos dos 2,6 °C no fim do século (Figura 4.59). A subida de temperatura é acompanhada por um aumento da humidade específica. A subida da temperatura apresenta uma dependência longitudinal, no grupo ocidental o aumento da temperatura é menor do que encontramos no grupo central, que por sua vez apresenta menores subidas que o grupo oriental. Dentro de cada grupo, as variações não apresentam assimetrias entre as ilhas que o constituem. As estimativas para o clima futuro apontam para perdas de precipitação em todas as ilhas que poderá apresentar reduções maiores que 10% no fim do século XXI (Figura 4.60). Existe uma diminuição dos dias com precipitação e um ligeiro aumento do número de dias com precipitação extrema.



Figura 4.59 – Anomalia da temperatura média no grupo central, entre a simulação de controlo e o cenário RCP85 em 2080-2100. Valores em Celsius.

Т

		Flores	Corvo	Faial	Graciosa	Pico	São Jorge	Terceira	São Miguel	Santa Maria
ura	Clima Presente (°C)	13.55	16.08	14.02	15.05	13.05	14.12	13.57	13.8	15.5
nperat Média	Variação RCP8.5 2040 (°C)	1.14	0.97	1.19	1.15	1.24	1.2	1.23	1.25	1.29
Ten	Variação RCP8.5 2080 (°C)	2.62	2.37	2.69	2.62	2.74	2.68	2.71	2.73	2.77
ura a	Clima Presente (°C)	15.80	16.98	16.32	17.51	15.29	16.55	15.98	16.24	18.10
nperat Náxim:	Variação RCP8.5 2040 (°C)	1.11	0.94	1.16	1.14	1.23	1.21	1.22	1.27	1.31
Ten	Variação RCP8.5 2080 (°C)	2.59	2.28	2.7	2.62	2.75	2.69	2.72	2.75	2.81
ura a	Clima Presente (°C)	11.25	15.11	11.82	12.61	10.88	11.78	11.25	11.53	13.04
ıperatı Aínima	Variação RCP8.5 2040 (°C)	1.19	1.02	1.23	1.18	1.27	1.23	1.27	1.27	1.28
Ten	Variação RCP8.5 2080 (°C)	2.71	2.47	2.74	2.69	2.77	2.74	2.78	2.77	2.77
ção	Clima Presente (mm/dia)	4.18	2.79	3.32	2.50	5.27	3.00	4.18	3.02	1.58
cipita	Variação RCP8.5 2040 (adi)	-0.03	-0.09	0.01	-0.03	-0.02	-0.03	-0.05	-0.01	-0.04
Pre	Variação RCP8.5 2080 (adi)	-0.05	-0.08	-0.06	-0.05	-0.11	-0.07	-0.11	-0.11	-0.12
	Clima Presente (m/s)	7.37	7.17	7.15	7.01	7.3	7.06	6.98	6.79	6.61
Vento	Variação RCP8.5 2040 (adi)	-0.05	-0.05	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
	Variação RCP8.5 2080 (adi)	-0.06	-0.07	-0.05	-0.06	-0.06	-0.06	-0.05	-0.04	-0.05
de ca	Clima Presente (g/kg)	8.84	10.10	8.87	8.84	8.61	8.80	8.67	8.72	9.03
umidac	Variação RCP8.5 2040 (adi)	0.09	0.08	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
Ηι Es	Variação RCP8.5 2080 (adi)	0.20	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

Tabela 4.38 – Quadro resumo, para a Região Autónoma dos Açores, dos resultados obtidos nas simulações de controlo e do cenário RCP8.5.

Г

No que toca ao vento, prevemos também uma diminuição da disponibilidade deste recurso, sendo a sua variação mais sentida no futuro imediato que entre o meio e fim do século XXI. As alterações do clima serão mais sentidas entre 2040-2060 e 2080-2100 do que entre o presente e 2040-2060.


Figura 4.60 – Perdas de precipitação no grupo central, entre a simulação de controlo e o cenário RCP85 em 2080-2100. Valores em percentagem.

Em relação à Região Autónoma da Madeira (tabela 4.39), muito do que dissemos para os Açores poderá ser repetido. O aquecimento a meio do século poderá ser superior a 1,2 °C e atingir valores superiores a 2,5 °C (Figura 4.61). Este aquecimento é acompanhado por um aumento da humidade específica. Os aumentos da temperatura são menos sentidos na ilha de Porto Santo. A diminuição da precipitação na ilha da Madeira poderá ser superior a 20% a meio do século XXI e atingirá valores de 30% no fim do mesmo (Figura 4.62).



Figura 4.61 – Anomalia da temperatura média na Madeira e Porto Santo, entre a simulação de controlo e o cenário RCP85 em 2080-2100. Valores em Celsius.

		Clima Presente	Variação RCP4.5 2040	Variação RCP8.5 2040	Variação RCP4.5 2080	Variação RCP8.5 2080
Madeira	Temperatura Média	13.95 °C	0.92 °C	1.50 °C	1.53 °C	2.85 °C
	Temperatura Máxima	16.66 °C	1.04 °C	1.64 °C	1.69 °C	3.05 °C
	Temperatura Mínima	11.79 °C	0.85 °C	1.41 °C	1.46 °C	2.74 °C
	Precipitação	2.41 mm/dia	-0.24 (adi)	-0.19 (adi)	-0.27 (adi)	-0.32 (adi)
	Vento	5.47 m/s	-0.01 (adi)	-0.05 (adi)	-0.03 (adi)	-0.05 (adi)
	Humidade Específica	8.15 g/kg	0.04 (adi)	0.07 (adi)	0.08 (adi)	0.17 (adi)
Porto Santo	Temperatura Média	16.57 °C	0.69 °C	1.24 °C	1.29 °C	2.49 °C
	Temperatura Máxima	19.32 °C	0.73 °C	1.31 °C	1.34 °C	2.53 ℃
	Temperatura Mínima	14.14°C	0.68 °C	1.20 °C	1.27 °C	2.51 ℃
	Precipitação	0.97 mm/dia	-0.25 (adi)	-0.10 (adi)	-0.19 (adi)	-0.27 (adi)
	Vento	6.77 m/s	0.00 (adi)	-0.03 (adi)	-0.02 (adi)	-0.02 (adi)
	Humidade Específica	9.63 g/kg	0.05 (adi)	0.08 (adi)	0.09 (adi)	0.18 (adi)

Tabela 4.39 – Quadro resumo, para a Região Autónoma da Madeira, dos resultados obtidos nas simulações de controlo e dos cenários RCP4.5 e RCP8.5.



Figura 4.62 – Perdas de precipitação na Madeira e Porto Santo, entre a simulação de controlo e o cenário RCP85 em 2080-2100. Valores em percentagem.

O recurso eólico disponível nas duas ilhas será também um pouco menor nos cenários futuros mas não apresenta uma queda muito significativa. Notamos facilmente que o cenário RCP8.5 apresenta anomalias climáticas mais intensas, sendo os resultados deste último a meio do século similares àqueles que encontramos no primeiro, no fim do século. Infelizmente, como já referimos, os dados actuais parecem apontar que o cenário mais provável é o cenário RCP8.5.

5. Conclusões

A evolução recente das metodologias de modelação climática criou as condições para, pela primeira vez, realizar a regionalização dinâmica de cenários climáticos em territórios insulares, caracterizados por pequena dimensão horizontal e grande complexidade topográfica. Estes territórios, apesar de fortemente afectados pela influência marítima são, em geral, caracterizados por intensos gradientes climáticos, afectando a generalidade das variáveis de interesse, mas em especial a precipitação. A sua reduzida dimensão e diversas outras características peculiares tornam as ilhas locais extremamente sensíveis a mudanças e variabilidade climática, aumento a importância da informação que pode ser obtida em estudos como o que aqui foi apresentado.

A metodologia desenvolvida ao longo deste trabalho consistiu na análise de resultados globais produzidos pelo modelo EC-Earth, um novo modelo global em desenvolvimento onde Portugal participa, por intermédio do IDL e do IPMA, com ênfase para o seu desempenho na região do Atlântico subtropical, onde se encontram os Açores e a Madeira, e sua regionalização em resolução horizontal até aos 6 km, com o modelo WRF. A reanálise ERA-Interim, correspondente à melhor informação existente sobre o clima global nas últimas décadas, foi utilizada quer para validar a simulação de controlo EC-Earth quer como condição fronteira para o modelo WRF, numa simulação do clima recente sincronizada que foi validada contra observações pontuais em estações.

Comparando o modelo global, EC-Earth com a reanálise da ERA-Interim, verificamos que o modelo é frio nos trópicos e sobre a terra, e apresenta um viés positivo nas regiões oceânicas do hemisfério sul e nas regiões de afloramento costeiro. O viés encontrado no hemisfério sul é uma característica comum dos modelos globais que usam o NEMO como modelo oceânico (Salas y Mélia *et al.*, 2005). O EC-Earth apresenta um défice de precipitação na Zona Intertropical de Convergência, associado a um ligeiro viés negativo da temperatura da superfície do oceano nessa zona, e uma tendência para a formação de uma dupla ITCZ sobre o Pacífico. Globalmente, o EC-Earth, apresenta temperaturas um pouco mais frias e menos precipitação que a ERA-Interim, mas representa com precisão o ciclo anual e global, apresentando tendências de aquecimento similares aos dados observacionais disponíveis.

As projecções futuras do modelo EC-Earth, apontam para um aumento de temperatura de 3,94 °C no cenário RCP8.5 e de 1,65 °C no cenário RCP4.5 no fim do século XXI. Ambos os cenários começam a divergir a partir de 2030, altura em que o forçamento radiativo entre os dois cenários também diverge. O modelo projecta também um aumento da precipitação para o fim do século XXI, que pode estar relacionado com o aumento de temperatura devido ao aumento da evaporação e ao aumento da capacidade da atmosfera de reter humidade. No cenário RCP8.5 a simulação aponta para um aumento global de 0,23 mm/dia, no cenário RCP4.5 o aumento é menos acentuado (0,09 mm/dia). As projecções mostram que a precipitação aumenta nas altas latitudes (acima dos 40 °N e 40 °S), ganho que é acompanhado por perdas de precipitação na região subtropical, em particular na região mediterrânica.

Comparando os resultados regionais do modelo WRF, o modelo global e a reanálise ERA-Interim, contra as observações disponíveis nas Regiões Autónomas dos Açores e Madeira, verificamos que a ERA-Interim é superior ao EC-Earth, como seria de esperar. A vantagem da reanálise não é surpreendente não só porque a EC-Earth é uma simulação assíncrona, como a reanálise conta com um sofisticado pacote de assimilação de dados observacionais. Verificamos que o modelo regional na resolução de 24 km apresenta resultados semelhantes aos forçamentos utilizados. Esta semelhança deve-se não só à fraca influência topográfica nesta resolução como ao facto de ter sido utilizado *nudging* nos domínios exteriores do modelo regional. De modo geral, o modelo regional na resolução de 6 km apresenta melhorias muito significativas em relação aos forçamentos, principalmente quando olhamos para dados da precipitação.

Na Região Autónoma dos Açores, o domínio de alta resolução do modelo regional forçado com EC-Earth, verificamos que o modelo consegue modelar bem o ciclo anual da temperatura máxima e mínima, apresentando no entanto uma subavaliação da temperatura máxima em todos os meses, com valores que variam entre os 2,5 °C e os 3,0 °C. As mesmas conclusões podem ser aplicadas à temperatura mínima. No que toca à precipitação, existe uma sobreavaliação do modelo regional no grupo ocidental e central, enquanto no grupo oriental o modelo tende a subavaliar a precipitação ocorrida. Em todos os grupos a precipitação ocorrida no Verão é bastante subestimada, e no grupo central e ocidental existe uma forte sobrestimação nos primeiros quatro meses do ano.

Na Região Autónoma da Madeira, a temperatura máxima também é subestimada sendo o erro superior ao que encontramos na região dos Açores, apesar de na Madeira existir um ganho maior entre a baixa e alta resolução do modelo global. Nesta região a temperatura mínima é subestimada sendo o erro de -1,17 °C na ilha da Madeira e de -2,37°C na ilha de Porto Santo. A alta resolução é particularmente importante na ilha da Madeira, onde a precipitação apresenta uma melhoria bastante significativa entre as duas resoluções. Apesar da melhoria encontrada na alta resolução, na ilha da Madeira ainda encontramos uma subavaliação significativa da precipitação, mas na ilha de Porto Santo a precipitação é bem capturada. Globalmente, o modelo regional na resolução de 6 km consegue capturar bem o ciclo anual da precipitação e temperatura nas Regiões Autónomas da Madeira e dos Açores, apresentando uma melhor representação estatística das distribuições observadas.

Na avaliação das alterações climáticas nas ilhas dos Açores e Madeira, analisamos dados da temperatura média, máxima, mínima, precipitação, vento e humidade à escala diária e mensal, usando o cenário RCP8.5 como forçamento radiativo na região dos Açores, e para a Madeira além do forçamento radiativo RCP8.5 também usamos o cenário RCP4.5.

Na Região Autónoma dos Açores, as projecções do modelo regional apontam para um aumento generalizado das temperaturas máximas, mínimas e médias. Os resultados apontam para aquecimentos de rondam os 1,0 °C para o meio do século XXI e aumentos próximos dos 2,5 °C no fim do século. O aumento de temperatura é acompanhado por um aumento da humidade específica. A subida da temperatura não é proporcional em todos os grupos, sendo que o aumento de temperatura é mais sentido no grupo oriental e menos acentuado no grupo

ocidental. Dentro de cada grupo o aumento de temperatura em cada ilha não varia significativamente. As estimativas apontam para perdas de precipitação de 10% no fim do século XXI, havendo uma redução do número de dias com precipitação e um aumento de eventos de precipitação intensa. Esta diminuição deve ser levada em conta em medidas de adaptação, uma vez que este recurso é o mais vital numa região isolada como as ilhas dos Açores. As projecções sugerem, também, uma diminuição da disponibilidade de vento, o que poderá ter impacto no aproveitamento energético deste recurso. Os resultados do modelo regional, apresentam alguma diferença em relação ao estudo SIAMII (Miranda *et al.*, 2006), onde usando dados de modelos regionais, as estimativas apontavam para um aumento de temperatura entre 1 °C a 2 °C, sendo estes valores inferiores aos que obtemos neste estudo onde o aquecimento ronda os 2,5 °C. O SIAMII também apontava para uma manutenção da precipitação anual, sendo que os resultados aqui apresentados apontam para uma perda de precipitação. No cenário RCP8.5, os resultados sugerem uma alteração climática mais intensa entre 2040-2060 e 2080-2100 do que entre o presente e 2040-2060.

Na Região Autónoma da Madeira, as projecções do modelo global apontam para aumentos de temperatura que variam entre os 1,2 °C a meio do século XXI e os 2,5 °C no fim do século. Estes resultados encontram-se dentro do alcance de 2 °C a 3 °C de aumento encontrado no projecto SIAMII. Como seria de esperar, o aumento de temperatura é acompanhado de um aumento da humidade específica, e o aumento de temperatura é menos sentido na ilha de Porto Santo. A redução da precipitação é superior a 20% a meio do século XXI, sendo a redução de 30% no fim do século XXI, valor também consistente com os resultados obtidos no SIAMII. As projecções apontam para uma diminuição dos dias com precipitação e, ao contrário do que acontece nos Açores, uma diminuição do número de dias com precipitação extrema. Olhando para o recurso eólico, verificamos que não se verifica uma diferença significativa na sua disponibilidade no futuro. As alterações climáticas projectadas são mais rápidas entre 2040-2060 e 2080-2100 do que entre o presente e 2040-2060, e notamos que o cenário RCP4.5 é mais favorável para a actividade humana, sendo as projecções para o fim do século XXI.

Apesar dos resultados aqui apresentados ainda não estarem ainda publicados, no período de preparação desta dissertação o autor esteve envolvido em diversas colaborações, em que se usaram metodologias de modelação atmosférica desenvolvidas nesta tese, que culminaram em cinco publicações:

- Sempreviva, A.M., Schiano, M.E., Pensieri, S., Semedo, A., Tomé, R., Bozzano, R., Borghini, M., Grasso, F., Soerensen, L.L., Teixeira, J. e Transerici, C. (2010): Observed Development of the Vertical Structure of the Marine Boundary Layer during the LASIE Experiment in the Ligurian Sea. Annales Geophysicae, 28(1):17-25.
- Nico, G., Tomé, R., Catalão, J. e Miranda, P.M.A. (2011): On the Use of the WRF Model to Mitigate Tropospheric Phase Delay Effects in

SAR Interferograms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49(12):4970-4976.

- 3. Couvelard, Х., Caldeita, R.M.A., Araújo, I.B. Tomé, R. е (2012): Wind Mediated Vorticity-Generation and Eddy-Confinement, Leeward of the Madeira Island: 2008 Numerical Case Study. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 58:128-149.
- Mateus, P., Nico, G., Tomé, R., Catalão, J. e Miranda, P.M.A. (2013): Experimental Study on the Atmospheric Delay Based on GPS, SAR Interferometry, and Numerical Weather Model Data, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 51(1):6-11.
- Caldeira, R. e Tomé, R. (2013): Wake Response to an Ocean-Feedback Mechanism: Madeira Island Case Study, Boundary-Layer Meteorology, DOI 10.1007/s10546-013-9817-y.

6. Referências

- Arakawa, A., e Lamb, V.R. (1977): Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation Model. Methods in Computational Physics 17:173-265.
- Belcher, S.E., et al. (2012): A global perspective on Langmuir turbulence in the ocean surface boundary layer. Geophysical Research Letters 39, L18605, 1–9.
- Betts A.K., e Miller, M.J. (1986): A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, and arctic air-mass data sets. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 112(473), 693–709
- Betts, A.K. (1986): A new convective adjustment scheme. Part I: Observational and theoretical basis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 112(473), 677–691.
- Caires, S., et al. (2004): Intercomparison of Different Wind–Wave Reanalyses. Journal of Climate, 17(10), 1893–1913.
- Caires, S., et al. (2005): Global ocean mean wave period data: validation and description Journal of Geophysical Research, 110(C2), 1-12.
- Carter, T.R., e La Rovere, E.L. (2001): Developing and applying scenarios. In: McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J. and White, K.S. (eds) Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Chen, F., e Dudhia, J. (2001): Coupling an advanced land surface–hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity. Monthly Weather Review, 129(4), 569–585
- Collins, W.D., et al. (2004): Description of the NCAR community atmospheric model (CAM 3.0). NCAR tech. note, NCAR/TN-4641STR, 226 pp.
- Craik, A.D.D., e Leibovich, S. (1976): A rational model for Langmuir circulations. Journal of Fluid Mechanics, 73(3), 401-426.
- Cubasch, U, et al (1996): Estimates of climate change in Southern Europe using different downscaling techniques. Climate Research, 7:129-149.
- D'Asaro, E.A. (2001): Turbulent Vertical Kinetic Energy in the Ocean Mixed Layer. Journal of Physical Oceanography, 31(12), 3530–3537.
- Dee, D.P., et al. (2011): The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137(656), 553-597.

- Denis, B., et al. (2002): Spectral decomposition of two-dimensional atmospheric fields on limitedarea domains using the Discrete Cosine Transform (DCT). Monthly Weather Review, 130(7), 1812–1829.
- Dutra, E., et al. (2010): An improved snow scheme for the ECMWF landsurface model: description and offline validation. Journal of Hydrometeorology, 11(4), 899–916.
- ECMWF (2006): IFS documentation. Available online at http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs/ CY31R1/index.html.
- Emanuel, K., et al. (2008): Hurricanes and Global Warming: Results from Downscaling IPCC AR4 Simulations. Bulletin of the American Meteorological Society, 89, 347-367.
- Fichefet, T., e Morales Maqueda, M.A. (1997): Sensitivity of a global sea ice model to the treatment of ice thermodynamics and dynamics. Journal of Geophysical Research, 102(C6), 12609–12646.
- Fox-Kemper, B., et al. (2011): Parameterization of mixed layer eddies. III: Implementation and impact in global ocean climate simulations. Ocean Modelling, 39(1-2), 61–78.
- Gibelin, A-L., e Déqué, M. (2003): Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. Climate Dynamics, 20(4), 327–339.
- Giorgi, F (1990): Simulation of regional climate using a limited area model in a general circulation model. Journal of Climate, 3(9), 941–963.
- Goodess, C. (2000): Climate Change Scenarios No.9, Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich, UK, 5pp.
- Grant, A.L.M., e Belcher, S.E. (2009): Characteristics of Langmuir Turbulence in the Ocean Mixed Layer. Journal of Physical Oceanography, 39(8), 1871-1887.
- Hanley, K.E., et al. (2010): A Global Climatology of Wind–Wave Interaction. Journal of Physical Oceanography, 40(6), 1263–1282.
- Harcourt, R.R. (2013): A Second-Moment Closure Model of Langmuir Turbulence. Journal of Physical Oceanography, 43(4), 673–697.
- Hazeleger, W., et al. (2010): EC-Earth: A Seamless Earth-System Prediction Approach in Action. Bulletin of the American Meteorological Society, 91(10), 1357-1363.
- Hazeleger, W., et al. (2012): EC-Earth V2.2: description and validation of a new seamless Earth system prediction model. Climate Dynamics, 39(11), 2611-2629.
- Hewitson, B.C., e Crane, R.G. (1996): Climate downscaling: techniques and application. Climate Research, 7(2): 85–95.
- Hibler, W.D. (1979): A dynamic thermodynamic sea ice model. Journal of Physical Oceanography, 9(4), 815–846.

- Hong, S-Y., e Lim, J-O.J. (2006): The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). Journal of the Korean Meteorological Society, 42(2), 129–151.
- Houghton, J.T., et al. (2001): Climate Change 2001: the scientific basis. Contribution of Working Group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC FAR WG1 (2007), in Solomon, S, Qin, D, Manning, M, Chen, Z, Marquis, M, Averyt, KB, Tignor, M, e Miller, HL: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 1007 pp.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to he 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, 996 pp.
- IPCC-TGICA (2007): General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 2. Prepared by T.R. Carter on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment, 66 pp.
- Janjic, Z.I. (1990): The step-mountain coordinate: physical package. Monthly Weather Review, 118(7), 1429–1443.
- Janjic, Z.I. (1994): The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes. Monthly Weather Review, 122(5), 927–945.
- Janjic, Z.I. (2000): Comments on "development and evaluation of a convection scheme for use in climate models". Journal of Atmospheric Sciences, 57(21), 3686-3686.
- Janjic, Z.I. (2001); Nonsingular implementation of the Mellor–Yamada level 2.5 scheme in the NCEP meso model. NCEP office note 437, 61 pp.
- Jones R.G., et al. (1995): Simulation of climate change over Europe using a nested regional-climate model. I: Assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 121(526), 1413–1449.
- Kantha, L.H., e Clayson, C.A. (2000): Small Scale Processes in Geophysical Fluid Flows. International Geophysics Series, 67, Academic Press, San Diego, pp 888.
- Kantha, LH, e Clayson, CA (2004): On the effect of surface gravity waves on mixing in the oceanic mixed layer. Ocean Modelling, 6(2), 101-124.
- Kara, A.B., et al. (2007): Wind Stress Drag Coefficient over the Global Ocean. Journal of Climate, 20(23), 5856–5864.

- Karl, T.R., et al. (2000): The record breaking global temperature of 1997 and 1998: evidence for an increase in the rate of global warming?. Geophysical Research Letters, 27(5), 719-722.
- Klinger, B.A., et al. (2006): Monthly Climatologies of Oceanic Friction Velocity Cubed. J. Climate, 19(21), 5700–5708.
- Knutsen, T.R., et al. (2008): Simulated reduction in Atlantic hurricane frequency under twentyfirst-century warming conditions. Nature Geoscience, 1, 359-364.
- Komen, G. J., et al. (1994): Dynamics and Modelling of Ocean Waves. Cambridge University Press, 532pp.
- Large, W.G., et al. (1994): Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. Reviews of Geophysics 32(4), 363–403.
- Leung, L.R., et al. (2006): Research Needs and Directions of Regional Climate Modeling Using WRF and CCSM. Bulletin of the American Meteorological Society, 87(12), 1747-1751.
- Madec, G. (2008): NEMO ocean engine. Note du Pole de modélisation- Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France, No 27 ISSN No 1288-161, 217pp.
- McWilliams, J.C., e Sullivan, P.P. (2000): Vertical Mixing by Langmuir Circulations. Spill Science & Technology Bulletin, 6(3-4), 225-237.
- McWilliams, J.C., et al. (1997): Langmuir turbulence in the ocean. Journal of Fluid Mechanics, 334, 1–30.
- Miranda, P.M.A., et al. (2002): 20th Century Portuguese Climate and Climate Scenarios. In Santos,F.D., K Forbes and R. Moita (eds) Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts andAdptation Measures". Gradiva, 27-83.
- Miranda, P.M.A., et al. (2006): O clima de Portugal nos séculos XX e XXI. In Santos e Miranda (eds), Gradiva, 47-113.
- Monin, A.S., e Obukhov, A.M. (1954): Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. Trudy Geofizicheskigi Instituta Akademiya Nauk SSSR, 24(151), 163-187.
- Moss, R.H., et al. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature, 463, 747-756.
- Murphy, J. (1999): An Evaluation on Statistical and Dynamical Techniques for Downscaling Local Climate. Journal of Climate, 12(8), 2256-2284.
- Nakicenovic, N., et al (2000): Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. Cambridge, U.K., 599 pp.
- Neilson, R.P. e R.J. Drapek, (1998): Potentially complex biosphere responses to transient global warming. Global Change Biology, 4, 505-521.

- Nurse, L., e Moore, R. (2005): Adaptation to global climate change: an urgent requirement for Small Island Developing States. Review of European Community and International Environmental Law, 14, 100-107.
- Peterson, L.C., et al. (2000): Rapid Changes in the Hydrologic Cycle of the Tropical Atlantic During the Last Glacial. Science, 290:1947-1951.
- Pierson, W. J., e Moskowitz, L. (1964): A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S A Kitaigorodskii, Journal of Geophysical Research, 69(24), 5181-5190.
- Price, D.T., e Flannigan, M.D. (2000): Assessing the Impact of Climate Change on Forests and Forestry using Climate Scenarios: Current Practice and Future Directions 32. Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich, UK, 120pp.
- Saetra, Ø., et al. (2007): Sea-State-Dependent Momentum Fluxes for Ocean Modeling. Journal of Physical Oceanography, 37(11), 2714–2725.
- Salas y Mélia, D., et al. (2005): Description and validation of CNRM-CM3 global coupled climate model. Note de Centre National de Recherches Météorogiques, France, 36pp.
- Sallee, J.B., et al. (2013): Assessment of Southern Ocean mixed layer depths in CMIP5 models: Historical bias and forcing response. Journal of Geophysical Research: Oceans 118(4), 1845-1862.
- Semtner, A.J. (1976): A model for the thermodynamic growth of sea ice in numerical investigations of climate. Journal of Physical Oceanography, 6(3), 379–389
- Skamarock, W.C., et al. (2008): A description of the advanced research WRF version 3. NCAR tech. note TN-475_STR, 113 pp.
- Smith, J.A. (1992): Observed Growth of Langmuir Circulation. Journal of Geophysical Research, 97(4), 5651-5664.
- Smith, R.B., e Barstad, I. (2004): A linear theory of orographic precipitation. Journal of Atmospheric Sciences, 61(12), 1377–1391.
- Smyth, W.D., et al. (2002): Nonlocal fluxes and Stokes Drift effects in the K-Profile Parameterization. Ocean Dynamics, 52(3), 104-115.
- Soares, P.M.M., et al. (2012): WRF high resolution dynamical downscaling of ERA-Interim for Portugal, Climate Dynamics, 39(9-10), 2497-2522.
- Stauffer D.R., e Seaman N.L. (1990): Use of four-dimensional data assimilation in a limited area mesoscale model. Part I: experiments with synoptic-scale data. Monthly Weather Review, 118(6), 1250–1277.
- Sterl, A., e Caires, S. (2005): Climatology, variability and extrema of ocean waves: the Web-based KNMI/ERA-40 wave atlas. International Journal of Climatolology, 25(7), 963–977.

- Sterl, A., et al. (2012): A look at the ocean in the EC-Earth climate model. Climate Dynamics, 39(11), 2631-2657.
- Sullivan, P.P., e McWilliams, J.C. (2010): Dynamics of winds and currents coupled to surface waves. Annual Review of Fluid Mechanics, 42, 19-42.
- Sullivan, P.P., et al. (2008): Large-eddy simulations and observations of atmospheric marine boundary layers above nonequilibrium surface waves, Journal of the Atmospheric Sciences, 65(4), 1225–1245.
- Tseng, R.S., D'Asaro, E.A. (2004): Measurements of turbulent vertical kinetic energy in the ocean mixed layer from Lagrangian floats. Journal of Physical Oceanography 34(9), 1984–1990.
- Uppala, S., et al., 2005: The ERA-40 re-analysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 131(612), 2961-3012.
- Valcke, S. (2006): OASIS3 user guide (prism_2-5). CERFACS technical report TR/CMGC/06/73, PRISM Report No 3, France, 60 pp.
- van den Hurk, B., e Viterbo, P. (2003): The Torne-Kalix PILPS 2(e) experiment as a test bed for odifications to the ECMWF land surface scheme. Global Planetary Change, 38(1-2), 165–173.
- Von Storch, H., et al. (1993). Downscaling of global climate change estimates to regional scales: an application to Iberian rainfall in wintertime. Journal of Climate, 6(6), 1161-1171.
- Wang, D., et al. (1998): Large-eddy simulation of the diurnal cycle of deep equatorial turbulence. Journal of Physical Oceanography 28(1), 129–148.
- Webb, A., Fox-Kemper, B., 2010. Global model sensitivity to parameterizing Langmuir circulation. Poster session presented at: CIRES Scientific Rendezvous, Boulder, CO. Disponível online, em http://cires.colorado.edu/science/groups/foxkemper/people/pdfs/WebbFoxKemper09c i res.pdf
- Wilks, D.S. (1992): Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies. Climatic Change, 22(1), 67–84.
- Yin, J.H. (2005): A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate. Geophysical Research Letters, 32(18), L18701.

7. Anexo – Climatologia da Circulação de Langmuir

7.1 Motivação

O seguinte trabalho encontra-se ainda em fase preliminar e procura averiguar a possibilidade das circulações de Langmuir serem responsáveis, em parte, pelo viés da temperatura encontrado na maioria dos modelos globais nas regiões de latitudes elevadas (ver figura 4.01).

Os Oceanos desempenham um papel fundamental na regulação do clima da Terra, através de mecanismos como o transporte de calor do equador para os polos e o armazenamento de gases de efeito estufa. A interface ar-mar é uma região particularmente importante onde ocorrem importantes trocas de momento, energia e gases. Estas trocas dependem das condições do estado do mar bem como da profundidade e propriedades da camada de mistura oceânica. As propriedades físicas de submesoscala que criam esta camada não são bem resolvidas nos GCM's, sendo importante resolver com precisão esta região turbulenta nos modelos de clima. Por tradição, os esquemas de mistura de superfície nos modelos de clima, focam-se na turbulência de cisalhamento e convectiva. Mas, a rebentação de ondas e as circulações de Langmuir também desempenham um papel importante na camada de mistura (Tseng e D'Asaro, 2004). Actualmente estes dois efeitos são incluídos indirectamente nos modelos globais, usando parametrizações calibradas que não incluem informação sobre a ondulação oceânica (Wang *et al.*, 1998; Large *et al.*, 1994).

As células de Langmuir são pequenos vórtices que se formam perto da superfície do oceano quando o vento e as ondas se movem aproximadamente na mesma direcção (Smith, 2001). Dependendo da velocidade do vento e das ondas, estas células podem aumentar significativamente a mistura dentro da camada de mistura oceânica (Tseng e D'Asaro, 2004; Belcher *et al.*, 2012). Observações efectuadas indicam que mesmo quando este tipo de células não é óbvio, a turbulência por elas criada pode levar à duplicação da enérgica cinética turbulenta que seria expectável sem a sua presença (D'Asaro, 2001).

A modelação numérica das circulações de Langmuir, é actualmente uma área relativamente activa de investigação (Sullivan e McWilliams, 2010). A teoria aceite por detrás das circulações de Langmuir é um conjunto de equações de Navier-Stokes filtradas denominadas de equações de Craik-Leibovich (Craik e Leibovich, 1976). No caso em que existe alinhamento entre o campo do vento e o campo das ondas tem sido feito um esforço no desenvolvimento de esquemas de mistura vertical (McWilliams e Sullivan, 2000; Kantha e Clayson, 2004; Harcourt, 2013; Smyth *et al.*, 2002). A medida aceite na medição da importância das células de Langmuir na mistura, é o número turbulento de Langmuir (McWilliams, *et al.*, 1997),

$$La_{tur} = \sqrt{\frac{W_*}{u_s}}$$
(7.12)

onde w_* representa a velocidade de fricção oceânica e u_s a deriva de Stokes à superfície. O número turbulento de Langmuir, pode ser interpretado com a razão entre a produção de energia cinética turbulenta devida a corrente oceânica e a produção de energia cinética turbulenta devida à deriva de Stokes (Grant e Belcher, 2009).

Campanhas observacionais da profundidade da camada de mistura oceânica são frequentemente usadas na validação dos modelos globais. Na maioria dos modelos globais, existe um viés persistente, de camadas de mistura com pouca profundidade no oceano nas regiões perto do polos durante os respectivos invernos (Belcher *et al.*, 2012; Fox-Kemper *et al.*, 2011; Salle *et al.*, 2013). Este viés contribui para um erro da temperatura da superfície do mar que pode atingir os 3 °C a 4 °C (ver figura 4.01). Sendo assim existe um interesse na comunidade da modelação climática na correcção deste viés nos modelos. Nestas regiões, a contribuição da convecção e a e das células de Langmuir para a mistura oceânica deve ser similar devido a combinação de ventos fortes e à presença de ondas de grande amplitude (Belcher *et al.*, 2012).

7.2 Introdução

Nesta secção, utilizamos dados da reanálise ERA-40 do ECMWF para calcular uma climatologia global do Número Turbulento de Langmuir, introduzido por McWilliams (1997). A escolha da ERA-40, em detrimento da ERA-INTERIM, deve-se ao facto de nesta última reanálise, o campo de ondas ainda não estar validado contra observações.

A ERA-40 (Uppala et al., 2005), concluída em 2004, é uma simulação em modo de reanálise com duração de 45 anos (Setembro de 1957 a Agosto de 2002) produzida usando o Sistema Integrado de Previsão do ECMWF (IFS). Este sistema contava com um esquema de assimilação de dados (3DVAR) e um sistema de modelação acoplado bidireccional atmosferaondas. O sistema integrado de Previsão do ECMWF não é um verdadeiro modelo de clima, pois não integra um modelo oceânico. A ERA-40 foi criada a partir do melhor modelo e métodos de assimilação existentes na época, de forma a criar uma base de dados o mais homogénea possível, uma vez que tem como objectivo suprimir heterogeneidades relacionadas com as naturais alterações dos modelos, métodos de assimilação e sistemas observacionais. Infelizmente, devido a alterações dos sistemas observacionais disponíveis e devido a uma cobertura observacional não homogénea do globo ainda existem importantes heterogeneidades. Esta base de dados apresenta dados globais a cada 6 horas, com uma resolução horizontal de 1,5° e 60 níveis verticais, de variáveis meteorológicas e parâmetros relativos à ondulação oceânica. O modelo de ondas utilizado no IFS é o modelo WAM de 3ª geração. Os resultados deste modelo variam em grande parte devido a mudanças dos produtos de satélite assimilados durante a corrida de reanálise, não apresentando assim um campo completamente homogéneo ao longo do tempo. Quatro períodos podem ser identificados na figura 7.01:

• Período 1 (Setembro de 1957 a Novembro de 1991): Não existe informação de alturas significativas das ondas de satélite assimiladas. Apesar do campo médio das ondas

se comparar bem com as observações, a ERA-40 de modo geral subestima as ondas de grande altura e sobrestima as ondas de pequena altura;

• Período 2 (Dezembro de 1991 a Maio de 1993): Durante este período dados anómalos da altura significativa das ondas provenientes do ERS-1 foram assimilados. Valores de altura significativa de 1-3 metros são sobrestimados, ondas com alturas acima dos 3 metros apresentam erros semelhantes ao período 1;

 Período 3 (Janeiro de 1994 a Maio 1996): Os dados do ERS-1 assimilados já não são anómalos, mas um método de calibração já conhecido não é aplicado pois cria um viés positivo no campo do período médio das ondas;

• Período 4 (Junho de 1996 a Dezembro 2002): Assimilação de dados calibrados do ERS-2. A ERA-40 subestima campo de ondas de grande altura e sobrestima ligeiramente os campos de onda de baixa altura.

De forma a evitar os dados anómalos do segundo período, optamos por não os utilizar nesta análise. Detalhes adicionais sobre a reanálise de ondas da ERA-40 podem ser consultados em Caires e Sterl (2005) e Caires *et al.* (2005), e uma comparação deste produto com terceiros pode ser consultado em Caires *et al.* (2004).



O Número da Turbulento de Langmuir (McWilliams *et al.*, 1997) pretende quantificar a mistura adicional que ocorre no Oceano quando as células de Langmuir estão presentes e foi definido como:

$$La_{tur} = \sqrt{\frac{w_*}{u_s}} \tag{7.1}$$

onde w_* representa a velocidade de fricção oceânica devida ao vento e u_s representa a velocidade da deriva de Stokes. Neste estudo, usando a equação 7.1 pretende-se calcular uma climatologia global das circulações de Langmuir que não tem em conta o desalinhamento entre as direcções do vento e das ondas. Olhando para a equação 7.1 é fácil verificar que o cálculo da

climatologia do número de Langmuir, envolve necessariamente a criação de climatologias auxiliares para a velocidade de fricção atmosférica e da corrente da deriva de Stokes.

7.3. Velocidade de Fricção Atmosférica, u_*

7.3.1 Introdução

Nos modelos atmosféricos e oceânicos a tensão do vento (τ) é geralmente representada por uma fórmula empírica, onde a velocidade de fricção atmosférica (u_*) é relacionada com a velocidade do vento através de um coeficiente, o coeficiente de arrasto (C_D):

$$\tau = \rho_a u_*^2 = C_D U_{10}^2 \tag{7.2}$$

onde ρ_a representa a densidade do ar e U_{10} representa a intensidade do vento aos 10 metros. Assumindo que a teoria da semelhança de Monin-Obukhov (MOST), que assume condições estacionárias, homogéneas e uma superfície sólida (Monin e Obukhov, 1954), é válida e usando a equação 7.2 podemos criar uma climatologia para a velocidade de fricção atmosférica de duas formas distintas:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_a}} ; \ u_* = \sqrt{\frac{C_D}{\rho_a}} U_{10}$$
(7.3)

ambas as expressões podem ser usadas recorrendo aos dados disponíveis na reanálise ERA-40. Nestas duas expressões u_* representa a velocidade de fricção atmosférica, esta relaciona-se com a velocidade de fricção oceânica necessária para criar a climatologia das circulações de Langmuir pela relação:

$$r = \frac{w_*}{u_*} = \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_w}} \sim \frac{1}{28} \tag{7.4}$$

onde ρ_w e ρ_a representam as densidades oceânica e atmosférica, respectivamente. Os valores aqui usados para a densidade do oceano e da atmosfera foram 1030 kg/m³ para o Oceano e 1,225 kg/m³ para o ar.

7.3.2. Climatologia

A reanálise ERA-40 fornece dados a cada 6 horas, para cada componente horizontal da tensão do vento e a intensidade do vento na componente atmosférica do modelo e dados do coeficiente de arrasto na componente de ondas do modelo. Com estes valores foram calculados, para cada ponto de grelha e para cada instante, os valores correspondentes da velocidade de fricção atmosférica usando ambas as formas nas equações 7.3. Depois, utilizando os dados instantâneos foi criada uma climatologia para a velocidade de fricção para o período 1957-2002.

A figura 7.02 mostra os campos médios sazonais climatológicos da velocidade de fricção atmosférica. A variabilidade sazonal de u_* é maior no Hemisférico Norte que no Hemisfério Sul, em particular no Atlântico Norte onde varia entre 2 cm/s durante JJA e os 5 cm/s em DJF. Encontramos nas diversas estações máximos locais nas regiões onde ocorrem jactos costeiros de baixa altitude, por exemplo, o impacto do jacto costeiro da Somália é bem evidente em JJA. Durante o Inverno do Hemisfério Norte existe uma forte intensificação da velocidade de fricção atmosférica nas latitudes altas coincidente com a maior actividade da frente polar. No mesmo período encontramos decaimento da velocidade de fricção sobre a faixa de tempestades do Hemisfério Sul. De modo geral, como seria de esperar, os padrões globais é coincidente com climatologia dos sistemas de circulação, nomeadamente os *storm-tracks*.



Figura 7.02 – Climatologia sazonal para o período 1957-2002 da ERA-40 de $u_* = f(\tau) \text{ em } cm/s$: a) DJF, b) MAM, c) JJA e d) SON.

A dependência zonal de u_* (Figura 7.03a) reforça a ideia que o ciclo sazonal é mais pronunciado nas latitudes altas do Hemisfério Norte, o coeficiente de arrastro também apresenta maior variabilidade neste período (Figura 7.05a), e como é evidente em ambos os casos esta maior variabilidade está ligada a maior variabilidade do vento. A variabilidade no Hemisfério Norte está relacionada com a maior actividade da frente polar, que é mais intensa durante o Inverno estendendo-se até perto dos 30 °N e da sua menor actividade durante o Verão onde geralmente ultrapassasse encontra a norte de 60 °N. A dependência zonal apresenta máximos locais nas regiões dos ventos Alíseos e mínimos nas regiões tropicais.

A variabilidade mensal da velocidade de fricção (Figura 7.03c), a nível global é bastante reduzida, no entanto olhando para os diferentes Oceanos encontramos alguma variabilidade nos oceanos Atlântico e Indico. No Oceano Atlântico existe um pequeno decréscimo da intensidade do vento durante o Verão do Hemisfério Norte, coincidente com o período de menor actividade de tempestades polares. No oceano Indico encontramos um aumento considerável entre Abril e Dezembro, período que coincide com a estação de furacões no Oceano Indico Norte.



Figura 7.03 – a) Médias zonais para o período 1957-2002 da ERA-40 para DJF (linha a preto), MAM (linha a azul), JJA (linha verde), SON (linha cião) e anual (linha vermelha a tracejado) de $u_* = f(\tau)$; b) Média Anual de $u_* = f(\tau)$ em cm/s; c) Variação mensal de $u_* = f(\tau)$ a nível global (linha vermelha a tracejado) e para os diferentes Oceanos do Globo.

A média global anual da velocidade de fricção (Figura 7.03b) apresenta um valor de 2.8 cm/s, variando entre 1.5 cm/s na região do equador e entre 3 cm/s a 5 cm/s nas latitudes altas, e os seus padrões globais estão obviamente ligados aos padrões globais da circulação geral atmosférica. Apesar do nosso interesse na climatologia da velocidade de fricção ser de certa forma limitado, uma vez que é um cálculo intermédio para a criação duma climatologia do

número turbulento de Langmuir, convém salientar que a velocidade de fricção a nível global é importante, porque é o principal forçador de correntes à superfície através da transferência de momento que ocorre entre a atmosfera e oceano e, contribui para a geração de energia cinética turbulenta no oceano que influencia a camada limite oceânica. Os resultados aqui apresentados apresentam padrões similares aos obtidos em Klinger *et al.* (2005), reforçando a nossa confiança nos resultados.



Figura 7.04 – a) Scatter plot de comparação dos resultados de $u_* = f(\tau) \operatorname{com} u_* = f(C_D)$ valores em cm/s (linha a preto representa a recta x = y); e b) diferença global entre os campos da velocidade de friçãoos da



^{0.8 0.9 1} C_{0}^{1} C_{0}^{1} C_{0}^{1} C_{0}^{1} $C_{0}^{1.5 1.6}$ Figura 7.05 – a) Médias zonais para o período 1957-2002 da ERA-40 para DJF (linha a preto), MAM (linha a azul), JJA (linha verde), SON (linha cião) e anual (linha vermelha a tracejado) de C_{D} ; b) Média Anual de C_{D} .

A figura 7.04a mostra a relação entre os campos médios anuais de u_* calculados pelos dois diferentes métodos (equação 7.6). Regra geral, a intensidade da velocidade de fricção calculada recorrendo ao coeficiente de arrastro é inferior em cerca de (6,28 ± 0,15)% e apresenta uma correlação de 95,4% entre os dois métodos. As maiores diferenças (Figura 7.04b) são encontradas nas regiões polares e nas regiões costeiras; excluindo estas regiões as duas formas de cálculo não apresentam grandes diferenças. Junto aos polos as diferenças podem ser

explicadas devido à presença ou não de gelo: havendo gelo o modelo do ECMWF não apresenta nenhum valor para o coeficiente de arrastro, este facto introduz algum viés nos nossos resultados quando usamos a força do vento na criação da climatologia, e aumenta a incerteza nos resultados da climatologia.

A climatologia do coeficiente de arrastro (Figura 7.05b) também apresenta como seria de esperar uma relação muito forte com o vento, apresentando máximos nas regiões com maior disponibilidade de vento e mínimos nos locais com menor disponibilidade. Os cálculos efectuados usando os dados da ERA-40 apontam para um valor médio anual do coeficiente de arrastro de 1,2×10⁻³, valor que não se encontra distante dos 1,25×10⁻³ obtidos em Kara *et al.* (2007), mostrando assim a robustez no calculo efectuado.

7.4. Deriva de Stokes

7.4.1 Introdução

Na ausência de correntes de superfície, o movimento de uma partícula na superfície do oceano está intimamente ligada ao movimento das ondas gravíticas de superfície. A medida que uma onda se propaga debaixo de uma partícula, esta é empurrada para cima e para a frente na horizontal ao longo da superfície até que a crista da onda está directamente debaixo a partícula. A partícula em seguida cai e anda para trás na horizontal à medida que a onda se propaga. Desta forma a partícula percorre uma órbita elíptica com o mesmo período da onda. No entanto esta orbita não é fechada, uma vez que a onda percorre uma distância horizontal maior durante a sua ascensão que durante a sua queda. Como resultado deste fenómeno, a superfície do oceano apresenta uma velocidade média na direcção do campo da onda devido apenas ao movimento das ondas em si. Este fenómeno, que pode ser visto como uma corrente de superfície oceânica induzida pelo movimento das ondas, foi pela primeira vez identificado por Stokes em 1847. A deriva de Stokes é importante porque funciona como uma fonte de energia que gera turbulência adicional na camada limite oceânica (Kantha e Clayson, 2000). A deriva de Stokes decai exponencialmente com a profundidade criando cisalhamento, que extrai energia do campo de ondas e a converte em turbulência. A vorticidade criada pela deriva de Stokes na superfície do Oceano esta na génese da turbulência da Langmuir (Kantha e Clayson, 2000).

Introduzindo um espectro de energia de ondas bidimensional $S(f, \theta)$, a deriva de Stokes pode ser determinada como a sobreposição de todos os modos harmónicos (Saetra *et al.*, 2007):

$$u_{s} = 2 \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{\infty} \omega k S(f,\theta) e^{2kz} \sin(\theta) df d\theta$$
(7.5)

e,

$$v_s = 2 \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \omega k S(f,\theta) e^{2kz} \cos(\theta) df d\theta$$
(7.6)

onde u_s e v_s são as componentes da deriva de Stokes nas direcções norte-sul e este-oeste, respectivamente, e θ representa o ângulo de propagação (onde zero representa uma propagação para norte e o ângulo aumenta no sentido dos ponteiros do relógio). Exprimindo as variáveis em termos de frequências, f, obtemos as seguintes expressões para a deriva de Stokes:

$$u_s = \frac{16\pi}{g} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty f^3 S(f,\theta) e^{\frac{-8\pi^2 z}{g}} \sin(\theta) df d\theta$$
(7.7)

e,

$$v_{s} = \frac{16\pi}{g} \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{\infty} f^{3}S(f,\theta) e^{\frac{-8\pi^{2}z}{g}} \cos(\theta) df d\theta$$
(7.8)

estas duas últimas relações revelam que a deriva de Stokes é proporcional ao cubo da frequência, f^3 . Este resultado mostra que as contribuições das ondas geradas localmente (ondas de alta frequência) são dominantes em relação as ondas não-locais (ondas de baixa frequência) no cálculo da deriva de Stokes.

Os modelos de ondas como o WAM presente na reanálise ERA-40 do ECMWF calculam os espectros de energia em intervalos finitos de frequência (tipicamente de 0.5 *Hz*), para as altas frequências um espectro de diagnóstico é utilizado (Komen *et al.*, 2001). Esta parte do espectro é dada por:

$$S_{hf} = S(f,\theta) \left(\frac{f}{f_{hf}}\right)^{-5}$$
(7.9)

onde f_{hf} representa a frequência mais alta do espectro. A contribuição destas frequências para deriva de Stokes à superfície, z = 0, é então dada por (admitindo um espectro unidimensional):

$$u_{hf} = \frac{16\pi^3}{g} \int_{hf}^{\infty} f^3 S_{hf} df$$
(7.10)

usando (7.09) encontramos uma relação analítica para (7.10):

$$u_{hf} = \frac{16\pi^3}{g} S(f_{hf}) f_{hf}^4 \tag{7.11}$$

7.4.2. Climatologia

Recorrendo aos espectros obtidos pelo modelo WAM na reanálise ERA-40, e usando as equações (7.07), (7.08), sem esquecer a contribuição da cauda do espectro dada pela equação (7.11), calculamos a deriva de Stokes para todos os instantes e pontos de grelha. Por fim usando os resultados a cada 6 horas foi criada uma climatologia para a deriva de Stokes para o período 1957-2002. Convém referir que o autor não foi responsável pelo cálculo deste parâmetro, e que os dados aqui utilizados foram processados pelo Instituto Meteorológico Norueguês, e gentilmente cedidos pelo mesmo para a execução deste trabalho.



Figura 7.06 – Climatologia sazonal para o período 1957-2002 da ERA-40 de us em cm/s: a) DJF, b) MAM, c) JJA e d) SON.

A figura 7.06 mostra os campos médios sazonais climatológicos da deriva de stokes no Oceano. Tal como acontece com a velocidade de fricção atmosférica, os campos médios sazonais, encontramos maior de u_s no Hemisfério Norte que no Hemisfério Sul, nomeadamente acima dos 30°N. No Hemisfério Norte varia entre 1,2 cm/s durante JJA e 0,4 cm/s em DJF. Novamente em JJA a presença do jacto costeiro da Somália é evidente. De modo geral, sendo a deriva de Stokes

indirectamente dependente do vento à superfície, os padrões globais apresentam uma forte correlação com o escoamento atmosférico à superfície.

A variação zonal de u_s apresentada na figura 7.07a mostra que o ciclo sazonal é mais pronunciado nas latitudes altas do Hemisfério Norte, esta variabilidade está associada a maior variabilidade sazonal do vento. Novamente esta maior variabilidade está ligada a maior actividade atmosférica nas latitudes altas do Hemisfério de Norte durante o Inverno. Os resultados mostram mínimos locais nas regiões tropicais e máximos locais nas regiões dos ventos Alíseos. A variabilidade mensal (Figura 7.07c) mostra que, em termos globais, a deriva de Stokes não apresenta uma grande variabilidade mensal, no entanto, novamente existe um aumento significativo da deriva de Stokes no Oceano Indico entre Abril e Dezembro que coincide com um decréscimo pequeno deste parâmetro no Atlântico Norte.



Figura 7.07 – a) Médias zonais para o período 1957-2002 da ERA-40 para DJF (linha a preto), MAM (linha a azul), JJA (linha verde), SON (linha cião) e anual (linha vermelha a tracejado) de u_5 ; b) Média Anual de u_5 em cm/s; c) Variação mensal de u_5 a nível global (linha vermelha a tracejado) e para os diferentes Oceanos do Globo;

A média global (Figura 7.07b) calculada para a deriva de Stokes apresenta um valor de 0,61 cm/s, variando entre máximos de 0,8 cm/s e 1,1 cm/s nas latitudes elevadas do Hemisfério Norte e Hemisfério Sul, respectivamente, e mínimos de aproximadamente 0,2 cm/s na região do equador. Apesar desta climatologia ser um meio necessário para determinar o número turbulento

de Langmuir, convém salientar que a deriva de Stokes afecta o transporte de massa e momento junto a superfície oceânica, e desempenha um papel importante na mistura vertical através da produção de energia cinética turbulenta.

Calculando uma regressão entre a deriva de Stokes e a velocidade de fricção obtida usando o coeficiente de arrastro apresenta um valor de 3,9957 \pm 0,0080, este valor é ligeiramente superior se usarmos os valores da velocidade de fricção obtidas usando a força do vento (4,2284 \pm 0,0118). Em ambos os casos encontramos uma correlação superior a 98% entre os dois campos.

7.5 Número Turbulento de Langmuir

7.5.1. Introdução

Usando os dados calculados na primeira parte deste capítulo foram calculados para cada ponto de grelha e instante o número turbulento de Langmuir, usando a equação 7.12. Seguindo a metodologia de Belcher *et al.* (2012), projectamos o vector da deriva de Stokes na direcção do vento e só consideramos situações em que o vento à superfície é superior aos 3 m/s. Com base nos resultados instantâneos criamos uma climatologia para o número turbulento de Langmuir.

7.5.2. Climatologia

Na figura 7.08a apresentamos a variabilidade zonal do número turbulento de Langmuir e a correspondente média anual na figura 7.08b. A variabilidade zonal de La_{tur} é relativamente baixa nas latitudes altas em ambos os hemisférios, também é nestas regiões que o número turbulento de Langmuir apresenta o seu menor valor, indicando desde já que é nestas regiões que a mistura devido às células de Langmuir é mais relevante. A maior variabilidade e os valores mais elevados são encontrados nas latitudes médias, facto que pode estar associado ao facto do vento variar rapidamente nesta região e o campo de ondas não conseguir atingir um estado de desenvolvimento maduro (Hanley *et al.*, 2010). A média anual do número turbulento de Langmuir usando projecção da deriva de Stokes na direcção do vento é de aproximadamente 0,67 quando usamos a força do vento no cálculo da velocidade de fricção, sendo este valor relativamente mais baixo (aproximadamente 0,64) quando calculamos a velocidade de fricção com recurso ao coeficiente de arrastro. Não usando projecção, como era espera os valores, apresentam médias anuais de 0,52 e 0,50 dependendo do modo como a velocidade de fricção é calculada.

Na figura 7.08a apresentamos a variabilidade zonal do número turbulento de Langmuir e a correspondente média anual na figura 7.08b. A variabilidade zonal de La_{tur} é relativamente baixa nas latitudes altas em ambos os hemisférios, também é nestas regiões que o número turbulento de Langmuir apresenta o seu menor valor, indicando desde já que é nestas regiões que a mistura devido às células de Langmuir é mais relevante. A maior variabilidade e os valores mais elevados são encontrados nas latitudes médias, facto que pode estar associado ao facto do vento variar rapidamente nesta região e o campo de ondas não conseguir atingir um estado de desenvolvimento maduro (Hanley *et al.*, 2010). A média anual do número turbulento de Langmuir usando projecção da deriva de Stokes na direcção do vento é de aproximadamente 0,67 quando usamos a força do vento no cálculo da velocidade de fricção, sendo este valor relativamente mais baixo (aproximadamente 0,64) quando calculamos a velocidade de fricção com recurso ao coeficiente de arrastro. Não usando projecção, como era espera os valores, apresentam médias anuais de 0,52 e 0,50 dependendo do modo como a velocidade de fricção é calculada.



Figura 7.08 – a) Médias zonais para o período 1957-2002 da ERA-40 para para DJF (linha a preto), MAM (linha a azul), JJA (linha verde), SON (linha cião) e anual (linha vermelha a tracejado) com projecção de u_s em $u_* = f(\tau)$; b) Climatologia anual do número turbulento de Langmuir para o período 1957-2002 com projecção de u_s em $u_* = f(\tau)$



Figura 7.09 – Histogramas de La_{tur} para o período 1957-2002 da ERA-40, à esquerda calculando $u_* = f(\tau)$ e à direita calculando $u_* = f(C_D)$, em ambos os casos mostramos os resultados usando a projecção da deriva de Stokes no vento (linha vermelha) e o resultado sem usar a projecção (linha preto).

A distribuição calculada usando dados da ERA-40 é apresentada na figura 7.09, as diferenças entre os diferentes tipos de cálculos é praticamente inexistente, e em todos os casos o pico da distribuição ocorre aproximadamente aos 0,35. Este valor é aproximado ao que obteríamos se a deriva de Stokes fosse calculada usando o espectro de ondas de Pierson e Moskowitz (1964), onde $u_s \approx 10u_* \Rightarrow La_{turb} \approx 0,32$, neste caso o campo das ondas deveria

estar em equilíbrio com o campo de vento à superfície. O valor mais elevado aqui encontrado indica que os dois campos não estão em equilíbrio, algo que já foi demostrado por Sullivan *et al.* (2008) e Hanley *et al.* (2010). Análises de escala mostram que para valores $La_{turb} < 0,35$ as células de Langmuir são um mecanismo importante na geração de turbulência e sendo assim têm um papel importante na camada de mistura oceânica.



Figura 7.10 – a) Médias zonais da probabilidade de ocorrência de $La_{tur} < 0.35$ para o período 1957-2002 da ERA-40 para para DJF (linha a preto), MAM (linha a azul), JJA (linha verde), SON (linha cião) e anual (linha vermelha a tracejado) com projecção de u_s em $u_* = f(\tau)$; b) Probabilidade de ocorrência de $La_{tur} < 0.35$ para o período 1957-2002 com projecção de u_s em $u_* = f(\tau)$; b) Probabilidade de ocorrência de $La_{tur} < 0.35$ para o período 1957-2002 com projecção de u_s em $u_* = f(\tau)$

Na figura 7.10a apresentamos a probabilidade zonal de ocorrência de valores inferiores a 0,35 do número turbulento de Langmuir e o mapa global de probabilidades de ocorrência na figura 7.10b. Em primeiro lugar nota-se que a variabilidade sazonal de ocorrência de células de Langmuir é reduzida nas latitudes altas em ambos os hemisférios, apresentando uma pequena variabilidade nas latitudes médias. As maiores probabilidades de ocorrência são encontradas na cintura de tempestades do Hemisfério Sul, sendo a probabilidade de ocorrência nas latitudes altas do hemisfério Norte também elevada. Este é um facto relevante porque, como já foi mencionado, é nestas regiões que os modelos climáticos apresentam maiores erros na profundidade da camada de mistura. Outro facto que ressalta destes resultados é que as probabilidades de ocorrência das células de Langmuir é de certa forma inversamente proporcional à probabilidade de ocorrência de swell oceânico. Apesar das probabilidades aqui calculadas apresentarem valores bem mais baixos que os que encontramos em Belcher et al. (2012) onde se apresenta um campo de probabilidades usando dados da ERA-Interim. Este facto não é surpreendente, uma vez que os próprios autores referem que é expectável que o desenvolvimento de ondas de vento na ERA-Interim seja mais rápido e devido aos ventos mais fortes. Estes dois factores contribuem para um aumento da deriva de Stokes que ira baixar o número turbulento de Langmuir por nós calculado e aumentar as probabilidades aqui mostradas. Infelizmente as diferenças entre estes resultados também mostra a grande incerteza existente no cálculo do número turbulento de Langmuir,

sendo este número bastante sensível à escolha do modo de cálculo tanto da deriva de Stokes como da velocidade de fricção, bem como da escolha do conjunto de dados para cálculo dos respectivos parâmetros.

Olhando para as altas probabilidades de ocorrência nas altas latitudes, e sabendo que as células de Langmuir contribuem para um aumento da turbulência oceânica na camada de mistura, não é desajustado pensar que a inclusão deste tipo de células possa ajudar a mitigar os problemas conhecidos nos modelos globais na correcta determinação da profundidade da camada de mistura oceânica e na redução do erro encontrado na temperatura da superfície do mar em particular nas regiões polares do Hemisfério Sul, como o que encontramos na figura 4.01. Recentemente Webb *et al.* (2010) deu os primeiros para a inclusão dos efeitos das células de Langmuir num modelo climático. Os testes iniciais mostraram que a inclusão deste fenómeno aumenta substancialmente a profundidade da camada de mistura a nível global e melhora substancialmente o viés existente no Hemisfério Sul. A inclusão das células de Langmuir nos modelos globais parece ser necessário na correcção de anomalias bem conhecidas destes modelos. Portanto os modelos climáticos actuais, deveriam representar as circulações de Langmuir nas suas parametrizações, o que implicaria que os modelos deveriam incorporar um modelo de ondas na sua estrutura de forma a ser possível estimar a deriva de Stokes.