

ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E O AUMENTO DE EVENTOS EXTREMOS NOS AÇORES

por

FERNANDA CARVALHO, MARIA MEIRELLES,
DIAMANTINO HENRIQUES & PATRICIA NAVARRO

Sumário: A nossa atmosfera já não é a mesma: desde setembro de 2016 que a concentração de fundo do CO₂ na atmosfera dos Açores tem sido sempre superior a 400 ppm(v). Os resultados das recentes previsões de vários modelos climáticos, indicando o aumento da temperatura do ar e a diminuição da quantidade de precipitação, são também claros em relação ao aumento de eventos extremos na região dos Açores. Por exemplo e, no cenário mais pessimista do forçamento radiativo, estima-se até ao final de 2100 o aumento dos períodos de seca em 4,8 dias/ano, dos eventos de precipitação forte em 1,4 dias/ano e do número de noites tropicais em cerca de 101 noites/ano. Este resultado pode ser explicado pela intensificação do anticiclone subtropical do Atlântico Norte na região dos Açores, especialmente a oeste das Ilhas Britânicas. Neste trabalho apresentam-se as tendências da temperatura do ar e da precipitação com base nas reanálises do projeto ERA5, bem como as projeções e variações para o final do século; foram ainda analisadas as projeções para alguns extremos climatológicos e estimadas as variações para o final do século com referência ao período mais recente.

Summary: Our atmosphere is no longer the same: since September 2016, the background concentration of CO₂ in the Azores atmosphere has always been above 400 ppm(v). The results of recent forecasts of various climate models, indicating an increase in air temperature and a decrease in precipitation amount, are also clear in relation to the increase in extreme events in the Azores region. For example, and in the most pessimistic scenario of radiative forcing, it is estimated by the end of 2100 that the number of drought periods will increase by 4.8 days/year, the events of heavy precipitation by 1.4 days/year and tropical nights by 101 days/year. This result may be explained by the intensification of the North Atlantic subtropical anticyclone in the Azores

region, especially west of the British Isles. This work presents the trends of air temperature and precipitation based on the reanalysis of the ERA5 project, as well as the projections and changes for the end of the century; projections for some climatic extremes were also analyzed and variations for the end of the century were estimated with reference to the most recent period.

Palavras-chave: Açores, Alterações Climáticas, Extremos Climáticos, Projeções Climáticas, CMIP.

Key-words: Azores, Climatic Change, Climatic Extremes, Climate Projections, CMIP.

1. INTRODUÇÃO

Hoje sabemos que o Clima da Terra não foi sempre o mesmo e que sofreu mudanças significativas ao longo de centenas de milhares de anos. Essas mudanças tiveram causas naturais, algumas decorrentes de alterações na composição química da atmosfera. De facto, a atmosfera da Terra é um subsistema do Sistema Climático, cujo equilíbrio está sendo alterado pelo aumento da concentração de gases com efeito de estufa de origem fóssil. As alterações climáticas têm carácter global, mas com impactos diferentes à escala regional e local.

Os impactes destas alterações nos Açores não serão tão intensos como os esperados para Portugal continental, mas mesmo assim preocupantes, tendo em conta as fragilidades e vulnerabilidades próprias das regiões insulares. E a região dos Açores tem acompanhado a tendência à escala global e, em concreto, à escala regional, na bacia do Atlântico Norte, de aumento de temperatura: são observadas temperaturas mais altas, menos precipitação e fenómenos meteorológicos mais intensos.

A nossa atmosfera já não é a mesma: desde setembro de 2016 que a concentração de fundo do CO₂ na atmosfera dos Açores tem sido sempre superior a 400 ppm(v)¹. Os resultados das previsões de vários modelos climáticos apontam para um aumento da temperatura média anual na região dos Açores entre 1 K a 3 K até o ano 2100. No caso do cenário mais pessimista, os modelos apresentam para os Açores uma diminuição da precipitação média anual

1 A fração molar (em volume) de CO₂, indica o número de moles de moléculas de CO₂ por mole de moléculas de ar e exprime-se em partes por milhão em volume ou ppm(v).

em cerca de 9,8 mm/dia até o final do século, relativamente à média dos últimos 30 anos.

1.1. SISTEMAS DE LARGA ESCALA QUE INFLUENCIAM O TEMPO E O CLIMA

Os Açores encontram-se localizados na região subtropical do Atlântico Norte e por isso muito influenciados pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Norte, também conhecido por Anticiclone dos Açores. Tratando-se de um sistema de altas pressões quase estacionário, a sua posição, intensidade, desenvolvimento e orientação determinam a natureza e as características das massas de ar que atingem a região, bem como a frequência e trajetória das ondulações e depressões da Frente Polar do Atlântico Norte a qual é, também, um sistema modelador importante do Tempo nos Açores. Assim, de acordo com as *Reanálises do NCEP/NCAR* para 1961-1990, o valor máximo da pressão atmosférica média ocorre em julho, pois o Anticiclone dos Açores, centrado na proximidade do arquipélago é mais intenso nesta altura do ano; por outro lado, sendo o Anticiclone dos Açores menos intenso e as depressões mais frequentes e cavadas no início da primavera, o valor mínimo da pressão atmosférica média à superfície ocorre em março. Outro aspeto que caracteriza o tempo dos Açores é a proximidade da Corrente do Golfo que consiste numa corrente marítima de água quente que torna ameno o Clima nestas latitudes. De facto, a temperatura da água do mar tem uma importância muito grande no Clima dos Açores o qual, de acordo com a *Classificação Climática de Köppen-Geiger*, se considera predominantemente, temperado húmido, sem estação seca, com precipitação em todos os meses do ano e com verão temperado.

1.2. VARIABILIDADE E ALTERAÇÃO DO CLIMA

No sentido restrito, *Clima* é habitualmente referido como o *Tempo Meteorológico Médio* ou mais precisamente, a descrição estatística de um conjunto de estados instantâneos da atmosfera, caracterizada por valores médios e de variância de quantidades relevantes (temperatura, precipitação, vento, etc.), abrangendo períodos desde alguns meses até milhares de milhões de anos. Em sentido lato, Clima é o estado, incluindo a sua descrição estatística, do Sistema Climático como a reunião dos subsistemas da Atmosfera, Hidrosfera, Criosfera, Litosfera e Biosfera (Peixoto & Oort, 1992). O clima é primeiramente modelado por fatores externos - astronómicos, regionais e locais - nos quais se incluem a radiação solar e a esfericidade do globo, a distância ao oceano,

o relevo e a natureza da superfície. No entanto, existem ainda fatores internos associados às propriedades intrínsecas da atmosfera de que são exemplos, a composição da atmosfera, a circulação geral e os sistemas frontais.

Aqui, surge o conceito de Variabilidade Climática que refere as variações do estado médio e outras estatísticas do clima em todas as escalas espaciais e temporais para além dos fenómenos meteorológicos. A variabilidade pode ser devida a processos internos naturais ou forçamentos externos naturais ou antropogénicos.

De acordo com o artigo 1º da *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), uma Alteração Climática (AC) é aquela que é atribuída direta ou indiretamente à atividade humana alterando a composição química da atmosfera global e, que se sobrepõe à variabilidade natural observada em períodos comparáveis. E, assim, a UNFCCC faz uma distinção entre as Alterações Climáticas, atribuídas à atividade humana que alteram a composição da atmosfera global e a Variabilidade do Clima atribuídas a causas naturais (UNFCCC, 1992).

1.2.1. AQUECIMENTO GLOBAL

De acordo com o *Fifth Assessment Report* (IPCC, 2014) do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), a temperatura global da atmosfera continuará a aumentar durante todo o século XXI em consequência da emissão continuada de gases com efeito de estufa, a maioria de origem fóssil. As medições dos níveis de fundo da atmosfera relativamente do dióxido de carbono (CO_2) indicam um aumento constante deste gás pelo menos desde 1969.

Na Figura 1 apresentam-se as séries dos valores da fração molar de CO_2 atmosférico observada em amostras recolhidas no Observatório de Mauna Loa (Hawaii) desde 1969 e na Serreta (Terceira/Açores) desde 1976. Podendo observar-se a consistência das duas séries, será interessante notar que o valor de 400 ppm(v) foi ultrapassado no Hawaii e nos Açores respetivamente a 14 e 17 de setembro de 2016. Para se entender a implicação imediata deste facto, teremos de conhecer como se processa a transferência de energia na atmosfera, isto é, considerar o Balanço Radiativo da Terra. E este diz-nos que 25 a 30% da energia solar absorvida pela atmosfera contribui para o aquecimento das camadas mais altas da atmosfera (estratosfera) enquanto que, 70 a 85% da radiação terrestre é absorvida pela atmosfera, contribuindo para o aquecimento das camadas mais baixas da atmosfera (troposfera). Quando comparada

com a radiação de longo comprimento de onda (infravermelho), a radiação de curto comprimento de onda é pouco relevante para o aquecimento da troposfera. Nestas condições, a temperatura do ar junto da superfície é sobretudo resultado da emissão de radiação infravermelha da superfície e dos gases com efeito de estufa.

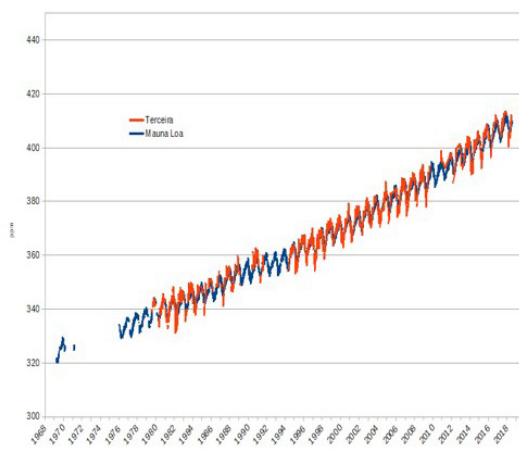


FIGURA 1: Séries temporais da fração molar de dióxido de Carbono observados na ilha Terceira (Açores) e em Mauna Loa (Hawaii).

Na Figura 2 apresenta-se a série dos desvios (anomalias) dos valores observados da temperatura do ar à superfície relativamente ao período de referência de 1961-1990 para a região dos Açores, sendo possível reconhecer de imediato que desde os anos 70 do século passado a temperatura do ar à superfície está acima da referência (Meirelles et al., 2019). Nos últimos 30 anos, a temperatura do ar à superfície na região dos Açores é cerca de $0,7 \pm 0,3^{\circ}\text{K}$ maior do que à 50 anos atrás e, de acordo com as projeções climáticas disponíveis, este desvio será ainda maior nas próximas décadas deste século.

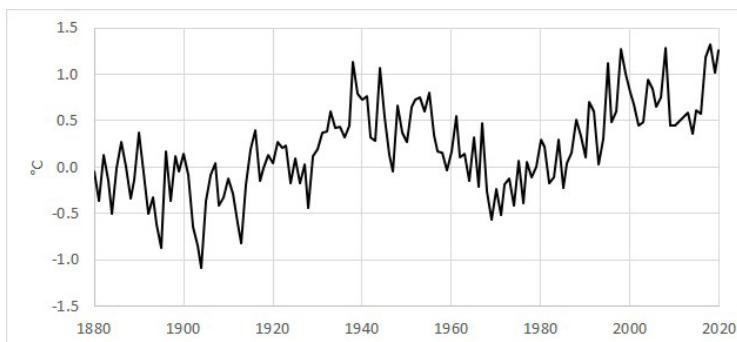


FIGURA 2: Anomalias anuais da temperatura média do ar à superfície para a região dos Açores.

Aumentando a concentração de CO_2 e outros gases capazes de absorver a radiação de longo comprimento de onda emitida pela superfície, isto é, com contribuição positiva no efeito de estufa atmosférico, perturba-se o balanço inicial. Tal perturbação repercute-se nos processos de autorregulação interna e instabilidade com consequências variadas, como por exemplo, no ciclo hidrológico. Assim, poderemos pensar no aquecimento global como a principal evidência da alteração climática resultante do aumento do CO_2 na atmosfera.

E o aumento da temperatura do ar tem por sua vez impactos diretos na Hidrosfera (aumento do nível médio do mar, acidificação dos oceanos, etc.), na Criosfera (degelo de calotes polares, glaciares, diminuição do albedo, etc.), na Litosfera (diminuição do permafrost, libertação de CH_4 , aumento de superfície sem gelo, etc.) e na Biosfera (extinção de espécies, etc.).

1.3. MODELOS, CENÁRIOS E PROJEÇÕES

Os *Modelos de Circulação Geral da Atmosfera* (MCGA) e do *Oceano* (MCGO) baseiam-se nas leis físicas que descrevem a dinâmica da atmosfera e do oceano expressas sob a forma de equações matemáticas. Uma vez que estas equações são não lineares, apenas podem ser resolvidas numericamente utilizando métodos matemáticos clássicos e computadores potentes.

Atualmente, os modelos de circulação geral acoplados CMPI5 (*Coupled Model Intercomparison Phase 5*) constituem uma representação completa do sistema climático verificando-se, uma evolução para modelos cada vez mais complexos que incluem a química e a biologia.

Os modelos climáticos sendo usados com objetivos operacionais nas previsões mensais, sazonais, etc., são também aplicados como ferramentas de investigação para simular o clima. Mas os modelos climáticos necessitam de cenários que condicionam a resposta dos mesmos.

1.3.1. TRAJETÓRIAS REPRESENTATIVAS DE CONCENTRAÇÕES

Relativamente às projeções até o final do século XXI, foram utilizados para mesma região geográfica - região dos Açores entre 37°N-40°N e 32°W-25°W - os resultados do projeto CMIP5 para os cenários RCPs (*Representative Concentration Pathways*); as trajetórias descrevem quatro possíveis cenários climáticos futuros, os quais dependem da quantidade de gases com efeito de estufa que poderão ser emitidos nos próximos anos.

Os quatro cenários RCP (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5), correspondem a quatro intervalos de forçamento radiativo para o ano 2100, relati-

vamente aos valores pré-industriais (+2.6, +4.5, +6.0 e +8.5 W/m², respetivamente). A maior parte dos dados climáticos e projeções do CMIP5 utilizados neste trabalho encontram-se disponíveis gratuitamente no portal *Climate Explorer* (<https://climexp.knmi.nl/>) do KNMI (*Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut*).

1.3.2. REANÁLISES

No presente trabalho usaram-se - para o período de observação 1979-2019 e para a região dos Açores - as reanálises *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) do projeto ERA5 (ECMWF Re-Analysis).

O modelo ERA5 (ERA5, 2019), através da assimilação de dados 4D-Var do *Sistema de Previsão Integrada* (IFS) do ECMWF com 137 níveis de pressão na vertical, disponibiliza dados atmosféricos nesses níveis. Estão ainda disponíveis dados de superfície, contendo parâmetros 2D, como precipitação, temperatura a 2 m, radiação no topo da atmosfera e outras quantidades integradas na vertical em toda a atmosfera. O IFS é acoplado a um modelo de solo (parâmetros de superfície) e a um modelo de ondas oceânico. O conjunto de dados ERA5 contém uma resolução de 31 km.

2. RESULTADOS

Os resultados apresentados referem-se à região dos Açores entre 37°N-40°N e 32°W-25°W. Para esta região, foram calculados os desvios da temperatura do ar à superfície, precipitação média anual e, também, dos extremos climatológicos referentes ao número máximo de dias consecutivos com precipitação <1 mm, ≥ 20 mm e número de noites tropicais das séries das reanálises ERA5 no período 1979-2019 com referência a 1961-1990 (Carvalho, 2020). Foram ainda estimadas projeções até 2100 e de acordo com os cenários RCP 2.6, 4.5 e 8.5 para os parâmetros referidos. Finalmente, foram estimadas as variações para o final do século (2071-2100) com referência à situação mais recente de 1991-2020 (Carvalho, 2020).

2.1. TEMPERATURA DO AR À SUPERFÍCIE

A anomalia da temperatura média anual do ar à superfície na região dos Açores e no período 1979-2019 apresenta uma tendência positiva de 0,16 K/década (Figura 3); por outro lado, as médias das previsões de vários modelos

apontam para um aumento da temperatura média anual nesta região entre 1 e 4 K até o ano 2100, com referência ao período de 1961 a 1990 (Figura 3).

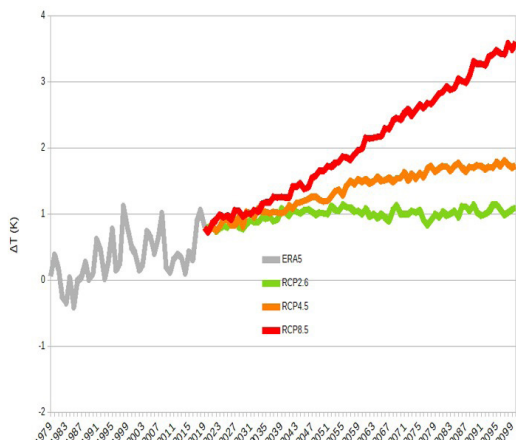


FIGURA 3: Evolução da anomalia da temperatura média anual do ar à superfície observada e prevista para a região dos Açores, de acordo com vários cenários RCP.

No gráfico da Figura 4 é possível visualizar a variação prevista da temperatura média do ar à superfície para o período 2071-2100 relativamente ao período de 1991-2020 e de acordo com o cenário RCP 4.5 o qual estima um aumento médio de 1,2 K para a região dos Açores. Por comparação, poderão observar-se os elevados valores sobre a Península Ibérica e o norte de África; poderá ainda notar-se, em ambas as regiões continentais, que este aumento se acentua com o afastamento ao mar.

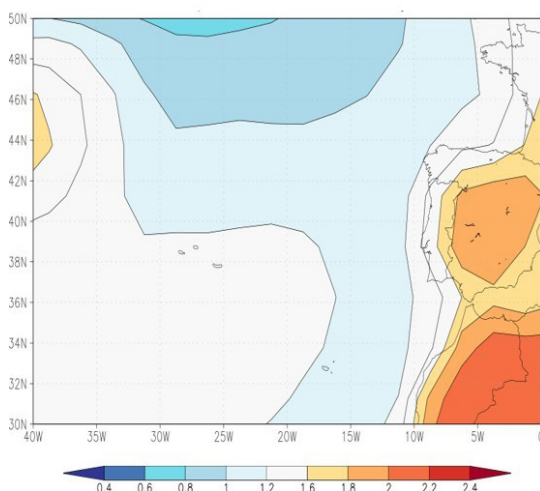


FIGURA 4: Variação prevista da temperatura média do ar à superfície (K) para o final do século XXI, de acordo com o cenário RCP4.5.

2.2. PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL

Foi calculada a anomalia da precipitação média anual para os Açores no período 1979-2019 e estimadas as suas projeções até 2100, de acordo com os cenários RCP (Figura 5). Neste caso, embora as reanálises não apresentem uma tendência estatisticamente significativa, a variação média calculada para os três cenários para a precipitação anual é de -7,8 mm; no caso do cenário mais pessimista (RCP 8,5), os modelos apresentam para os Açores uma diminuição da precipitação média anual em cerca de 9,8 mm/dia até o final do século, relativamente à média dos últimos 30 anos.

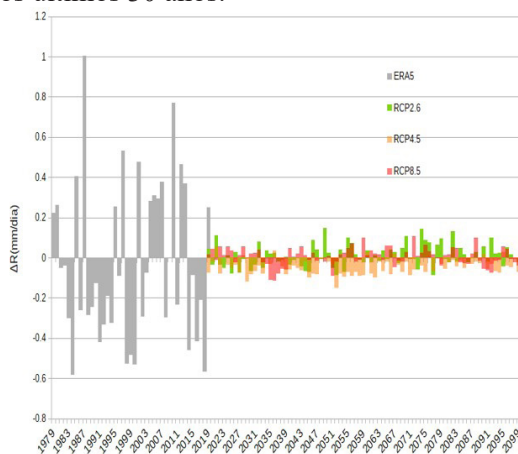


FIGURA 5: Evolução da precipitação da anomalia da média anual observada e prevista para a região dos Açores, de acordo com vários cenários RCP.

A Figura 6 mostra a variação relativa prevista da quantidade de precipitação média anual para o final do século XXI (2071-2100) face ao período de 1991-2020, de acordo com o cenário RCP4.5. Observa-se uma diminuição que se acentua de noroeste para sueste na região considerada, afetando especialmente as ilhas dos grupos central e oriental; no entanto, a sua expressão é especialmente gravosa no sul da Península Ibérica, Madeira, Canárias e norte de África.

Os efeitos do aquecimento global na evolução e distribuição da precipitação não são evidentes. Uma atmosfera mais quente é capaz de reter mais vapor de água de acordo com a lei de Clausius-Clapeyron. Sendo esperado um aumento da evaporação e, consequentemente, da quantidade de vapor de água na atmosfera, não está claro que se traduza num aumento de precipitação. Os processos de evaporação e precipitação são muito complexos e os modelos mais avançados recorrem ainda a parametrizações ou representações grosseiras para resolver estes mecanismos na atmosfera.

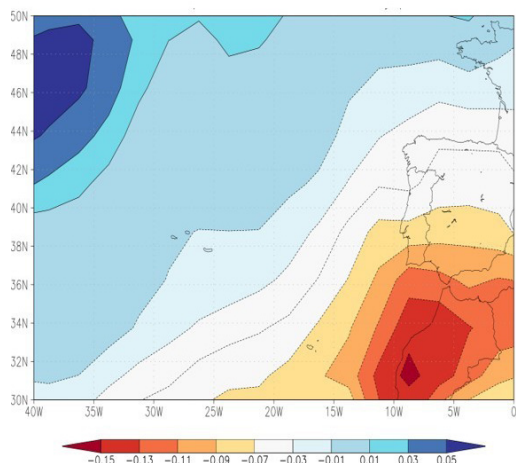


FIGURA 6: Variação relativa prevista da precipitação média anual para o final do século XXI, de acordo com o cenário RCP4.5.

2.3. NÚMERO DE DIAS COM PRECIPITAÇÃO < 1 MM

Na Figura 7 apresentam-se os desvios do número máximo anual de dias consecutivos com precipitação diária < 1mm no período de observação 1979-2019 e as projeções estimadas até 2100 de acordo com os cenários RCP. No gráfico verifica-se que ambos os cenários RCP 4.5 e 8.5 indicam desvios positivos; no RCP 2.6 a situação não é clara, indicando-se um aumento dos períodos de seca até cerca de 2040 e uma diminuição para o final deste século. Dos cálculos resulta para a média dos modelos um aumento do número máximo de dias consecutivos com baixa precipitação (< 1mm) de + 0,2 a 4,8 dias/ano até ao ano 2100.

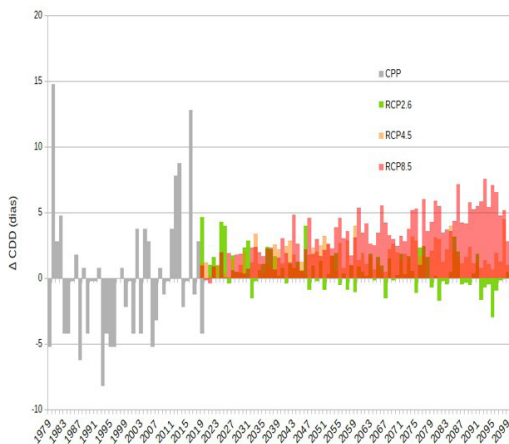
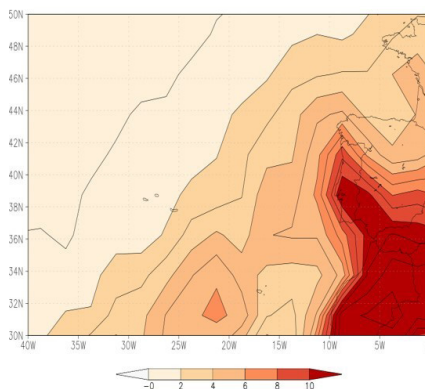


FIGURA 7: Evolução da anomalia do número máximo anual de dias consecutivos com precipitação < 1mm observada e prevista para a região dos Açores, de acordo com vários cenários RCP.

A Figura 8 mostra a variação relativa prevista do número anual de dias consecutivos com precipitação diária < 1 mm para o final do século XXI (2071-2100) relativamente ao período de 1991-2020 e de acordo com o cenário RCP 4.5, em que se estima um aumento médio de 1,7 dias/ano. Mais uma vez, a previsão do aumento de períodos de seca a afetar mais os grupos central e oriental.

FIGURA 8: Variação do número máximo anual de dias com precipitação diária < 1 mm no final do século XXI, de acordo com o cenário RCP4.5.



2.4. NÚMERO DE DIAS COM PRECIPITAÇÃO ≥ 20 MM

Na Figura 9 apresentam-se os desvios do número máximo anual de dias consecutivos com precipitação diária ≥ 20 mm no período de observação 1979-2019 e estimadas as suas projeções até 2100 e de acordo com os cenários RCP. Neste caso, as projeções indicam para o número máximo de dias consecutivos com precipitação forte (≥ 20 mm) um aumento de +0,6 a 1,4 dias/por ano até ao ano 2100. Pode ainda observar-se que os modelos apresentam em geral desvios positivos ao longo de todo o período.

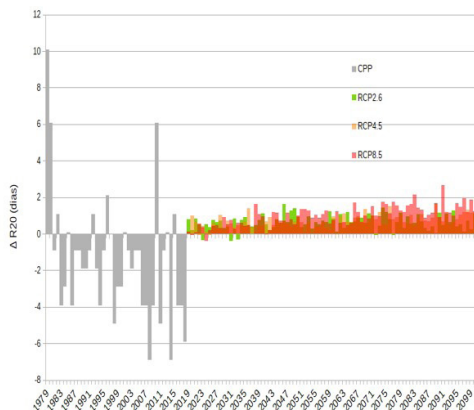


FIGURA 9: Evolução da anomalia do número máximo anual de dias consecutivos com precipitação ≥ 20 mm observada e prevista de acordo com vários cenários RCP.

A Figura 10 mostra a variação relativa prevista do número anual de dias consecutivos com precipitação diária ≥ 20 mm para o final do século XXI (2071-2100) relativamente ao período de 1991-2020 e de acordo com o cenário RCP 4.5, estimando-se um aumento médio entre 0,1 e 0,15 dias/ano.

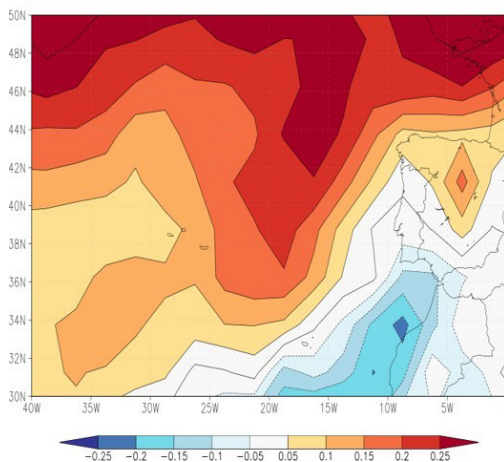


FIGURA 10: Variação do número anual de dias com precipitação ≥ 20 no final do século XXI, de acordo com o cenário RCP4.5.

2.5. NÚMERO ANUAL DE NOITES TROPICAIS

Na Figura 11 apresentam-se os desvios do número de noites tropicais ($T_{\text{mínima}} > 20^{\circ}\text{C}$) no período de observação 1979-2019 e estimadas as suas projeções até 2100 de acordo com os cenários RCP que indicam um aumento de +38 a 101 dias/ano até o ano 2100.

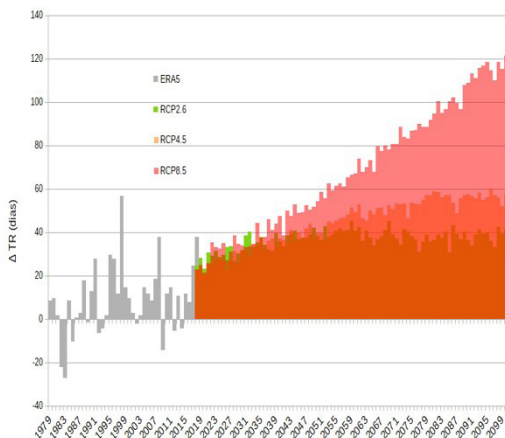
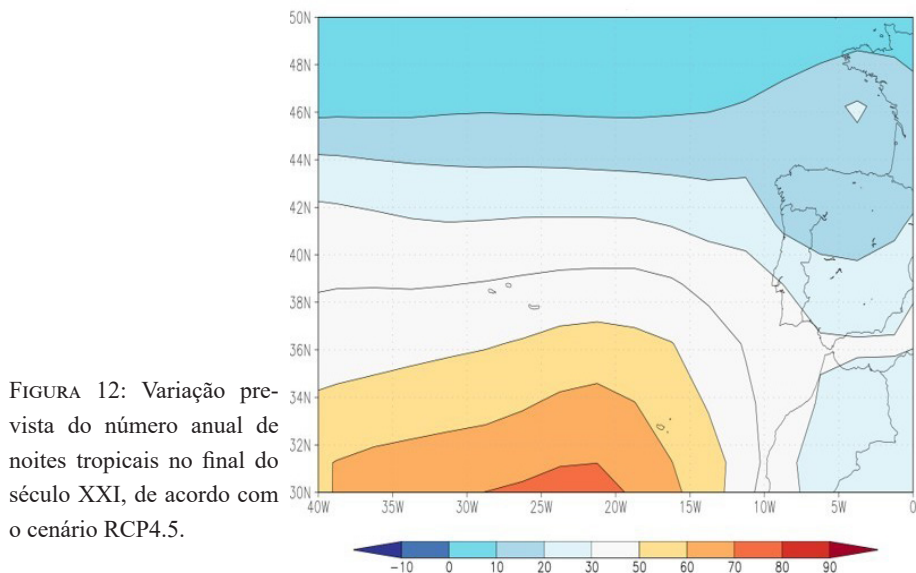


FIGURA 11: Evolução da anomalia do número de noites tropicais observada e prevista para a região dos Açores, de acordo com vários cenários RCP.

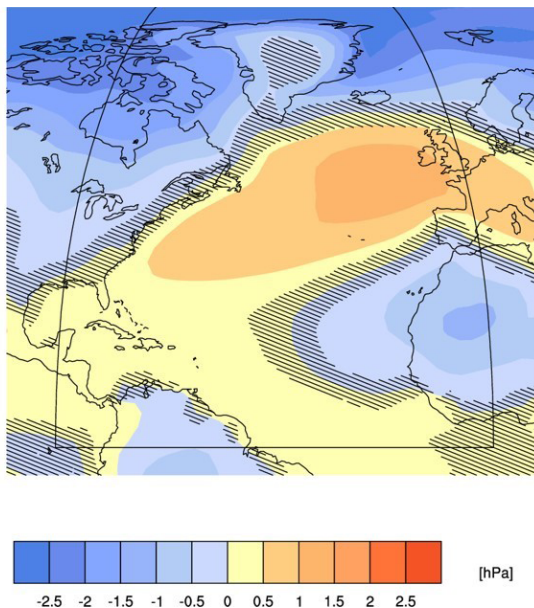
A Figura 12 mostra a variação prevista do número anual de noites tropicais para o final do século XXI (2071-2100) relativamente ao período de 1991-2020, de acordo com o cenário RCP 4.5 a partir do qual se estima um aumento médio de 45,3 noites/ano.



3. INTENSIFICAÇÃO DO ANTICICLONE DOS AÇORES

A intensificação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Norte (Figura 13) na região dos Açores (~1 hPa) e, especialmente a oeste das Ilhas Britânicas (~1.5 hPa), corresponde a uma reconfiguração de sistemas de escala sinótica que é consistente com os aspetos mais significativos decorrentes da atual AC. A diminuição da velocidade do vento nesta região do Atlântico, bem como o aumento da radiação solar à superfície decorrentes da expansão do anticiclone subtropical para latitudes mais setentrionais, afastando para norte a Corrente de Jato e consequentemente a Frente Polar, poderá constituir um sinal claro de larga escala relativamente à alteração do padrão de nebulosidade nesta região, sendo também consistente com a diminuição de precipitação projetada para o final do século no cenário RCP 8.5.

FIGURA 13: Variação da pressão atmosférica ao nível médio do mar projetada para 2071-2100, de acordo com o cenário RCP8.5.



4. BIBLIOGRAFIA

- IPCC, Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp, 2014.
- CARVALHO, F.. Alterações Climáticas e o aumento de eventos extremos nos Açores. Universidade dos Açores. Janeiro de 2020.
- ERA5 REANALYSIS, ECWMF, 2019 (<https://www.ecmwf.int/search/site/>).
- MEIRELLES, Maria and CARVALHO, Fernanda. Perspectives of Atmospheric Sciences in the Azores: History of Meteorology and Climatic Change. Archipelagos. Earth Sciences in 21st Century. NOVA, Science Publishers, 2019.
- PEIXOTO, José Pinto; OORT, Abraham H. - Physics of Climate. [S.l.]: Springer, 1992. ISBN 978-0-88318-712-8
- UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. 92 (WWW:URL:https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf).