

Universidade de Lisboa
Faculdade de Ciências
Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia



Climatologia de Ciclones Extratropicais num Clima em
Mudança: cenário RCP8.5

Daniela Catarina André Lima

Dissertação
Mestrado em Ciências Geofísicas
(Meteorologia)

2013

Universidade de Lisboa
Faculdade de Ciências
Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia



Climatologia de Ciclones Extratropicais num Clima em
Mudança: cenário RCP8.5

Daniela Catarina André Lima

Mestrado em Ciências Geofísicas

Meteorologia

Dissertação orientada pelo

Doutor Pedro M. M. Soares e pelo Prof. Doutor Pedro M. A. Miranda

2013

Agradecimentos

O meu especial agradecimento aos meus orientadores, Doutor Pedro Soares e Prof. Doutor Pedro Miranda, pelo apoio que me concederam ao longo do período de trabalho.

Ao Doutor Kevin Hodges (Universidade de Reading), quero agradecer o facto de me ter autorizado a implementar o seu modelo na minha tese, por me ter facultado todo o acesso aos ficheiros necessários e, por me ter ajudado em todas as minhas dúvidas ao longo deste período.

Agradeço ao Diretor do Instituto Dom Luiz, Prof. Doutor Pedro Miranda, por me ter oferecido as melhores condições para poder realizar este trabalho, e à Prof. Doutora Paula Teves Costa, coordenadora do Mestrado em Ciências Geofísicas.

Quero também agradecer à Doutora Rita Cardoso por me ter ajudado na inicialização ao fortran, e ao Ricardo Tomé por me ter auxiliado, sempre que precisava, em assuntos relativos ao tornado.

Por fim quero agradecer aos meus pais e irmão, à Maria João, ao Virgílio e ao Jorge, por me terem aturado em todas as fases da minha tese.

Abstract

In this study a climatological analysis of extratropical cyclones and their tracks in present and future climates (scenario RCP8.5) is computed, in order to evaluate the performance of two climate models, EC-Earth and NCAR CCSM4, on the representation of these cyclones, and assess climate change impact in their properties. Thus, a storm tracking model is used to identify and characterize the extratropical cyclones in the Northern Hemisphere, based on the relative vorticity at 850 *hPa*, which is applied to the climate models and ERA-Interim reanalysis. The two climate models are evaluated against ERA-Interim reanalysis results.

Overall, both models reproduce well the pattern of storm tracks, mean intensities and cyclogenesis density in the Northern Hemisphere when compared with ERA-Interim. The regions of the Northwest Pacific, North America and South of Greenland present the highest track densities. These regions are crossed on average by 16 extratropical cyclones/month, whose mean intensities are between 5.5 and $6.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. The larger mean intensities are found in these regions. The models results in the present climate show a good agreement with reanalysis, supporting its use in a climatological analysis for a future climate scenario.

Under the climate change scenario RCP8.5, both models reveal a decrease in the number of extra tropical cyclones in the Northern Hemisphere for all seasons. Furthermore, the track densities of the stronger storms are reduced in the future climate, with the exception of summer (JJA), when the models indicate a slight increase, of around 8%. In both ocean basins, North Atlantic and Pacific, there is a reduction in track density in regions of higher density in the present. Nevertheless, there are some regions where significant changes in the location or intensity of cyclones occur. In the Mediterranean region, the number of cyclones decreases in that future climate, especially in spring and autumn.

Key-words: Extratropical Cyclones, Storm Tracking, Climate Change.

Resumo

Neste estudo elabora-se uma análise climatológica dos ciclones extratropicais e das suas trajetórias nos climas presente e futuro (cenário RCP8.5), de modo a avaliar a qualidade de dois modelos climáticos globais, EC-Earth e NCAR CCSM4, na representação desses ciclones, e estudar qual o impacto do aquecimento global nas suas propriedades. Deste modo, utiliza-se um modelo de *storm-tracking* para identificação e caracterização dos ciclones extratropicais no Hemisfério Norte, com base no campo da vorticidade aos 850 hPa que se aplica aos dois modelos e à reanálise ERA-Interim. Os modelos em estudo são avaliados comparando os seus resultados com os da reanálise ERA-Interim do ECMWF.

Em geral ambos os modelos reproduzem bem os padrões de densidade de trajetória e de ciclogénese, e das intensidades médias no Hemisfério Norte quando comparados com a ERA-Interim. Nas regiões do Noroeste do Pacífico e da América do Norte e Sul da Gronelândia, a densidade de trajetória é elevada, sendo estas regiões atingidas em média por 16 ciclones extratropicais por mês, cujo padrão das intensidades médias mostra valores entre 5.5 e $6.5 \times 10^{-5} s^{-1}$. Estes resultados estão em boa concordância com a reanálise ERA-Interim, o que permite a avaliação do impacto das alterações climáticas nos ciclones utilizando estes dois modelos.

Em resultado do aquecimento global pode-se constatar uma redução do número de ciclones extratropicais no Hemisfério Norte, em todas as estações do ano, estando ambos os modelos em concordância. Relativamente aos ciclones mais intensos existe uma ligeira diminuição da densidade de trajetória nas latitudes extratropicais do Hemisfério Norte, exceto no Verão (JJA), onde os dois modelos apontam para um ligeiro aumento, de cerca de 8%. Nas bacias oceânicas, Atlântico e Pacífico Norte, existe uma diminuição na densidade de trajetória nas regiões de maior densidade no clima presente. Contudo, existem algumas regiões onde ocorrem alterações significativas quer na localização, quer na intensidade dos ciclones. Por exemplo, na região do Mediterrâneo, o número de ciclones diminui, num clima futuro, com especial destaque para as estações intermédias.

Palavras-chave: Ciclones extratropicais, *Storm Tracking*, Alterações Climáticas.

Lista de Acrónimos

CCSM4	<i>Community Climate System Model Version 4</i>
DJF	Dezembro – Janeiro – Fevereiro
EC-EARTH	<i>Earth System Model</i>
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
HN	Hemisfério Norte
HS	Hemisfério Sul
IFS	<i>Integrated Forecasting System</i>
JJA	Junho – Julho – Agosto
MAM	Março – Abril – Maio
NAO	<i>North Atlantic Oscillation</i>
RCP8.5	<i>Representative Concentration Pathway ~8.5 W/m²</i>
SON	Setembro – Outubro – Novembro
SST	<i>Sea Surface Temperature</i>

Índice

Agradecimentos	i
Abstract	ii
Resumo	iii
Lista de Acrónimos	iv
Índice	v
1 Introdução	1
1.1 Objetivo	1
1.2 Descrição da Tese	1
2 Enquadramento Teórico	2
3 Modelos Globais, Modelo e Metodologia	7
3.1 Modelos Globais.....	7
3.2 Modelo de <i>Storm-Tracking</i>	7
3.3 Metodologia.....	8
4 Resultados e Discussão	11
4.1 Hemisfério Norte	11
4.1.1 Avaliação Global dos Modelos	11
4.1.2 Avaliação Regional dos Modelos.....	19
4.1.3 Impacto do Aquecimento Global.....	26
5 Conclusões	41
6 Referências	44
7 Apêndice A – Artigo “<i>Storm Tracks and Climate Change</i>”	46
7.1 Trajectórias das Tempestades no Clima Presente	46
7.1.1 Hemisfério Norte – Latitudes Extratropicais	46
8 Apêndice B – Hemisfério Sul	48
8.1 Avaliação Global dos Modelos	48

8.2 Impacto do Aquecimento Global	54
9 Apêndice C – Domínios Regionais	59

1 Introdução

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como principal objetivo a elaboração de uma análise climatológica dos ciclones extratropicais e das suas trajetórias em ambos os hemisférios, nos climas presente e futuro, em simulações do cenário RCP8.5. Deste modo, poder-se-á avaliar a qualidade de dois modelos globais na representação desses mesmos ciclones, e o impacto do aquecimento global nas suas propriedades.

1.2 Descrição da Tese

No capítulo 2 apresenta-se uma breve descrição do que são os ciclones extratropicais, os seus efeitos e a importância da sua monitorização e do desenvolvimento de modelos de *storm-tracking*.

A descrição dos modelos globais utilizados (secção 3.1), bem como do modelo de *storm-tracking* implementado neste estudo (secção 3.2) e da metodologia efetuada (secção 3.3) encontram-se descritos no capítulo 3.

A caracterização dos ciclones extratropicais simulados em dois modelos globais para o clima presente e para um cenário de clima futuro realiza-se ao longo do capítulo 4. A caracterização dos ciclones no clima presente é baseada numa avaliação global e regional da qualidade dos modelos globais, secções 4.1 e 4.2, respetivamente. Na secção 4.3 faz-se a caracterização dos ciclones extratropicais num cenário de clima futuro, no cenário de referência RCP8.5. Nesta mesma secção apresenta-se um estudo do impacto do aquecimento global nos ciclones e nas suas propriedades, a nível global e regional.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões finais desta tese e alguns objetivos para trabalho futuro.

2 Enquadramento Teórico

O planeta Terra encontra-se rodeado por uma camada de gás, designada por atmosfera. A atmosfera terrestre estende-se desde a superfície até à fronteira com o espaço interplanetário. É na troposfera que ocorrem os fenómenos meteorológicos, tais como os ciclones tropicais e extratropicais, os furacões, os tornados, entre outros, que influenciam o estado do tempo a nível regional e local.

Os ciclones extratropicais são um elemento chave do estado do tempo e do clima, nas latitudes médias e elevadas, contribuindo fortemente para a variabilidade sinóptica e para a ocorrência de eventos extremos nessas latitudes, componentes da mudança climática que têm vindo a assumir uma importância crescente (Bengtsson et al., 2006; Geng et al., 2003; Greeves et al., 2007; Yin 2005).

De facto, os sistemas de baixa pressão móveis, e as tempestades isoladas que se encontram frequentemente embebidas nesses sistemas determinam uma grande parte da variabilidade meteorológica rápida, na escala sub a multi-diária, em variáveis como a precipitação, o vento, a temperatura, a nebulosidade, e a radiação (Bengtsson et al., 2006; Greeves et al., 2007). Os ciclones extratropicais também têm uma grande influência no transporte de calor e vapor de água na direção dos polos, e no ciclo global do momento angular, interagindo com a circulação geral da atmosfera na produção de padrões de larga-escala de variabilidade climática (Bengtsson et al., 2006; Greeves et al., 2007; Yin 2005).

Nos últimos anos, a investigação na área da climatologia sinóptica, onde se enquadra o estudo dos ciclos de vida dos ciclones extratropicais, tem vindo a ser frequentemente realizada no contexto da sua relação com o processo de aquecimento global. Parece provável que a mudança climática, devida ao aumento da concentração dos gases de efeito de estufa, possa levar a alterações na distribuição dos ciclones extratropicais, em termos dos seus locais de geração, trajetórias, frequência e intensidade (Greeves et al., 2007). O possível aumento da temperatura da superfície do mar nas latitudes médias e altas poderá implicar uma intensificação dos ciclones extratropicais, pelo menos durante o Inverno (Bengtsson et al., 2009). Uma vez que o aquecimento global pode influenciar todos os fenómenos meteorológicos, é importante estudar quais os impactos na atividade ciclónica extratropical. As mudanças nos ciclones devido ao aquecimento global têm uma grande influência na vida diária das populações. Uma alteração na ocorrência de ciclones intensos pode influenciar a escala dos desastres naturais, como resultado de eventos de precipitação e ventos fortes (Mizuta et al., 2011).

Os ciclones extratropicais, ou tempestades ciclónicas de latitudes médias, são ciclones que se formam fora da região tropical nas latitudes médias e altas, tipicamente entre os 30° e os 60° N/S. Estes ciclones desenvolvem-se em regiões de grande baroclinicidade, i.e. grande gradiente horizontal de temperatura, designadas por zonas frontais. As tempestades ciclónicas das latitudes médias podem produzir tempo moderado com pouca precipitação e ventos à superfície entre 15 a 30 *km/h*, mas também podem ser intensas com forte precipitação e ventos que podem exceder os 120 *km/h* (por vezes referidos como *windstorms* na Europa).

De acordo com a Teoria da Frente Polar, o desenvolvimento de um ciclone extratropical inicia-se ao longo da frente polar (a frente polar é uma fronteira global virtual semi-contínua que separa o ar frio polar do ar quente tropical) (Ahrens, 2008). Os ciclones extratropicais formam-se e desenvolvem-se por libertação de instabilidade baroclínica, obtendo a sua fonte principal de energia cinética através da conversão de energia potencial disponível, embora a libertação de calor latente possa ter uma contribuição significativa (a condensação fornece energia aos sistemas em forma de calor latente). A energia potencial disponível é proporcional à variância da temperatura na troposfera, tornando os ciclones extratropicais mais intensos durante o Inverno, dado a variância da temperatura ser maior (Ahrens, 2008; Bengtsson et al., 2009).

A formação de um ciclone extratropical é designada por ciclogénese. Um pouco por todo o globo existem regiões propícias à ciclogénese. Sobre a América do Norte estas regiões incluem as encostas orientais das Montanhas Rochosas. Os ciclones extratropicais nas regiões da América do Norte movem-se, normalmente, na direção Nordeste ao longo da costa Atlântica, acompanhados de ventos fortes, forte precipitação ou fortes nevões nas regiões costeiras. Estes ciclones que se formam ao longo do litoral Este dos Estados Unidos e que se movem para Nordeste são designados *northeasters* (ou *nor'easters*) (Ahrens, 2008). Na região Nordeste dos Estados Unidos, os eventos meteorológicos que causam grande impacto económico e social estão relacionados com estes sistemas que se deslocam junto à costa (Cole et al., 2012).

O clima da Europa é fortemente dominado por tempestades extratropicais. Sobre o Atlântico Norte, as tempestades movem-se com dois padrões de trajetórias distintos, com alguma frequência. Estas oscilações nas trajetórias estão relacionadas com as variações na circulação de larga-escala, tais como a Oscilação do Atlântico Norte (NAO) ou a Oscilação do Ártico (AO) (Bengtsson et al., 2006).

A variabilidade de larga-escala no sector Este do Atlântico Norte é dominada pela NAO. As tempestades extremas sobre a Europa do norte ocorrem com maior frequência durante fases positivas da NAO (Hanley et al., 2012). Na fase positiva da NAO, as tempestades deslocam-se, com alguma frequência, sobre o Nordeste do Atlântico Norte, movendo-se sobre o Mar da Noruega. Como consequência, a região Noroeste da Europa e Este dos Estados Unidos ficam sob a influência de forte precipitação, com Invernos húmidos e de temperatura moderada. No Nordeste do Canadá e na Gronelândia os Invernos são, geralmente, frios e secos. Quando a fase da NAO é negativa, as tempestades deslocam-se mais para sul, trazendo forte precipitação para o sul da Europa e para a região em torno do Mar Mediterrâneo, tornando os Invernos húmidos e moderados.

Nos últimos anos têm sido desenvolvidos alguns estudos sobre o impacto das alterações climáticas nos ciclones extratropicais. Dos resultados destes estudos, a redução no número de ciclones está relacionada com uma redução na baroclinicidade devido a uma diminuição do gradiente da temperatura polo – equador (e.g. Bengtsson et al., 2006; Geng et al., 2003; Mizuta et al., 2011), enquanto o aumento na intensidade pode ser resultado do aumento da libertação de calor latente associado a um aumento de vapor de água na atmosfera num clima futuro (e.g. Geng et al., 2003).

Geng et al. (2003) efetuaram um estudo de modo a investigar os possíveis impactos do aumento dos gases de efeito de estufa e dos aerossóis sulfatos nos ciclones extratropicais.

Este estudo mostrou que as regiões de diminuição ou aumento da densidade de ciclones tendem a estar localizadas a jusante das regiões de diminuição e aumento da baroclinicidade. A análise realizada ao cisalhamento vertical do vento mostrou que as alterações a este parâmetro estão em concordância com as alterações da baroclinicidade no Hemisfério Norte (HN), indicando um comportamento quase-geostrófico à escala global.

Yin (2005) mostrou que a energia cinética média zonal dos vórtices na escala sinóptica aumenta nas simulações climáticas futuras, e que este pico se desloca na direção dos pólos e em altitude. Esta alteração é consistente com as alterações na temperatura na média/alta troposfera em torno dos 500–200 *hPa*. Na região tropical, a estas altitudes, existirá também um grande aquecimento devido ao aumento vertical do fluxo de vapor de água e da libertação de calor latente, enquanto nas latitudes elevadas o aquecimento é mais reduzido. Esta diferença ocorre porque a altura a que se encontra a tropopausa é menor nos pólos em relação aos trópicos. Nas latitudes elevadas, estes níveis são mais afetados pelo ar da estratosfera, onde a temperatura diminui devido ao aumento do arrefecimento radiativo pelo CO_2 . Deste modo, num clima futuro, o gradiente meridional da temperatura, nestes níveis, é intensificado, resultando numa forte atividade sinóptica (Mizuta et al., 2011). Enquanto o aumento na atividade sinóptica é grande na alta troposfera, o aumento é também visível na média troposfera (Pinto et al., 2007) e perto da superfície em determinadas regiões (Ulbrich et al., 2008).

De acordo com diversos estudos, o número total de ciclones extratropicais à superfície diminui nas projeções futuras (e.g. Geng et al., 2003; Bengtsson et al., 2006; Ulbrich et al., 2009). Esta alteração é consistente com a alteração da temperatura na baixa troposfera, onde o aquecimento é maior nas latitudes mais elevadas do que nas regiões tropicais. Uma das explicações apontadas para este aquecimento, deve-se à fusão da cobertura de neve e do gelo flutuante, que induzem alterações no albedo à superfície (Mizuta et al., 2011). Como consequência, o gradiente meridional da temperatura perto da superfície torna-se mais fraco, comparativamente ao gradiente no clima presente, resultando numa redução da baroclinicidade na baixa troposfera. A redução da baroclinicidade é apontada como uma das causas da diminuição do número de ciclones. Alguns resultados indicam um deslocamento na direção dos polos dos ciclones extratropicais (e.g. Bengtsson et al. 2006; Ulbrich et al., 2009; Yin 2005).

No Oceano Atlântico Norte, as alterações na temperatura da superfície do mar podem estar relacionadas com um enfraquecimento da circulação termohalina (as circulações termohalinas são circulações oceânicas produzidas por diferenças na temperatura e/ou na salinidade; alterações na temperatura ou salinidade da água do oceano cria alterações na densidade da água). Este enfraquecimento irá resultar na redução do transporte de calor para as latitudes mais elevadas. Este fenómeno pode resultar na formação de uma região, a Sul da Gronelândia, onde pode existir uma redução do aquecimento da temperatura da superfície do mar. O aumento do gradiente da temperatura da superfície do mar a sul desta região mais fria irá aumentar a baroclinicidade na baixa troposfera, criando condições mais favoráveis à ocorrência de ciclones extratropicais nesta região (Bengtsson et al., 2009).

Haarsma et al. (2013) realizaram um estudo de forma a compreender o impacto do aquecimento global e do aumento da temperatura da superfície do mar, nos ciclones que atingem o Oeste da Europa. Haarsma et al. (2013) mostraram que a região de desenvolvimento de ciclones tropicais no Atlântico se estende para Este. Esta extensão em

simultâneo com elevadas temperaturas da superfície do mar implica que os ciclones tropicais tenham maior probabilidade de atingirem a região baroclínica de latitudes médias, antes de se dissiparem. Após se unirem com o escoamento baroclínico instável nas latitudes médias, os ciclones intensificam-se devido ao aquecimento diabático a níveis superiores da troposfera originado pela libertação de calor latente. Como resultado da intensificação das tempestades, estas podem gerar ventos idênticos aos de um furacão ao longo da costa Oeste da Europa. De acordo com Leckebusch et al. (2004), as regiões do Oeste da Europa poderão tornar-se mais suscetíveis à ocorrência de windstorms num cenário de alterações climáticas, em relação ao clima presente.

Uma vez que as tempestades tropicais são, geralmente, intensificadas num clima mais quente, este fator pode contribuir para um aumento de tempestades mesmo nas latitudes mais elevadas, principalmente no Verão e Outono, dado que os ciclones tropicais podem tornar-se ciclones extratropicais quando migram para os polos (Bengtsson et al., 2007, 2009).

Na região extratropical do Hemisfério Sul (HS), o padrão das trajetórias das tempestades exhibe uma assimetria zonal (Hoskins et al., 2005). A estrutura na baixa troposfera das trajetórias das tempestades no Inverno deve-se, essencialmente, à assimetria da temperatura da superfície do mar (SST), apesar da topografia da América do Sul e da África do Sul ser também um fator importante (Inatsu et al., 2004). Os estudos realizados sobre os ciclones extratropicais no HS devido ao aquecimento global indicam um deslocamento na direção do polo das trajetórias dos ciclones de cerca de 5° (Bengtsson et al., 2006). A causa para este deslocamento não é clara, mas pode estar relacionada com uma pequena transição do máximo do gradiente das SST's (Inatsu et al., 2002).

A metodologia mais disseminada para investigar e projetar as alterações climáticas em função dos diferentes cenários de emissões de CO_2 passa pelo recurso aos modelos climáticos globais (Gent et al., 2011; Hazeleger et al., 2010). Estes modelos representam as interações entre atmosfera, superfície terrestre, oceano e gelo, incluindo parametrizações relativas aos processos de convecção, nuvens, superfície terrestre (orografia). Com estes modelos são realizadas várias simulações com diferentes concentrações de CO_2 para avaliar qual o comportamento da temperatura da atmosfera em resposta ao aumento dos gases de efeito de estufa. O modelo EC-Earth é um modelo climático baseado no modelo de previsão do tempo do ECMWF (ECMWF's *Integrated Forecasting System* (IFS)). Os modelos climáticos são exaustivamente avaliados comparando os seus resultados, para o clima presente, com observações e com reanálises, de modo a aferir a sua qualidade e, posteriormente se construir uma climatologia do modelo. Esta última comparada com os resultados num cenário futuro permite projetar e investigar as modificações no clima para diferentes cenários de emissões. Importa referir que a reanálise ERA-Interim (Berrisford et al., 2009) é baseada no modelo de previsão IFS do ECMWF, que assimila um conjunto de observações.

Os modelos globais juntamente com os modelos de *storm-tracking* ajudam na avaliação e caracterização das possíveis alterações do comportamento futuro dos sistemas ciclónicos nos diversos cenários climáticos. Diversos modelos de *storm-tracking* têm sido desenvolvidos nos últimos anos (e.g., Lambert 1998; Le Treunt e Kalnay 1990; Murray e Simmonds 1991; Hodges 1994, 1995; Serreze 1995; Haak e Ulbrich 1996; Sinclair 1994, 1995, 1997; Simmonds et al., 1999; Lionello et al., 2002; Halley et al., 2010), com o objetivo de identificar e caracterizar as

trajetórias dos ciclones. Alguns destes modelos baseiam-se no método lagrangeano, ao passo que outros baseiam-se no método euleriano. O método lagrangeano acompanha cada ciclone desde a sua formação (ciclogénese) à sua destruição (ciclólise), enquanto o método euleriano corresponde a um filtro de passa-banda.

Halley et al. (2010) desenvolveram um método que consiste em identificar as situações em que um ciclone tem no máximo três valores mínimos da pressão no nível médio do mar. Isto permite que os ciclones sejam seguidos desde a sua formação ao seu desaparecimento, sem recorrer a uma suavização espacial. O método também identifica situações de junção e divisão de ciclones. Hodges (1994) desenvolveu um modelo de *storm-tracking* de forma a realizar a identificação de fenómenos sinópticos que podem ser utilizados para uma análise objetiva atmosférica ou oceanográfica, usando dados provenientes de modelos numéricos ou de deteção remota. Este último método foi implementado neste trabalho, encontrando-se descrito no capítulo seguinte.

3 Modelos Globais, Modelo e Metodologia

3.1 Modelos Globais

No presente estudo são utilizadas as reanálises do Centro Europeu de Previsão de Tempo a Médio Prazo (ECMWF), reanálise ERA-Interim (Berrisford et al., 2009), do campo da vorticidade relativa aos 850 *hPa* em intervalos de 6h.

Os resultados dos modelos climáticos globais EC-Earth (*Earth System Model*) e NCAR CCSM4 (*National Center for Atmospheric Research Community Climate System Model Version 4*) são utilizados para comparação com a reanálise, com o mesmo campo de estudo. O modelo EC-Earth é um modelo do sistema Terra baseado no sistema de previsão sazonal do ECMWF (Hazeleger et al., 2010). Este modelo é composto por cinco modelos acoplados: IFS (representa a atmosfera), NEMO (representa o oceano), LIM (representa o gelo flutuante no oceano), HTESSEL (representa as superfícies continentais, incluindo o efeito da vegetação) e TM5 (representa a química da atmosfera). O modelo CCSM4 é um modelo climático acoplado para simular o sistema climático terrestre (Gent et al., 2011). É um modelo composto por quatro modelos distintos que simula simultaneamente a atmosfera terrestre, o oceano, a superfície da terra e o gelo flutuante e um acoplador.

Estes modelos foram utilizados para a realização de um conjunto de simulações climáticas. As variáveis necessárias ao cálculo do campo da vorticidade relativa aos 850 *hPa*, vento zonal e meridional aos 850 *hPa*, do modelo EC-Earth foram obtidas pelas simulações realizadas no Instituto Dom Luiz (IDL) e do modelo CCSM4 pelo Portal ESGF¹ (*Earth System Grid Federation*). O cenário usado para as alterações climáticas é o RCP 8.5 (*Representative Concentration Pathway* ~8.5 *W/m²*). São comparados dois períodos de 40 anos: (1) 1961–2000, representante do clima presente (20C) e (2) 2061–2100, representante de um potencial clima futuro (21C).

Neste estudo são comparadas as estatísticas dos ciclones extratropicais da reanálise ERA-Interim para o período 1979–2002, com as dos modelos climáticos globais EC-Earth e CCSM4 para o período 1961–2000, no clima presente.

3.2 Modelo de Storm-Tracking

O modelo de identificação das trajetórias dos ciclones utilizado neste estudo foi o modelo desenvolvido por K. I. Hodges (Hodges, 1994, 1995, 1996, 1999).

Este modelo utiliza um campo meteorológico, a vorticidade relativa ou a pressão ao nível médio do mar, para identificar os sistemas de circulação ciclônica, e seguir esses sistemas ao longo do tempo, produzindo estatísticas da sua distribuição espaço – temporal (Hodges, 1994).

O acompanhamento dos sistemas é realizado através da minimização de uma função custo para todas as trajetórias suavizadas de forma a obter o mínimo conjunto de trajetórias suaves.

¹ <http://pcmdi9.llnl.gov/esgf-web-fe/>

Esta técnica tem sido generalizada para o domínio esférico, eliminando a necessidade de utilização de projeções que podem introduzir erros sistemáticos, permitindo a análise de dados globais ou de grandes regiões esféricas (Hodges 1995).

Na identificação das trajetórias dos sistemas é utilizado o campo da vorticidade relativa aos 850 *hPa* em intervalos de tempo de 6h. Este campo é considerado o mais adequado para a identificação de ciclones na baixa troposfera (Bengtsson et al., 2006). O campo da vorticidade relativa é menos influenciado pela resposta de larga-escala, estando focado na pequena-escala sinóptica.

Contudo, o campo da vorticidade relativa na resolução média ou alta pode ser um campo com muito ruído para utilizar neste tipo de estudos. Este campo é então reduzido para a resolução T42. A análise dos ciclones extratropicais e tropicais é realizada nesta resolução, na grelha gaussiana, permitindo que a identificação de cada conjunto de dados seja efetuada na mesma escala sinóptica espacial.

Os conjuntos de trajetórias são filtrados de forma a reter apenas os sistemas que duraram pelo menos 2 dias, o correspondente a 8 intervalos de tempo, e que se deslocam pelo menos 1000 *km* (Hodges 1999). Estes parâmetros definidos permitem focar o estudo apenas nos sistemas em movimento, cujo impacto no clima é relevante.

A estatística espacial é calculada a partir das trajetórias identificadas pelo modelo, usando os métodos esféricos de *kernel*, que calcula a estatística diretamente na esfera. Este método permite calcular a estatística independente da projeção (Hodges 1996).

3.3 Metodologia

O modelo de *storm tracking* descrito na secção 3.2 foi aplicado aos dados do campo da vorticidade relativa aos 850 *hPa* da reanálise ERA-Interim e, dos modelos EC-Earth e CCSM4. Dos resultados obtidos pelo modelo, são utilizados os que contêm a informação referente aos sistemas ciclónicos que duraram pelo menos 2 dias e, que se deslocaram mais de 1000 *km*. Os dados mensais são agrupados num único ficheiro de forma a produzir ficheiros sazonais (DJF, MAM, JJA e SON) para cada ano.

Numa primeira fase de análise, são calculadas as estatísticas para os períodos sazonais no Hemisfério Norte e Sul para Dezembro-Fevereiro (DJF), Março-Maio (MAM), Junho-Agosto (JJA) e Setembro-Novembro (SON) dos dados obtidos da reanálise e dos modelos. As estatísticas calculadas utilizam a metodologia acima descrita (secção 3.2).

As estatísticas espaciais calculadas são as densidades de trajetórias e de ciclogénese e a intensidade média. A densidade de trajetória é calculada utilizando os pontos da trajetória de cada sistema, ou seja, corresponde ao número de sistemas que passam numa determinada área. A densidade da ciclogénese é definida pelo número de sistemas originados numa dada região, sendo calculada a partir do ponto inicial de cada trajetória. Os cálculos são realizados para regiões com cerca de 10^6 km^2 (calote esférica com abertura de 5°). A intensidade média é obtida pelo quociente entre a média das intensidades e a densidade da trajetória para cada área definida. Esta última variável tem as unidades da vorticidade, s^{-1} .

Numa segunda fase de análise, e de modo a comparar os dois modelos com a reanálise de uma forma mais global, para cada hemisfério, é determinada a distribuição do número de tempestades por mês para cada estação em função da intensidade máxima atingida por cada tempestade ao longo do seu tempo de vida. Foram definidas sete regiões de interesse, de modo a avaliar o desempenho dos dois modelos globais relativamente à reanálise, para complementar a análise global. A análise regional é feita com base na distribuição do número de tempestades por estação em função da intensidade máxima de cada sistema ciclónico.

Numa última fase de análise, relativamente ao primeiro objetivo definido, são calculados os indicadores de erro a nível espacial para os três parâmetros estatísticos, nos quatro períodos sazonais. Os indicadores de erro utilizados foram os seguintes: viés (*BIAS*), viés percentual (*PBIAS*), erro absoluto médio (*MAE*), erro absoluto médio percentual (*MAPE*), erro médio quadrático (*RMSE*) e coeficiente de correlação (*r*), definidos por:

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (m_k - r_k) \quad (1)$$

$$PBIAS = \frac{BIAS}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N r_k} \times 100 \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |m_k - r_k| \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{MAE}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N r_k} \times 100 \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (m_k - r_k)^2} \quad (5)$$

$$r = \frac{N \sum_{k=1}^N (r_k m_k) - \sum_{k=1}^N r_k \sum_{k=1}^N m_k}{(N \sum_{k=1}^N r_k^2 - (\sum_{k=1}^N r_k)^2) \times (N \sum_{k=1}^N m_k^2 - (\sum_{k=1}^N m_k)^2)} \quad (6)$$

Sendo r_k o valor da reanálise e m_k o valor do modelo num determinado ponto do espaço. Na análise a nível espacial, o valor de N corresponde ao número de pontos de grelha.

No estudo do impacto do aquecimento global, são calculadas as estatísticas espaciais para os dois modelos globais, num clima futuro, utilizando o mesmo processamento da primeira fase de análise. As anomalias dos três parâmetros estatísticos são calculadas entre o clima futuro e o presente, para ambos os modelos globais nos períodos sazonais. De forma a analisar as diferenças globais e regionais, são comparadas as distribuições do número de tempestades

por mês e por estação, respetivamente, em função da intensidade máxima dos sistemas, de ambos os climas em estudo.

4 Resultados e Discussão

4.1 Hemisfério Norte

4.1.1 Avaliação Global dos Modelos

No presente subcapítulo é apresentada uma avaliação e caracterização dos ciclones extratropicais, no clima presente, comparando os resultados da reanálise ERA-Interim, para o período de 1979-2002, com os de dois modelos globais, o EC-Earth e o CCSM4, ambos para o período de 1961-2000. Esta caracterização consiste na avaliação global dos modelos, com base numa análise de padrões espaciais das estatísticas calculadas, de histogramas de distribuição e dos respetivos indicadores de erro.

Na Figura 1 estão representadas as estatísticas espaciais, densidade de trajetória (à esquerda), intensidade média (no meio) e densidade de ciclogénese (à direita), para o Inverno no Hemisfério Norte (DJF), para a reanálise (em cima) e os dois modelos globais, EC-Earth (no meio) e CCSM4 (em baixo).

Existem regiões onde a densidade de trajetória é significativa, tais como o Atlântico Norte, Pacífico Norte, Sibéria, Mediterrâneo e Norte dos Estados Unidos/Canadá (Figura 1a). A densidade de trajetória é bastante pronunciada na região Noroeste do Pacífico Norte, estendendo-se para leste. No Mediterrâneo, as tempestades prolongam-se sobre o Médio Oriente. Sobre o Atlântico Norte, a densidade de trajetória é maior a Sul da Gronelândia e na costa leste do Canadá. Nos Oceanos Atlântico e Pacífico Norte, a intensidade média é elevada (Figura 1b), correspondendo a duas regiões com maior densidade de trajetória. Nestas duas áreas mencionadas, mais especificamente, na região a Sul da Gronelândia e Noroeste do Pacífico, as elevadas intensidades médias indicam uma importante contribuição dos vórtices transientes para o campo médio de larga-escala da vorticidade, associada aos centros de baixa pressão à superfície no Atlântico Norte (baixa da Islândia) e no Pacífico Norte (baixa das Aleutas) (Bengtsson et al., 2006). Nas restantes regiões mencionadas onde a densidade de trajetória é significativa, as intensidades médias dos sistemas são mais fracas. O padrão da densidade de ciclogénese (Figura 1c) mostra diversas regiões no HN onde se inicia este processo. Na América do Norte existem duas áreas onde a ciclogénese é pronunciada, uma no lado Este das Montanhas Rochosas e a outra situada nas Montanhas Rochosas Canadianas. A densidade de ciclogénese nestas regiões, Novo México, Colorado e Montanhas Rochosas Canadianas, é ligeiramente mais acentuada que na costa leste dos Estados Unidos. No continente asiático existem três áreas onde a ciclogénese é significativa, nas encostas orientais do Tibete, no Nordeste da China e a Este do Japão. Sobre o Mar Mediterrâneo e o Mar Cáspio, os valores também são significativos. O padrão da ciclogénese mostra um padrão heterogéneo em todo o hemisfério, mas com maior incidência pronunciada em determinadas áreas, indicando a importância do forçamento orográfico e dos fluxos de calor locais na ciclogénese.

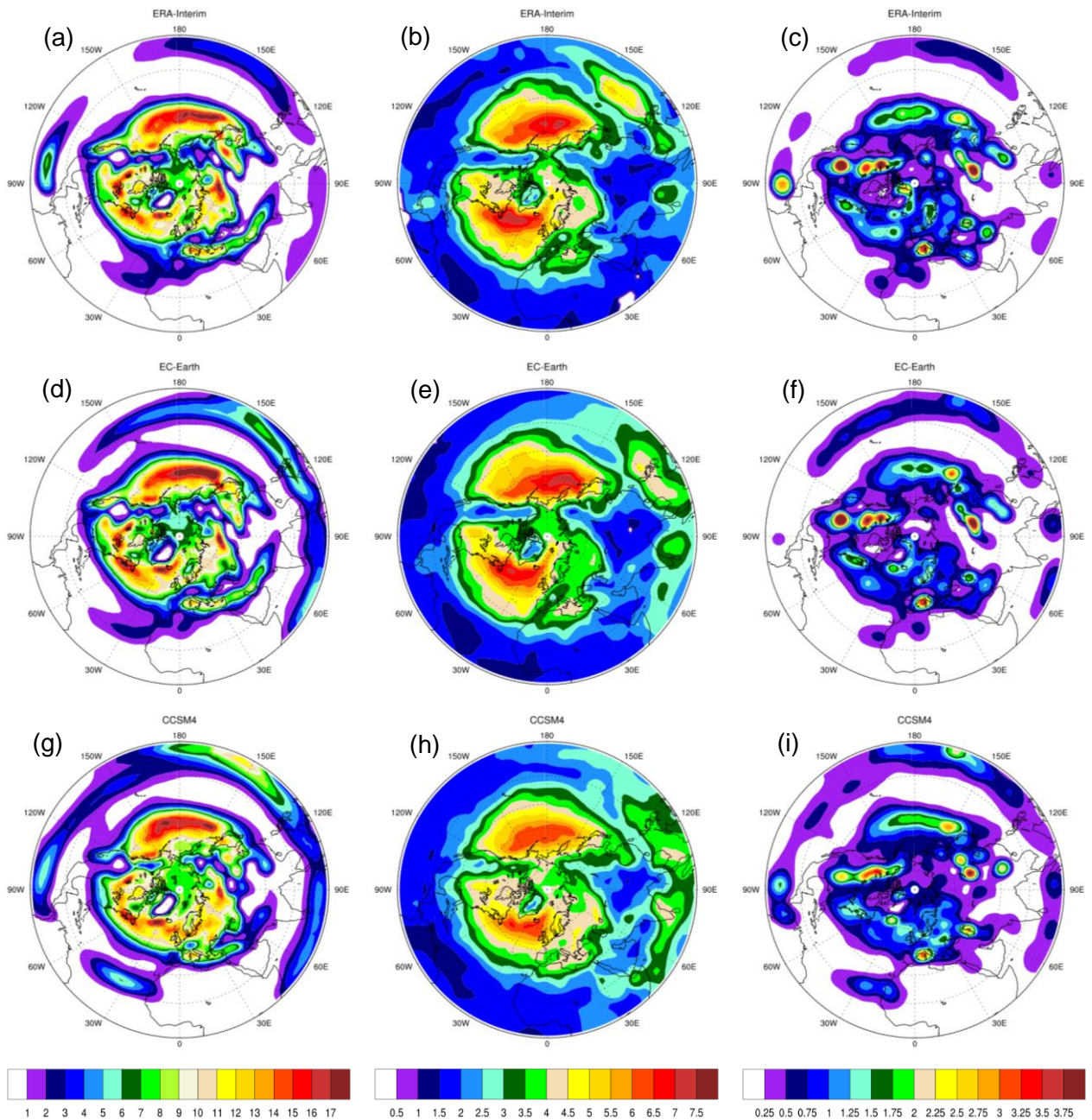


Figura 1 - Estatísticas espaciais para o Inverno do Hemisfério Norte (DJF) para ERA-Interim (1979-2002), EC-Earth e CCSM4 (1961-2000): (a, d, g) densidade de trajetória, (b, e, h) intensidade média e (c, f, i) densidade de ciclogénese da ERA-I, do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente. A intensidade média está em unidades de $10^{-5} s^{-1}$.

Os resultados dos modelos globais EC-Earth e CCSM4 estão representados nas Figuras 1d-f e 1g-i, respetivamente. Relativamente ao modelo EC-Earth, nas regiões do Atlântico e Pacífico Norte, e Sibéria, a densidade de trajetória é um pouco mais pronunciada (Figura 1d) relativamente à reanálise. As intensidades médias são ligeiramente mais elevadas no Pacífico Norte e um pouco mais fracas no Atlântico Norte (Figura 1e). O padrão da densidade de ciclogénese é idêntico excetuando algumas diferenças existentes na região Sul da China e a Este do Japão (Figura 1f). Em relação ao modelo CCSM4, o padrão da densidade de trajetória

(Figura 1g) e da intensidade média (Figura 1h) é idêntico, mas menos acentuado comparando com a ERA-Interim. A densidade de ciclogénese apresenta algumas diferenças, especialmente nas regiões da América do Norte, Mediterrâneo e Sibéria (Figura 1i). As regiões do Tibete e a Este do Japão mostram padrões idênticos de ciclogénese.

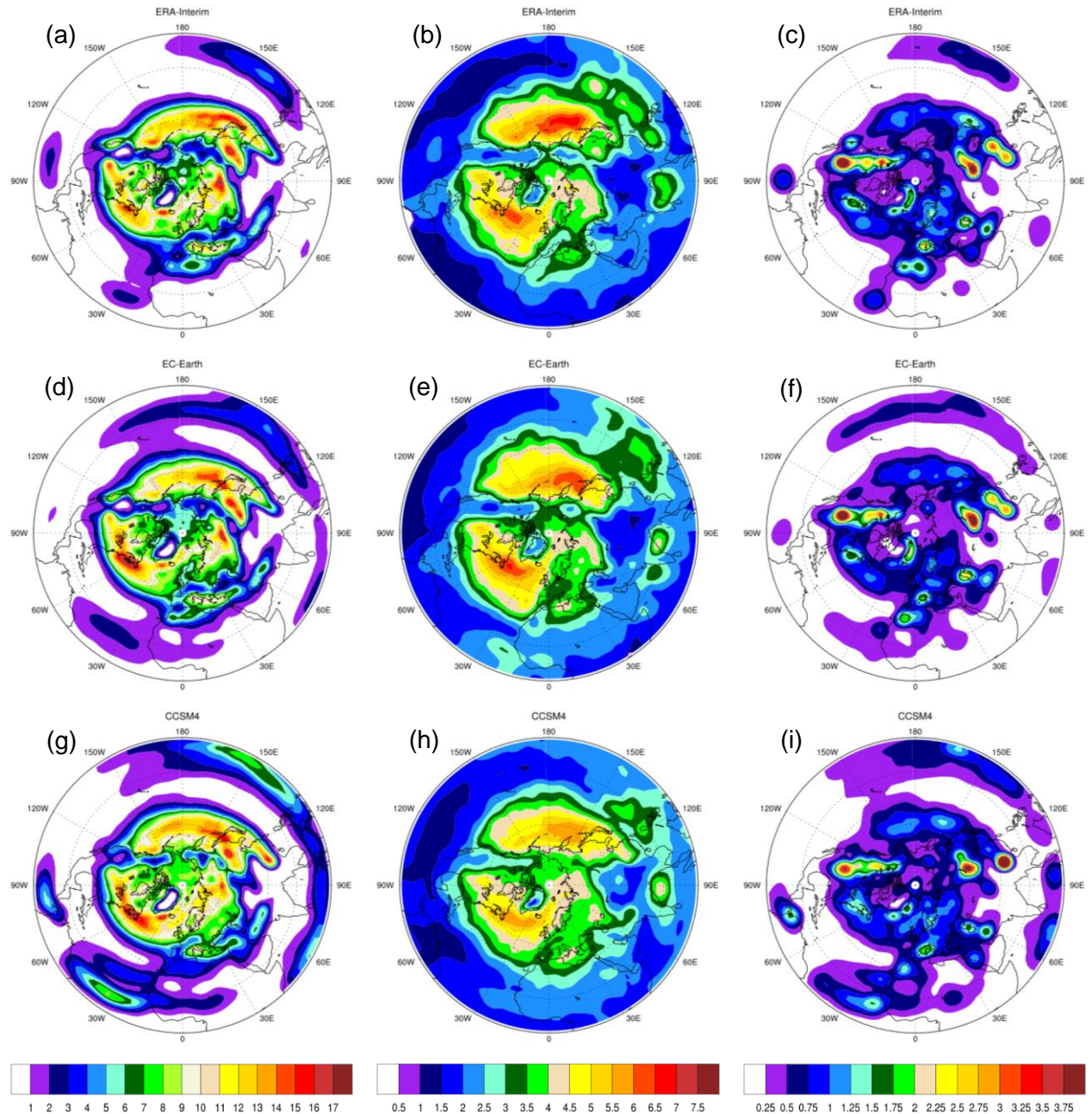


Figura 2 - Estatísticas espaciais para a Primavera do Hemisfério Norte (MAM) para ERA-Interim (1979-2002), EC-Earth e CCSM4 (1961-2000): (a, d, g) densidade de trajetória, (b, e, h) intensidade média e (c, f, i) densidade de ciclogénese da ERA-I, do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente. A intensidade média está em unidades de $10^{-5} s^{-1}$.

Na Figura 29 (Apêndice A) estão representadas as estatísticas espaciais (densidade de trajetória, intensidade média e densidade de ciclogénese) do trabalho de Bengtsson et al. (2006) para comparação com os resultados anteriormente descritos. O padrão da densidade de

trajetória e da intensidade média é bastante idêntico entre a reanálise ERA-Interim (Figura 1a–b) e ERA-40 (Figura 29a), bem como o padrão de ciclogênese (Figuras 1c e 29c, respetivamente). A muito boa concordância entre as duas reanálises era expectável, visto terem ambas sido produzidas com duas versões do mesmo modelo (IFS do ECMWF), porém permite apenas validar a metodologia implementada e os resultados obtidos para os diversos modelos.

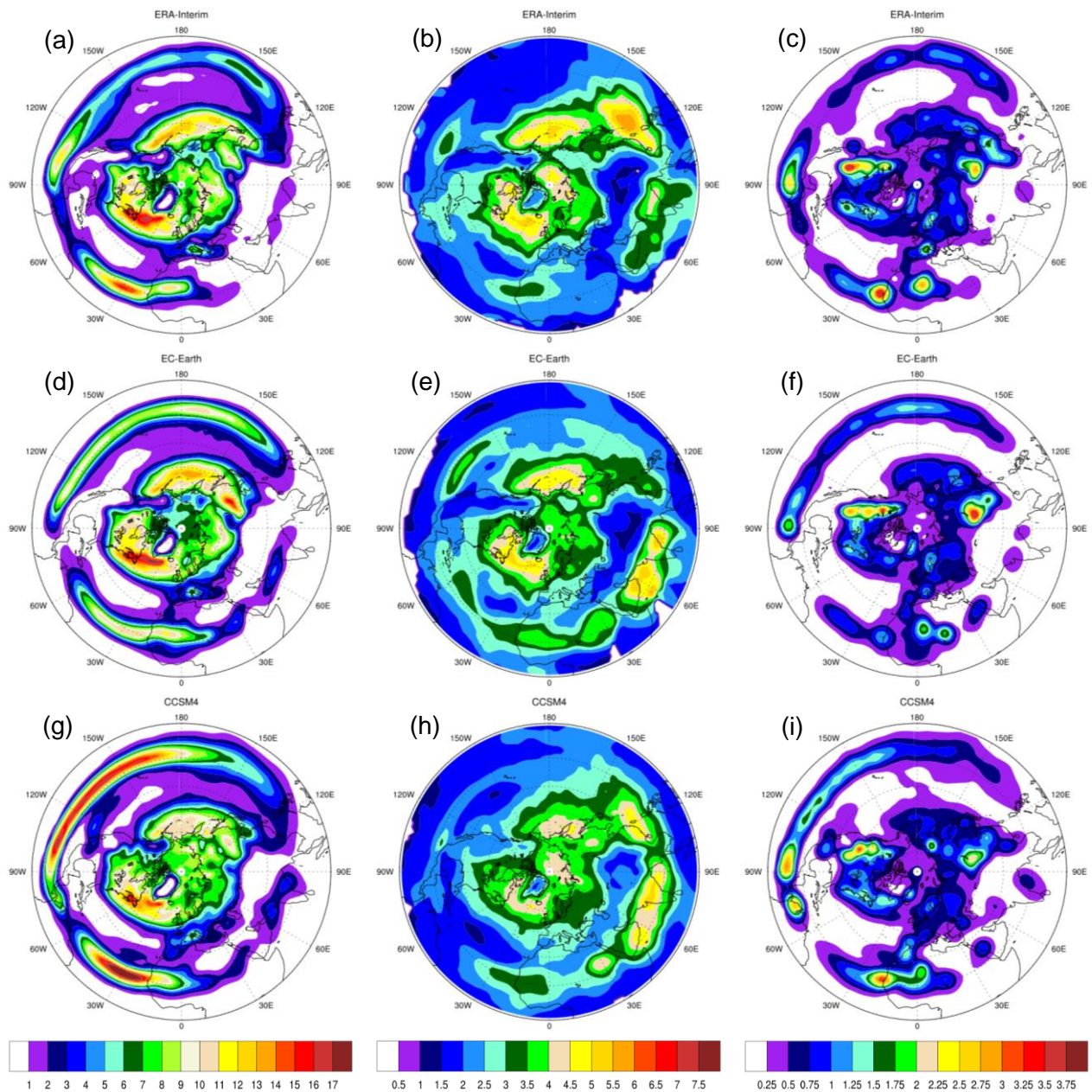


Figura 3 - Estatísticas espaciais para o Verão do Hemisfério Norte (JJA) para ERA-Interim (1979-2002), EC-Earth e CCSM4 (1961-2000): (a, d, g) densidade de trajetória, (b, e, h) intensidade média e (c, f, i) densidade de ciclogênese da ERA-I, do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente. A intensidade média está em unidades de $10^{-5}s^{-1}$.

Na Figura 2 estão representadas as mesmas estatísticas espaciais para os mesmos modelos globais para a Primavera no Hemisfério Norte (MAM). O padrão da densidade de trajetória é

semelhante ao representado em DJF, mas com menor densidade (Figura 2a). No Nordeste da China e a Sul do Japão existe um ligeiro aumento no número de tempestades a atravessar estas regiões. Sobre o Atlântico e Pacífico Norte, os sistemas são mais intensos (Figura 2b) comparativamente com outras regiões onde a densidade de trajetória é significativa. As regiões de geração de tempestades são idênticas às observadas em DJF, com redução acentuada sobre o Mar Mediterrâneo e Este do Japão (Figura 2c).

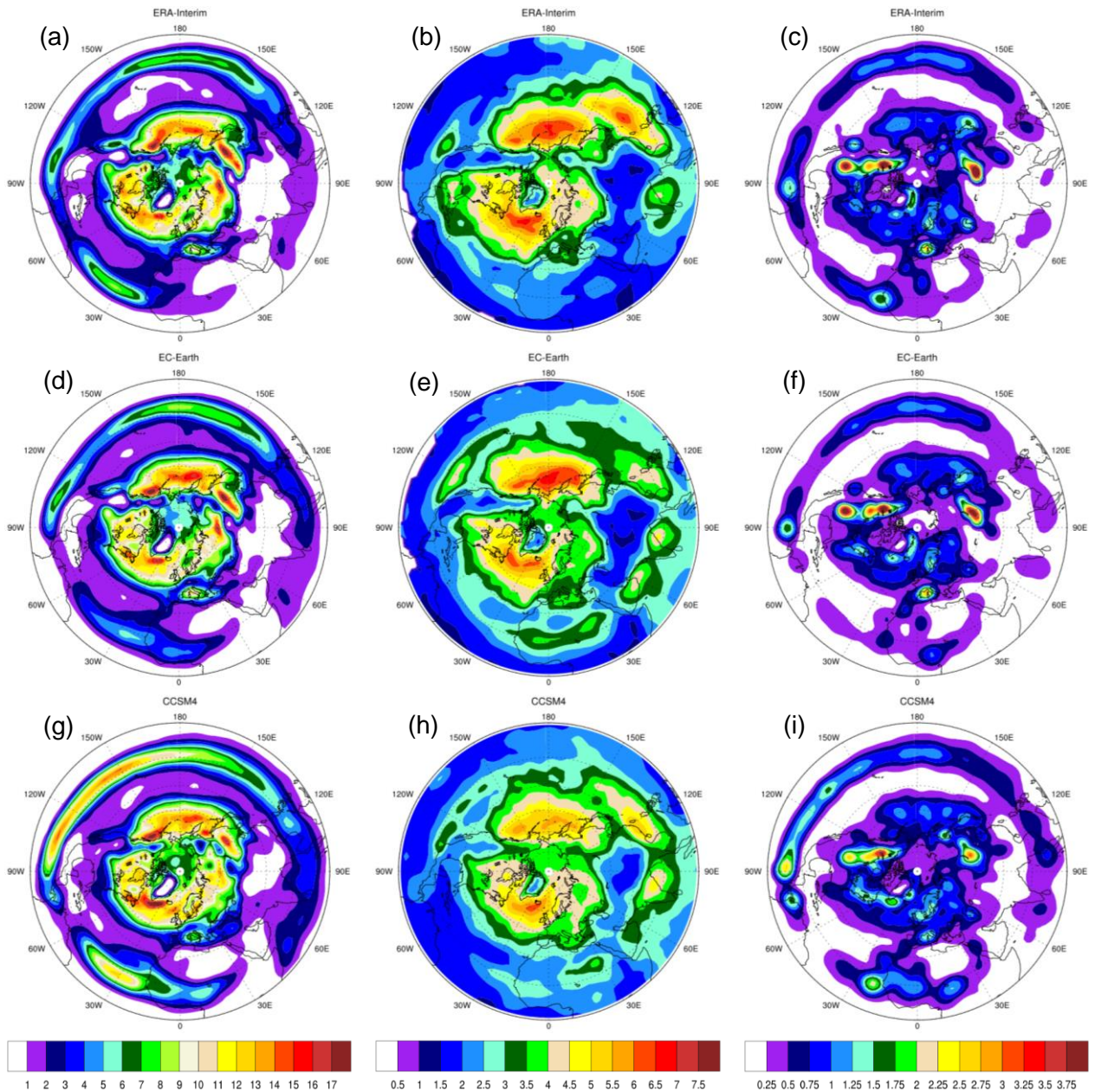


Figura 4 - Estatísticas espaciais para o Outono do Hemisfério Norte (SON) para ERA-Interim (1979-2002), EC-Earth e CCSM4 (1961-2000): (a, d, g) densidade de trajetória, (b, e, h) intensidade média e (c, f, i) densidade de ciclogénese da ERA-I, do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente. A intensidades média está em unidades de $10^{-5} s^{-1}$.

O modelo global EC-Earth apresenta algumas diferenças relativamente à densidade de trajetória (Figura 2d). As áreas com maior densidade são idênticas às identificadas na ERA-

Interim, no entanto com um menor número de ocorrências, exceto na costa leste do Canadá. Os sistemas apresentam uma intensidade média menor comparativamente com a reanálise (Figura 2e). O padrão da densidade de ciclogênese é bem representado. Relativamente ao modelo CCSM4, a densidade de trajetória (Figura 2g) apresenta um padrão semelhante à reanálise e ao EC-Earth. O padrão da intensidade média é idêntico, apesar das tempestades serem menos intensas (Figura 2h). No Sul da China, a ciclogênese é mais pronunciada que na reanálise (Figura 2i).

A estatística espacial no Verão do Hemisfério Norte (JJA) está representada na Figura 3. Na região extra-tropical, entre a costa leste do Canadá e a zona Sul da Gronelândia, o número de tempestades é significativo. Na região dos trópicos (Figura 3a), o número de tempestades que atravessam o Oceano Atlântico e Pacífico Norte é superior ao comparar com DJF e MAM. Apesar do número de sistemas que atravessam o Sul do Japão ser pequeno, as intensidades médias são significativas (Figura 3b). Junto à costa Oeste da África do Norte, sobre Cabo Verde, e a Sul da América Central no Oceano Pacífico existe uma região de geração de tempestades (Figura 3c).

Os modelos globais, EC-Earth e CCSM4, mostram um padrão da densidade de trajetória na região tropical do Oceano Atlântico e Pacífico idêntico aos da ERA-Interim, com maior densidade no segundo modelo (Figuras 3d e 3g, respetivamente). Sobre a Índia, os valores da intensidade média são significativos em ambos os modelos, o que pode indicar uma sobrestimação da monção (Figuras 3e e 3h). Nas regiões onde ocorre o processo de ciclogênese, as densidades são idênticas relativamente à reanálise.

No Outono do Hemisfério Norte (SON), os resultados da estatística são idênticos a JJA. Na região extratropical, o padrão da densidade de trajetória é idêntico ao padrão obtido em JJA, com uma intensificação do número de tempestades no Oceano Pacífico Este e a Nordeste do continente asiático. Nos trópicos é visível um padrão idêntico da densidade de trajetória ao de JJA, apesar desta ser menor (Figura 4a). As regiões a Este do Japão e nos Oceanos Atlântico e Pacífico Norte (Figura 4b) têm valores de intensidade média elevados. As áreas com presença de ciclogênese em SON são menos intensas, excetuando na região das Montanhas Rochosas e nas encostas orientais do Tibete (Figura 4c). Sobre o Mediterrâneo, a densidade de ciclogênese é significativa.

Os modelos EC-Earth e CCSM4 apresentam padrões idênticos relativamente à reanálise nos três parâmetros estatísticos. Em relação ao segundo modelo mencionado, a densidade de trajetória sobre o Atlântico Norte é mais intensa comparativamente à ERA-Interim. Os sistemas apresentam valores de intensidade média inferiores aos sistemas da reanálise. O padrão da densidade de ciclogênese nos modelos EC-Earth e CCSM4 é bastante semelhante ao da reanálise, apesar deste último apresentar densidades menores.

Em suma, o modelo EC-Earth é capaz de reproduzir as trajetórias das tempestades extratropicais e as suas propriedades, para todas as estações, apresentando uma boa concordância com a reanálise ERA-Interim no padrão espacial dos parâmetros estatísticos calculados.

Relativamente ao modelo global CCSM4, os resultados obtidos são capazes de reproduzir as trajetórias das tempestades extratropicais, em todas as estações, com uma boa concordância

com a reanálise ERA-Interim. Em geral, na região extratropical, o padrão espacial da densidade de trajetória e da intensidade média é similar, embora menos intenso. Em relação ao parâmetro da densidade de ciclogénese, as diferenças são mais significativas.

Na Figura 5, a distribuição do número de tempestades por mês e para cada estação (DJF, MAM, JJA, SON), está apresentada em função da sua intensidade máxima, obtida sobre o tempo de vida da tempestade. Em geral, existe uma boa concordância entre a reanálise e os dois modelos globais. No Inverno, o modelo CCSM4 mostra uma distribuição para intensidades máximas menores idêntica à da reanálise, enquanto o modelo EC-Earth apresenta um menor número de tempestades. Para intensidades máximas superiores a $12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, o modelo EC-Earth apresenta uma distribuição próxima da reanálise, e o CCSM4 subestima o número de sistemas em relação à reanálise. Nas outras estações, o número de sistemas mais fracos ($< 7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) é ligeiramente superior no modelo CCSM4 e inferior no EC-Earth, relativamente à ERA-Interim. Nos sistemas mais intensos, o número e a sua distribuição é praticamente idêntico entre reanálise e modelos.

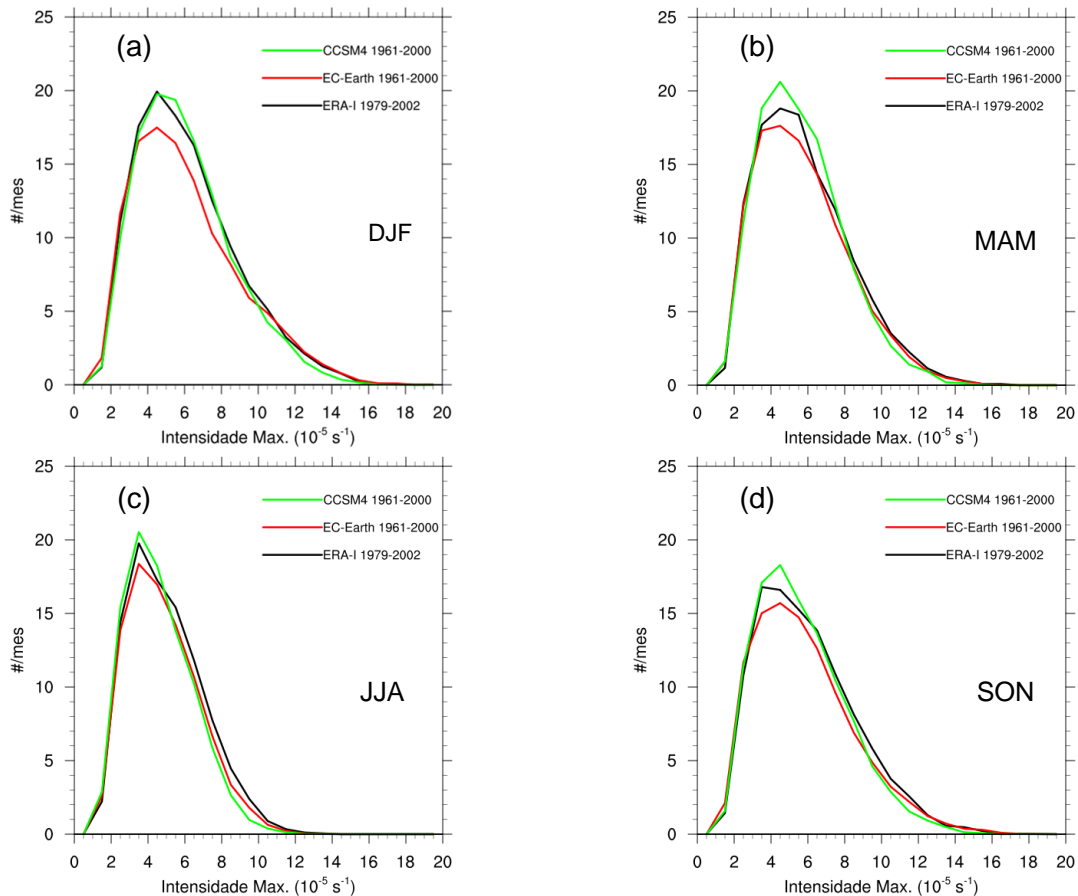


Figura 5 - Distribuição do número de tempestades ciclónicas por mês em função da sua intensidade máxima para a reanálise ERA-Interim e os dois modelos globais, EC-Earth e CCSM4, para o HN, para cada estação, entre os 30° e 90°N : (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.

Nas tabelas 1, 2 e 3 estão resumidos os erros espaciais entre os dois modelos globais em estudo e a reanálise, em DJF, MAM, JJA e SON, para a densidade de trajetória, densidade de

ciclogénese e intensidade média, respetivamente, utilizando as equações descritas na secção 3.3.

Em relação à densidade de trajetória (Tabela 1), o modelo EC-Earth subestima o número de tempestades, ao passo que o CCSM4 sobrestima. Em DJF, o modelo EC-Earth apresenta um viés de -4.23% e o modelo CCSM4 de 5.89% relativamente à ERA-Interim. Em JJA, estas diferenças são menores. O MAE excede 1 tempestade por mês em JJA, e menos do que uma nas restantes estações, no caso do modelo EC-Earth. O MAE, no CCSM4, excede 1 tempestade por mês em todas as estações do ano. Em ambos os modelos, o MAPE não excede os 25% e o RMSE as 2 tempestades por mês. Os coeficientes de correlação entre a reanálise e os modelos são superiores a 0.90, excepto em JJA no CCSM4 que é de 0.85. Genericamente, os resultados do EC-Earth são superiores.

Tabela 1 – Indicadores de erro espaciais dos dois modelos (1961-2000) relativamente à reanálise (1979-2002), para DJF, MAM, JJA e SON, para a densidade de trajetória.

Densidade de Trajetória		DJF	MAM	JJA	SON
BIAS (#/month)	EC-Earth	-0.23	-0.15	-0.18	-0.16
	CCSM4	0.32	0.60	0.20	0.51
PBIAS (%)	EC-Earth	-4.23	-2.92	-3.78	-1.85
	CCSM4	5.89	11.80	4.29	10.00
MAE (#/month)	EC-Earth	0.95	0.79	1.09	0.80
	CCSM4	1.27	1.21	1.26	1.24
MAPE (%)	EC-Earth	17.70	15.66	21.53	15.50
	CCSM4	23.65	23.98	25.02	24.20
RMSE (#/month)	EC-Earth	1.36	1.10	1.58	1.09
	CCSM4	1.78	1.65	1.99	1.80
r	EC-Earth	0.95	0.96	0.91	0.96
	CCSM4	0.92	0.93	0.85	0.91

Tabela 2 - Indicadores de erro espaciais dos dois modelos (1961-2000) relativamente à reanálise (1979-2002), para DJF, MAM, JJA e SON, para a densidade de ciclogénese.

Densidade de Ciclogénese		DJF	MAM	JJA	SON
BIAS (#/month)	EC-Earth	-0.08	-0.03	-0.05	-0.06
	CCSM4	-0.02	0.03	2.18×10^{-3}	0.02
PBIAS (%)	EC-Earth	-12.06	-6.16	-9.39	-9.98
	CCSM4	-3.13	5.79	0.41	3.01
MAE (#/month)	EC-Earth	0.16	0.12	0.15	0.12
	CCSM4	0.21	0.18	0.17	0.17
MAPE (%)	EC-Earth	25.19	20.78	27.22	21.69
	CCSM4	33.79	31.98	29.95	30.18
RMSE (#/month)	EC-Earth	0.26	0.17	0.23	0.18
	CCSM4	0.36	0.31	0.26	0.28
r	EC-Earth	0.91	0.95	0.85	0.94
	CCSM4	0.80	0.80	0.80	0.81

Na densidade de ciclogénese (Tabela 2), o valor do viés percentual no EC-Earth é de cerca de -12% (DJF) e de -9% (JJA) e, no CCSM4 de -3% (DJF) e de 0.41% (JJA). O MAE é superior no CCSM4 comparativamente ao EC-Earth, mas não excede o valor de 0.21 tempestades que se formam por mês. Os valores do MAPE concentram-se entre os 20 e 28% no EC-Earth e, entre 29 e 34% no CCSM4. O coeficiente de correlação entre a ERA-Interim e o EC-Earth é superior a 0.90, excepto em JJA (0.85), ao passo que entre a reanálise e o CCSM4 é de cerca de 0.80.

O viés global da intensidade média (Tabela 3) é positivo em ambos os modelos, exceto em JJA e SON no EC-Earth. O MAE é superior no modelo CCSM4 relativamente ao EC-Earth e MAPE não excede os 15% em ambos os modelos. O valor do RMSE é, em geral, cerca de $0.50 \times 10^{-5} s^{-1}$, sendo maior no CCSM4. Os coeficientes de correlação são superiores a 0.85, nos dois modelos.

Tabela 3 - Indicadores de erro espacial dos dois modelos (1961-2000) relativamente à reanálise (1979-2002), para DJF, MAM, JJA e SON, para a intensidade média.

Intensidade Média		DJF	MAM	JJA	SON
BIAS ($\times 10^{-5} s^{-1}$)	EC-Earth	0.01	0.05	-0.05	-0.04
	CCSM4	0.12	0.09	1.43×10^{-3}	0.03
PBIAS (%)	EC-Earth	0.26	1.49	-1.53	-1.21
	CCSM4	3.43	2.74	0.47	0.76
MAE ($\times 10^{-5} s^{-1}$)	EC-Earth	0.29	0.26	0.38	0.39
	CCSM4	0.44	0.37	0.42	0.47
MAPE (%)	EC-Earth	8.49	7.98	11.57	11.42
	CCSM4	12.70	11.22	12.71	13.69
RMSE ($\times 10^{-5} s^{-1}$)	EC-Earth	0.40	0.36	0.54	0.53
	CCSM4	0.57	0.48	0.54	0.60
r	EC-Earth	0.96	0.96	0.85	0.90
	CCSM4	0.91	0.92	0.85	0.88

De um modo geral, o modelo EC-Earth apresenta erros menores a nível espacial que o modelo CCSM4. O modelo CCSM4 mostra erros menores em JJA e maiores em DJF, relativamente ao EC-Earth. Pela análise das tabelas, o modelo EC-Earth apresenta uma caracterização dos ciclones extratropicais próxima da ERA-Interim, podendo ser considerado o melhor modelo.

4.1.2 Avaliação Regional dos Modelos

A avaliação regional dos modelos globais é apresentada nesta secção, utilizando a informação estatística anterior. Uma vez que a distribuição global do número de tempestades por mês em função da sua intensidade máxima não apresenta diferenças significativas entre a reanálise e os dois modelos, foi efetuado um estudo a nível regional. Com este estudo pretende-se avaliar os modelos a nível regional, dado poderem existir diferenças consideráveis, não visíveis a nível global.

Para esta avaliação foram escolhidas sete regiões em concordância com o trabalho de Bengtsson et al. (2006) e com um foco especial na região do Mediterrâneo (mapas dos domínios regionais no Apêndice C):

- Atlântico Este: $50^{\circ} - 65^{\circ} N, 0^{\circ} - 40^{\circ} W$ (Figura 45);
- Índia: $15^{\circ} S - 40^{\circ} N, 45^{\circ} - 105^{\circ} E$ (Figura 46);
- Mediterrâneo: $28^{\circ} - 48^{\circ} N, 10^{\circ} W - 40^{\circ} E$ (Figura 47);
- Norte da Europa: $50^{\circ} - 65^{\circ} N, 0^{\circ} - 30^{\circ} E$ (Figura 48);
- Pacífico Este: $0^{\circ} - 35^{\circ} N, 90^{\circ} - 135^{\circ} W$ (Figura 49);
- Pacífico Oeste: $0^{\circ} - 35^{\circ} N, 110^{\circ} - 180^{\circ} E$ (Figura 50);
- Região Principal de Desenvolvimento do Atlântico (Atlântico MDR): $8^{\circ} - 35^{\circ} N, 50^{\circ} - 86^{\circ} W$ (Figura 51).

Nas figuras 6 a 12 estão representadas as distribuições do número de tempestades por estação do ano, em função da intensidade máxima atingida durante o tempo de vida da tempestade, em DJF, MAM, JJA e SON, para as regiões mencionadas anteriormente, respetivamente.

Na região do Atlântico Este (Figura 6), a distribuição é semelhante entre a reanálise e os dois modelos nas quatro estações, apesar da existência de algumas diferenças, sendo estas mais significativas em JJA e MAM. Entre os valores de intensidade máxima 4 e $11 \times 10^{-5} s^{-1}$, a reanálise é caracterizada por máximos relativos diversos. Neste intervalo, ambos os modelos apresentam alguma dificuldade em descrever a distribuição. O modelo EC-Earth, em DJF, apresenta uma distribuição similar à reanálise (Figura 6a). Em MAM (Figura 6b), o número de tempestades com intensidades máximas intermédias é ligeiramente inferior nos modelos. Na distribuição do número de sistemas em SON (Figura 6d), existe um desfasamento para a esquerda do pico da intensidade máxima dos modelos, CCSM4 e EC-Earth, em relação à ERA-Interim. Em JJA (Figura 6c) é também visível um desfasamento para menores valores de intensidade máxima na distribuição do modelo CCSM4, produzindo, em geral, tempestades mais fracas. O pico máximo da distribuição do modelo EC-Earth é idêntico ao da reanálise, subestimando em cerca de 10% o número de tempestades com intensidades máximas superiores à do pico máximo.

Na Figura 7 está representada a distribuição do número de tempestades por estação em função da intensidade máxima para a região da Índia. O modelo CCSM4 sobrestima o número de sistemas em cerca de 30% em JJA e SON, e em cerca de 20% em MAM, em relação à ERA-Interim. Em DJF, a distribuição é bastante semelhante para intensidades máximas inferiores a $4 \times 10^{-5} s^{-1}$. Para intensidades superiores à referida, o número de tempestades é ligeiramente superior nos modelos em relação à reanálise. Os padrões da distribuição de todas as estações apresentam um pequeno ciclo anual, mais acentuado nas estações DJF e MAM. Nos sistemas menos intensos ($< 4 \times 10^{-5} s^{-1}$), o número de tempestades é maior no modelo CCSM4 em JJA, MAM e SON, relativamente à ERA-I e ao EC-Earth. Em DJF, MAM e SON, a distribuição do EC-Earth é bastante idêntica à reanálise, apresentando pequenas diferenças

em JJA. Nesta região, o modelo EC-Earth representa claramente melhor a distribuição do número de tempestades.

No Mediterrâneo (Figura 8), o modelo EC-Earth descreve bastante bem em todas as estações, com exceção de JJA, onde subestima em cerca de 25% o número de tempestades com intensidades máximas entre 2 e $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Em DJF, este modelo apresenta um ligeiro deslocamento para valores maiores de intensidade máxima, mantendo o mesmo número de sistemas no pico máximo da distribuição. Em MAM e SON, o EC-Earth subestima o número de sistemas com intensidades máximas inferiores a $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ($\sim 10\%$), e apresenta uma sobrestimação ($\sim 30\%$) para valores superiores. O modelo CCSM4 genericamente subestima no número de tempestades nesta região, cerca de 25% em MAM e SON e de 15% em DJF e JJA, com uma exceção mais notória das mais intensas no Outono. Esta região mostra um ciclo anual, sendo o pico máximo em MAM e, SON a estação do ano com menor ocorrência de tempestades. Nesta região o melhor modelo a descrever a distribuição do número de ciclones extratropicais é o EC-Earth.

Na região do Norte da Europa, os modelos parecem ter mais dificuldade a descrever as distribuições da reanálise, que são caracterizadas por máximos relativos diversos. Em DJF (Figura 9a), o modelo EC-Earth evidencia um ligeiro desfasamento para menores valores relativamente à ERA-Interim e ao CCSM4, apesar dos padrões serem semelhantes. O modelo CCSM4 sobrestima o número de tempestades com valores de intensidade máxima entre 4 a $8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, nesta estação do ano. Em MAM e SON (Figuras 9b e d, respetivamente), a distribuição do número de tempestades por estação é semelhante, sendo pequenas as diferenças entre modelos e reanálise. Para valores de intensidade máxima maiores que $7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, o modelo EC-Earth tende a subestimar o número de tempestades, enquanto o modelo CCSM4 apresenta uma distribuição semelhante à da reanálise. Em JJA, o padrão entre ERA-Interim e EC-Earth é idêntico, sendo que o modelo CCSM4 apresenta um ligeiro desfasamento do pico máximo para valores menores da intensidade máxima (Figura 9c). A partir de um valor de intensidade máxima de $6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, a distribuição dos modelos é idêntica à reanálise.

Na Figura 10 está apresentada a distribuição do número de sistemas na região Pacífico Este. Em DJF e MAM (Figuras 10a–b, respetivamente), os modelos subestimam o número de sistemas com intensidades máximas inferiores a $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Em DJF, as diferenças são maiores em relação a MAM. O modelo EC-Earth subestima em cerca de 65% e o CCSM4 em cerca de 25%. O padrão de distribuição é semelhante entre JJA e SON (Figuras 10c–d, respetivamente), o modelo CCSM4 sobrestima em cerca de 30% e o modelo EC-Earth apresenta menos 30%, do número de tempestades com intensidades máximas inferiores a $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Os picos máximos das distribuições são semelhantes nas estações com exceção de MAM, onde este pico máximo é menor.

A distribuição na região Pacífico Oeste está representada na Figura 11. O padrão da distribuição é bastante semelhante entre o EC-Earth e a reanálise em todas as estações, figuras 11a–d. Em JJA, este modelo sobrestima o número de sistemas em cerca de 20%. O modelo CCSM4 apesar de apresentar um padrão similar à ERA-Interim, apresenta uma sobrestimação do número de tempestades em quase toda a distribuição em todas as estações

do ano, sendo as diferenças mais significativas em DJF (45%) e MAM (30%). Para intensidades máximas superiores a $6 \times 10^{-5} s^{-1}$, em JJA e SON, ambos os modelos apresentam um menor número de sistemas. Em DJF e MAM, a distribuição é idêntica entre modelos e reanálise.

Na Região Principal de Desenvolvimento do Atlântico (Figura 12), as distribuições do modelo CCSM4 e da reanálise são muito semelhantes, exceto revelando no pico máximo da distribuição uma sobrestimação em MAM de quase 100%. O modelo EC-Earth apresenta um padrão da distribuição idêntico ao da ERA-Interim em todas as estações, exceto em JJA, onde o número de tempestades com intensidades máximas inferiores a $4 \times 10^{-5} s^{-1}$ é inferior à reanálise, em cerca de 50%. Esta região apresenta um ciclo anual, com maior número de tempestades nos meses do Verão e do Outono. Em DJF e SON, as distribuições são bastante semelhantes entre modelos e reanálise. O modelo CCSM4 representa bastante bem a distribuição em JJA.

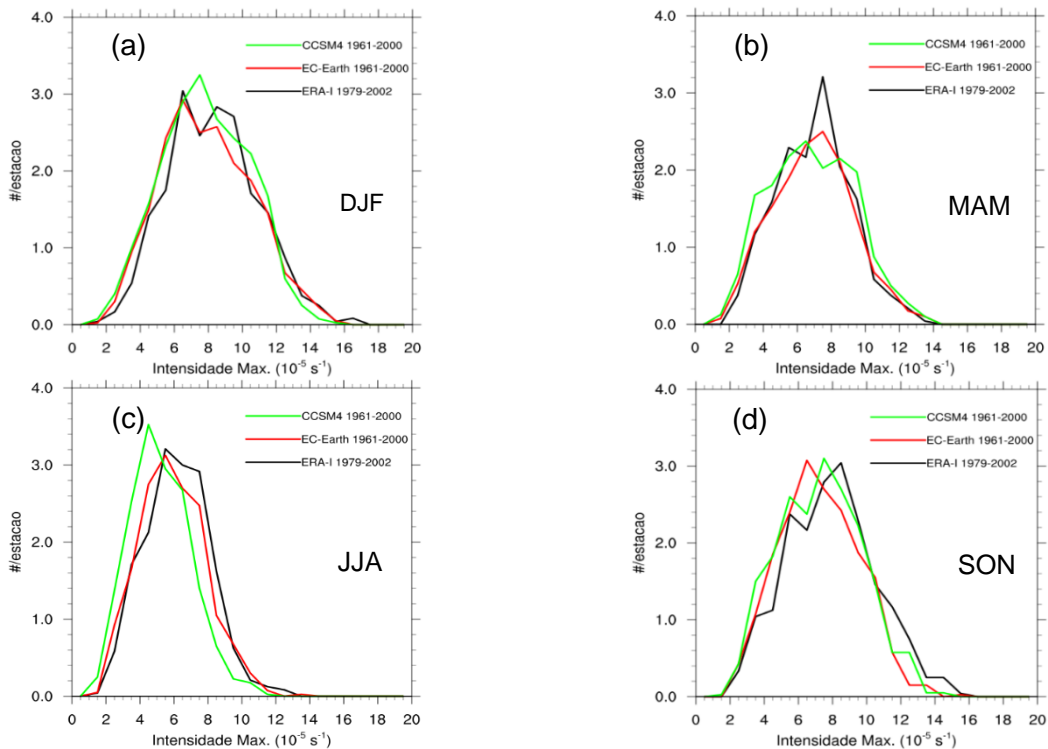


Figura 6 - Distribuição do número de tempestades ciclônicas por mês em função da sua intensidade máxima para a reanálise ERA-Interim e os dois modelos globais, EC-Earth e CCSM4, para a região Atlântico Este para cada estação: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.

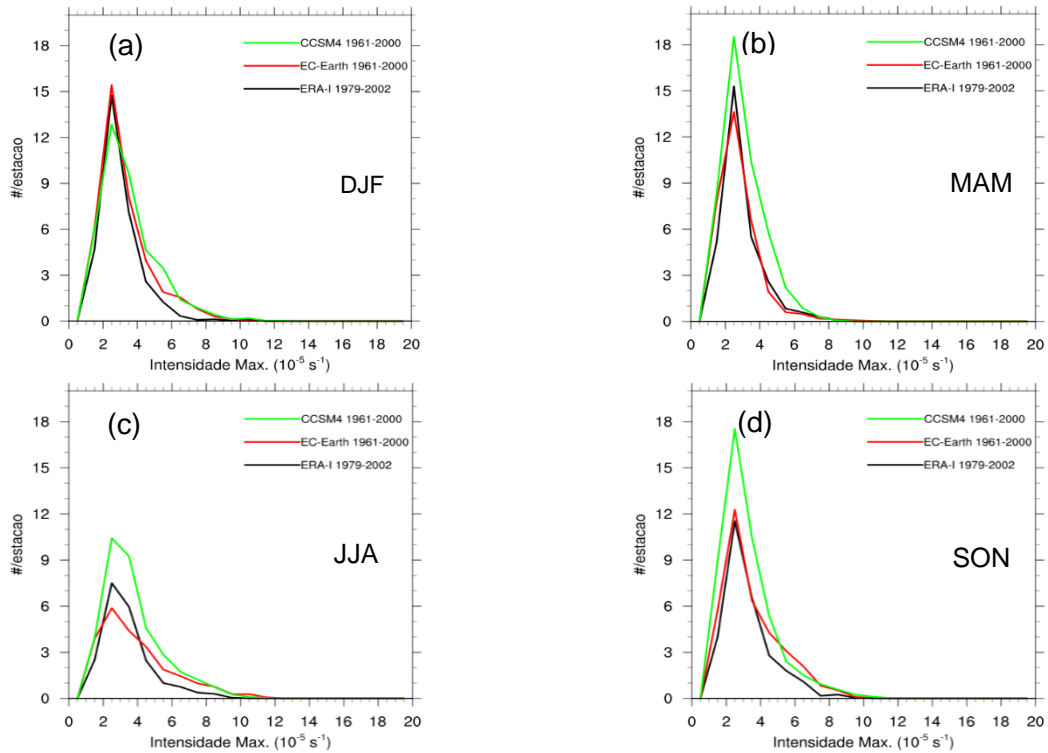


Figura 7 - Distribuição do número de tempestades ciclónicas por mês em função da sua intensidade máxima para a reanálise ERA-Interim e os dois modelos globais, EC-Earth e CCSM4, para a região da Índia para cada estação: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.

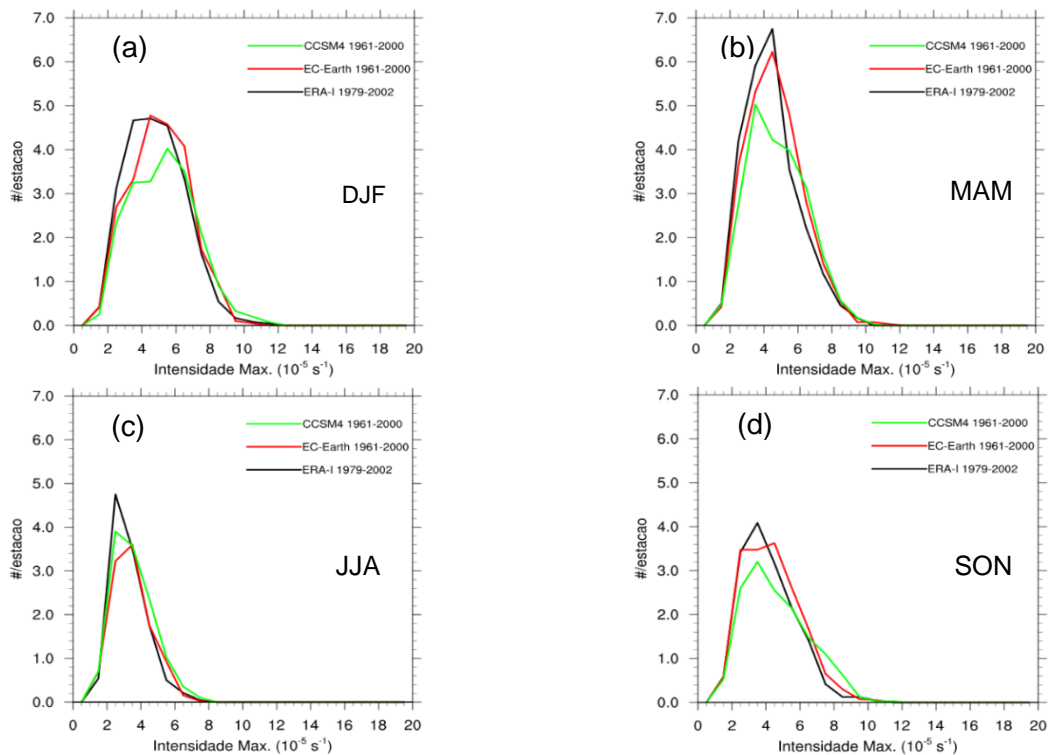


Figura 8 - Distribuição do número de tempestades ciclónicas por mês em função da sua intensidade máxima para a reanálise ERA-Interim e os dois modelos globais, EC-Earth e CCSM4, para a região do Mediterrâneo para cada estação: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.

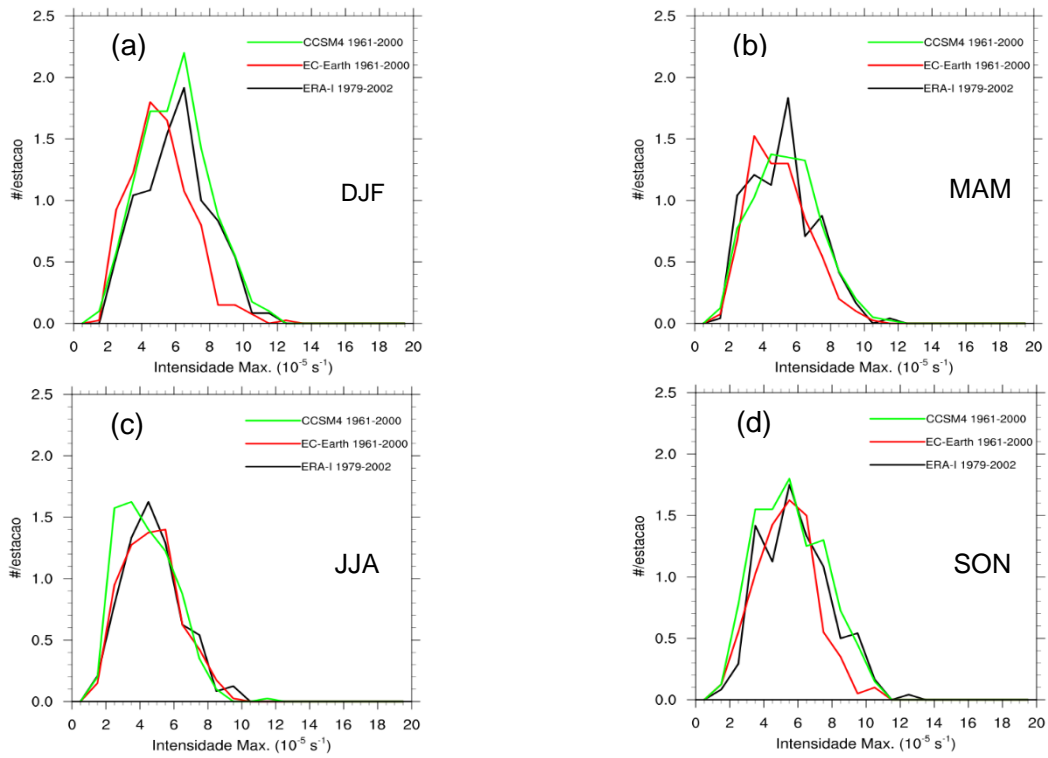


Figura 9 - Distribuição do número de tempestades ciclónicas por mês em função da sua intensidade máxima para a reanálise ERA-Interim e os dois modelos globais, EC-Earth e CCSM4, para a região do Norte da Europa para cada estação: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.

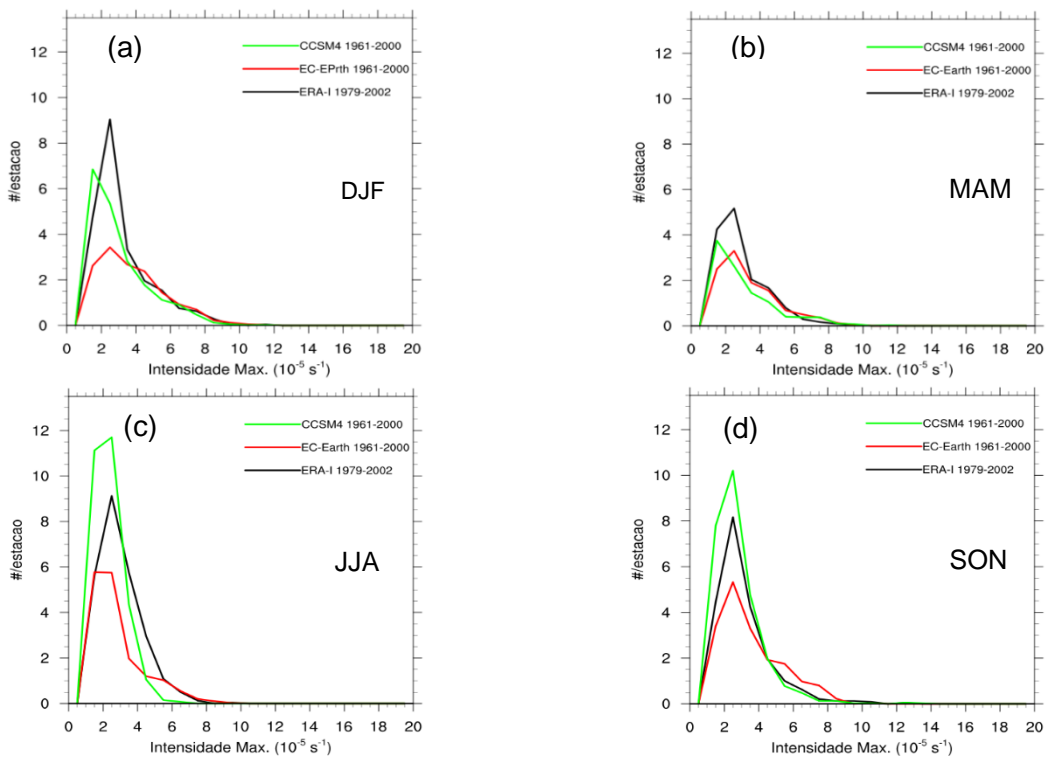


Figura 10 - Distribuição do número de tempestades ciclónicas por mês em função da sua intensidade máxima para a reanálise ERA-Interim e os dois modelos globais, EC-Earth e CCSM4, para a região do Pacífico Este para cada estação: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.

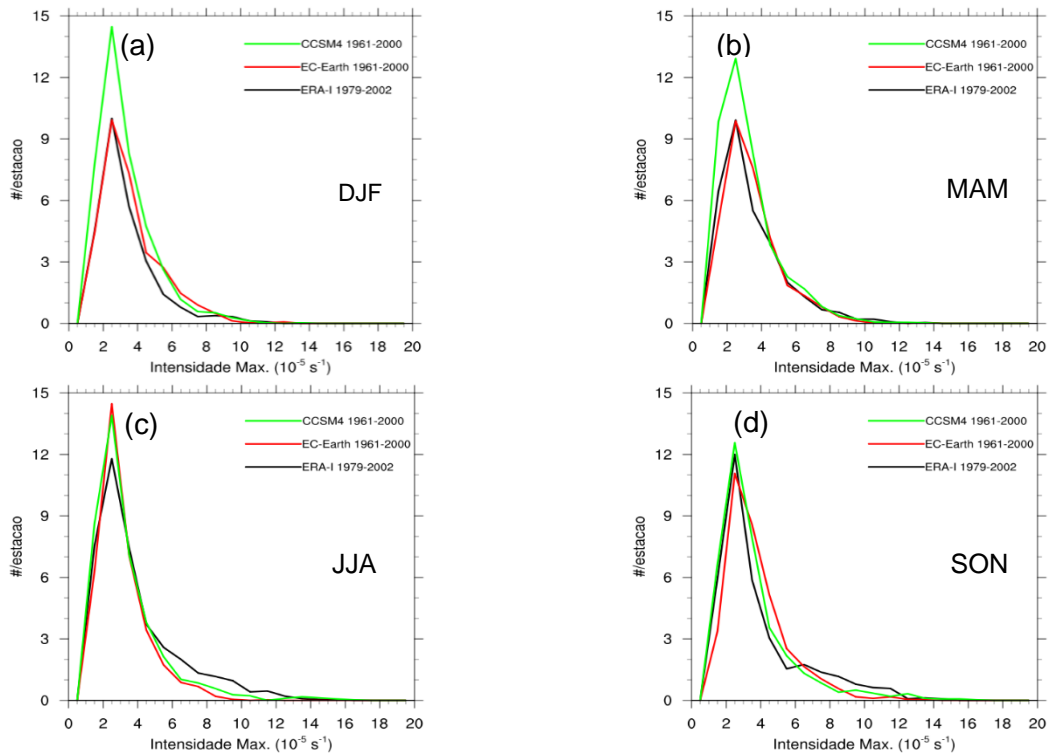


Figura 11 - Distribuição do número de tempestades ciclónicas por mês em função da sua intensidade máxima para a reanálise ERA-Interim e os dois modelos globais, EC-Earth e CCSM4, para a região do Pacífico Oeste para cada estação: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.

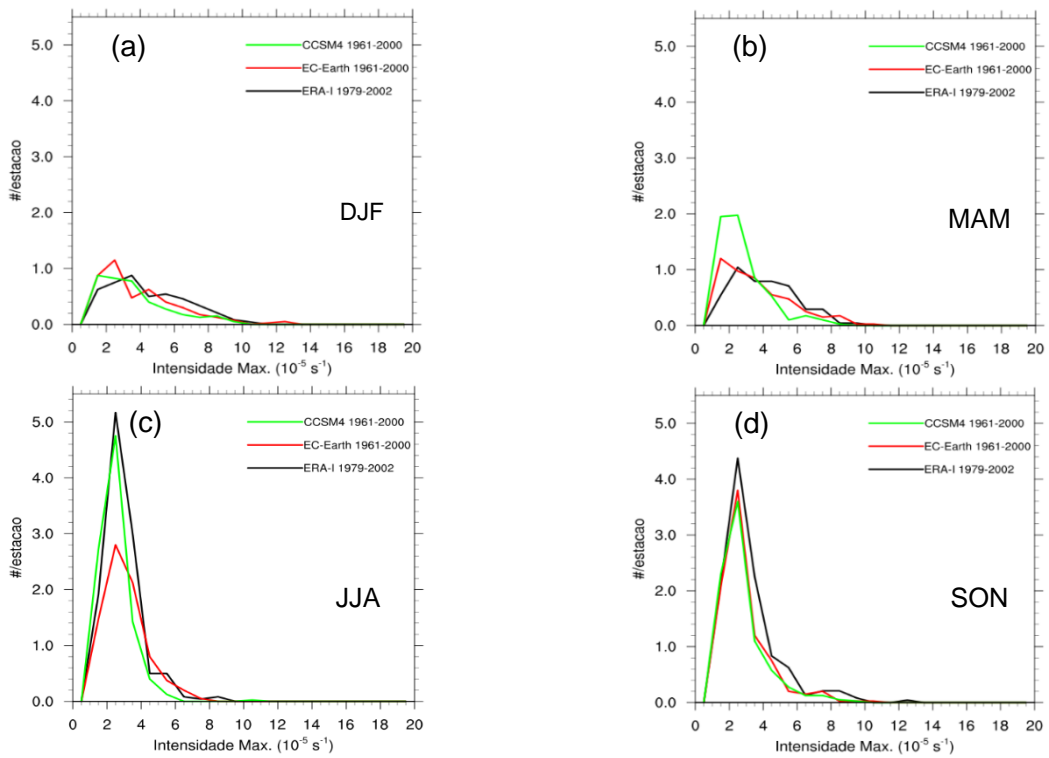


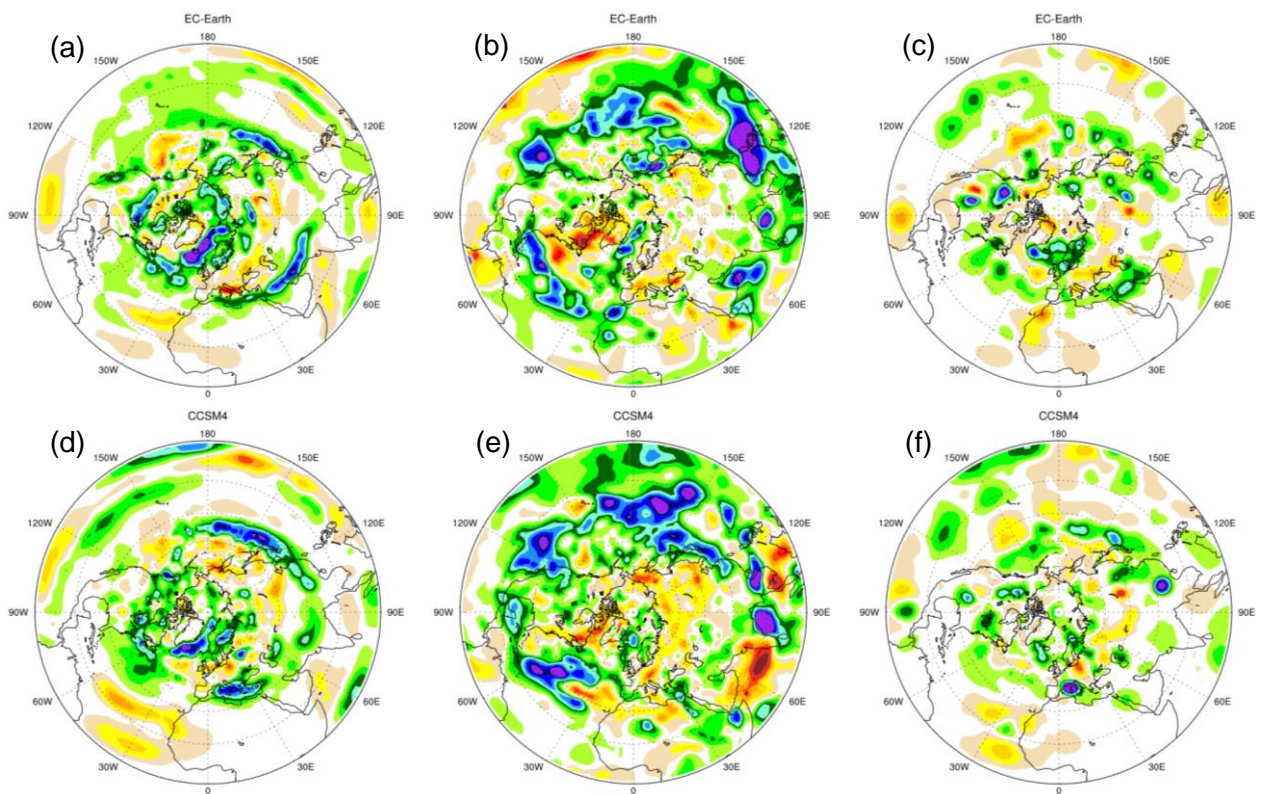
Figura 12 - Distribuição do número de tempestades ciclónicas por mês em função da sua intensidade máxima para a reanálise ERA-Interim e os dois modelos globais, EC-Earth e CCSM4, para a Região Principal de Desenvolvimento do Atlântico para cada estação: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.

De um modo geral, ambos os modelos globais em estudo são capazes de reproduzir as distribuições do número de sistemas por estação em função da sua intensidade máxima, para todas as estações. O modelo EC-Earth representa bastante bem as regiões do Mediterrâneo e da Índia. Porém, nas regiões tropicais este apresenta alguma dificuldade em descrever o padrão de distribuição. Existem algumas diferenças em certas regiões que são visíveis nos padrões espaciais da densidade de trajetória.

4.1.3 Impacto do Aquecimento Global

A validação dos dois modelos globais, a nível global e regional, e a caracterização dos ciclones extratropicais no clima presente foi apresentada nas duas secções anteriores. Nesta secção é apresentada uma caracterização dos ciclones extratropicais, para um clima futuro, resultados dos dois modelos globais EC-Earth e CCSM4, ambos para o período 2061-2100 (21C), no cenário RCP8.5. Os resultados obtidos são comparados com a simulação de controlo dos mesmos modelos, para o período 1961-2000 (20C), de forma a avaliar o impacto do aquecimento global nos ciclones extratropicais.

Nas Figuras 13, 15, 17 e 19 encontram-se representadas as diferenças: na densidade de trajetória (esquerda); na intensidade média (meio); e na densidade de ciclogénese (direita), dos sistemas ciclónicos em DJF, MAM, JJA e SON, respetivamente, no HN, para os dois modelos globais, EC-Earth (em cima) e CCSM4 (em baixo), entre os períodos 21C e 20C. Nas figuras 14, 16, 18 e 20 encontram-se representados os padrões médios das estatísticas espaciais para um clima futuro em DJF, MAM, JJA e SON, respetivamente, no NH, para os dois modelos globais, EC-Earth (em cima) e CCSM4 (em baixo).



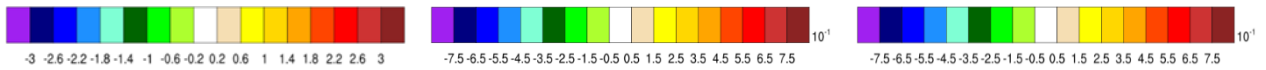


Figura 13 - Diferenças das estatísticas espaciais para o Inverno do Hemisfério Norte (DJF) entre os períodos 21C (2061-2100) e 20C (1961-2000) para os modelos EC-Earth e CCSM4: (a, d) densidade de trajetória, (b, e) intensidade média e (c, f) densidade de ciclogénese do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente. A anomalia da intensidade média está em unidades de $10^{-5} s^{-1}$.

Na anomalia da densidade de trajetória, em ambos os modelos (Figuras 13a e 13d) existe uma diminuição da densidade de trajetória das tempestades nas regiões de maior densidade no presente, em ambas as bacias oceânicas (Oceanos Atlântico e Pacífico Norte). Esta diminuição é visível comparando as Figuras 1a e 1d com 14a e 14d, respetivamente. Na região Este da Gronelândia, o número de sistemas diminui em ambos os modelos, ocorrendo em média menos 3 tempestades por mês. Na região da Sibéria e Escandinávia, existe uma redução de cerca de 1 tempestade por mês, que é notória nos dois modelos. Sobre as Ilhas Britânicas existe um ligeiro aumento na densidade de trajetória de aproximadamente 1 tempestade por mês no modelo CCSM4, ao passo que no modelo EC-Earth este aumento é mais reduzido, ocorrendo principalmente na região sul destas Ilhas. Sobre o Mar Mediterrâneo, o modelo CCSM4 mostra uma redução na densidade de cerca de 2 tempestades por mês. Nesta mesma região, o modelo EC-Earth apresenta uma redução na zona sul, em média menos 1 tempestade por mês, e um aumento médio de sensivelmente 2 sistemas por mês, na região norte. Contudo há uma diminuição do número desses sistemas quando nos aproximamos das regiões do Médio Oriente (Figuras 13a e 13d), visível em ambos os modelos. No Mar Mediterrâneo, os dois modelos não estão portanto em concordância. A anomalia da intensidade média (Figuras 13b e 13e) sobre o Atlântico Norte e Nordeste do Pacífico mostra um enfraquecimento das tempestades em ambos os modelos, que poderá resultar da redução na densidade de trajetória que ocorre nestas duas regiões. Sobre a região da Europa Central, existe um aumento na intensidade média dos sistemas. O aumento na intensidade média dos sistemas nesta região pode também estar relacionado com o aumento da densidade de sistemas na região. Comparando os padrões médios do modelo EC-Earth nas Figuras 1 e 14 (presente e futuro, respetivamente), observa-se o aumento da densidade na Europa Central. Sobre a região do Mediterrâneo existe um ligeiro enfraquecimento dos sistemas na região Este, mais pronunciada no modelo CCSM4, de cerca de $0.5 \times 10^{-5} s^{-1}$. Sobre a região central deste Mar, os modelos apresentam sinais contrários, o EC-Earth mostra um enfraquecimento enquanto o CCSM4 mostra um aumento na intensidade média de $|1.5| \times 10^{-5} s^{-1}$. Sobre os Estados Unidos, na zona do Novo México, existe uma diminuição na densidade de ciclogénese, visível em ambos os modelos, nas Figuras 13c e 13f, e comparando as Figuras do presente e futuro, 1 e 14, respetivamente. Nas Montanhas Rochosas Canadianas existe uma redução da ocorrência do processo de ciclogénese, sendo esta redução mais evidente no modelo EC-Earth, de aproximadamente menos 0.75 tempestades que se formam em média por mês.

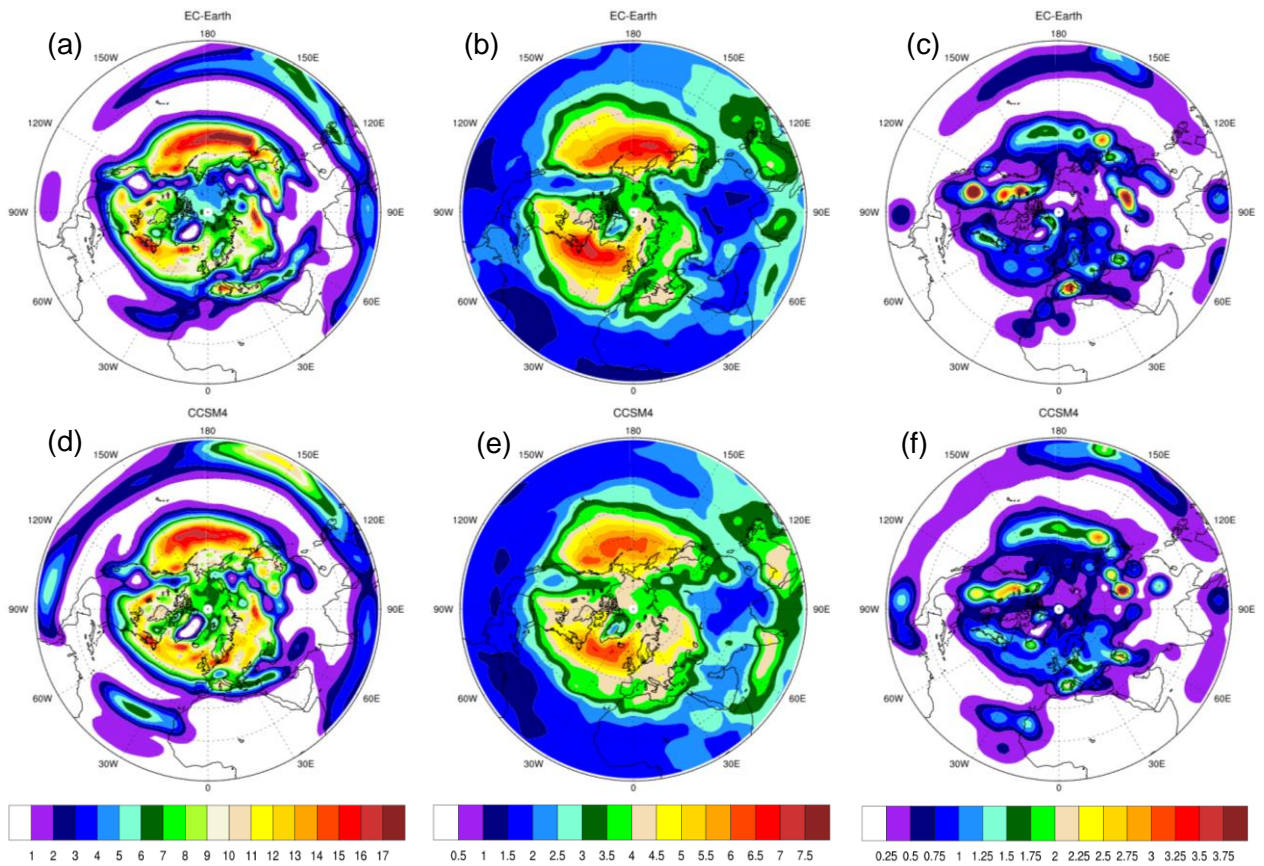


Figura 14 - Estatísticas espaciais para o Inverno do Hemisfério Norte (DJF) para EC-Earth e CCSM4 (2061-2100): (a, d) densidade de trajetória, (b, e) intensidade média e (c, f) densidade de ciclogénese do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente. A intensidade média está em unidades de $10^{-5}s^{-1}$.

Na região extratropical do HN, sobre as duas bacias oceânicas (Oceano Atlântico e Pacífico) existe uma diminuição da densidade do número de ciclones nas latitudes extratropicais, em concordância com os resultados obtidos por Bengtsson et al. (2006) e Geng et al. (2003). Em DJF, na região Oeste da Europa, a anomalia da densidade de trajetória é positiva, o que indica um aumento no número de ciclones nesta região, num cenário de alterações climáticas, em concordância com diversos estudos (e.g. Geng et al., 2003; Pinto et al., 2007; Ulbrich et al., 2008). Segundo Bengtsson et al. (2009), este aumento pode estar relacionado com um aumento do gradiente da temperatura da superfície do mar entre os 40° e os $50^{\circ}N$, na região central do Atlântico, implicando um aumento na baroclinicidade. Na região Oeste do Atlântico Norte existe uma redução do número de tempestades e da sua intensidade média (Colle et al., 2012).

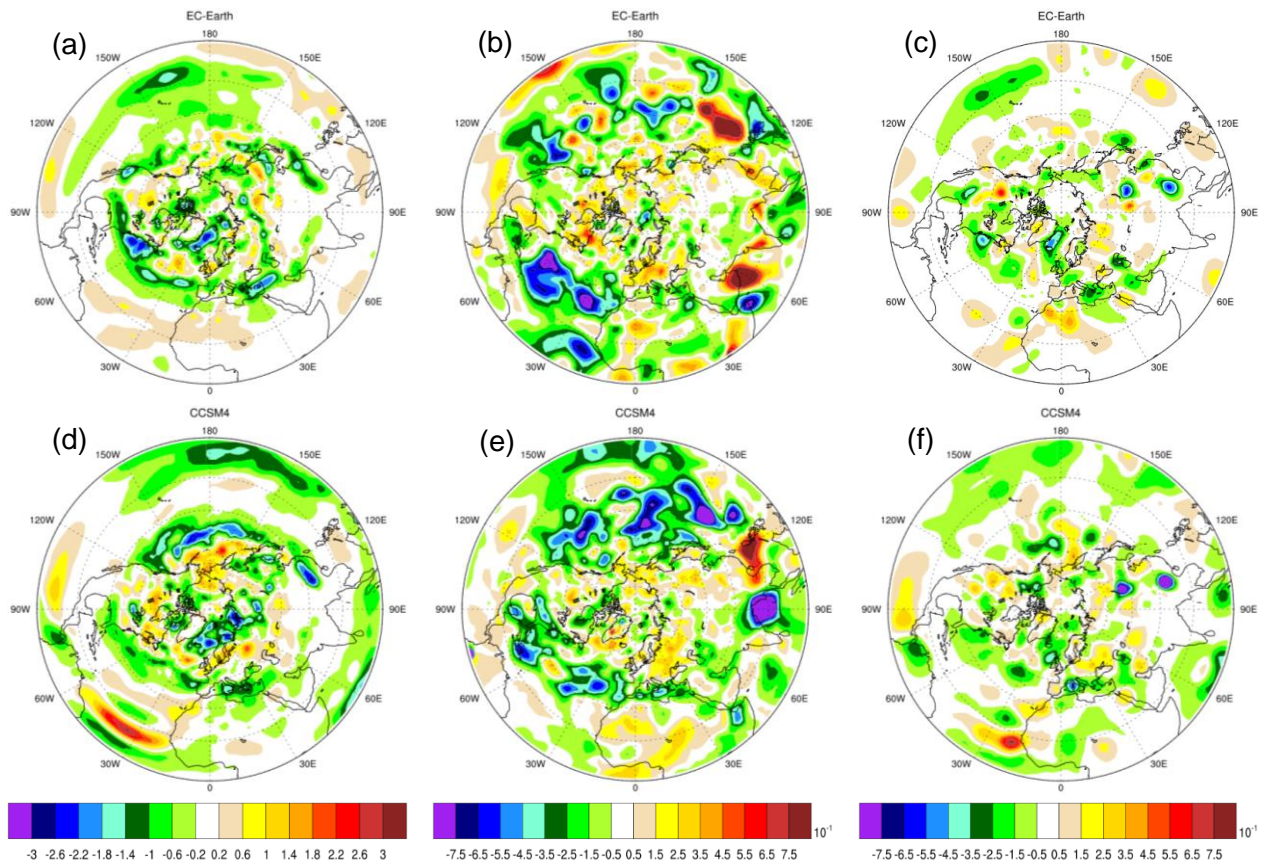


Figura 15 - Diferenças das estatísticas espaciais para a Primavera do Hemisfério Norte (MAM) entre os períodos 21C (2061-2100) e 20C (1961-2000) para os modelos EC-Earth e CCSM4: (a, d) densidade de trajetória, (b, e) intensidade média e (c, f) densidade de ciclogênese do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente. A anomalia da intensidade média está em unidades de $10^{-5} s^{-1}$.

Na Figura 15 estão representadas as anomalias para MAM dos dois modelos. Existe uma redução do número de sistemas a Este da Gronelândia de sensivelmente menos 2 tempestades por mês, apesar da existência de um pequeno aumento na intensidade média de $+2.5 \times 10^{-5} s^{-1}$ na região sudoeste (Figuras 15a–b e 15d–e). Sobre as Ilhas Britânicas a densidade aumenta em média cerca de 1.5 tempestades por mês, sendo visível em ambos os modelos (Figuras 15a e 15d). Tal como em DJF, é visível uma diminuição na densidade de trajetória no Atlântico Norte e Pacífico Nordeste, nos dois modelos. Sobre o Mediterrâneo, o número de tempestades diminui (menos 1 tempestade por mês), bem como a sua intensidade média que apresenta uma redução de cerca de 25%, em ambos os modelos. Na costa leste dos Estados Unidos, os modelos mostram sinais contrários, o número de tempestades diminui em média 2 tempestades por mês no modelo EC-Earth, enquanto no modelo CCSM4 aumento em média 1 tempestade por mês. Sobre a costa nordeste da América do Norte, a intensidade média das tempestades aumenta aproximadamente 15%, em ambos os modelos. Na costa leste dos EUA, o modelo CCSM4 mostra uma redução na intensidade média dos sistemas de $-2.5 \times 10^{-5} s^{-1}$, não tão evidente no modelo EC-Earth. Sobre as encostas orientais do Tibete, existe uma deslocação Este-Oeste do processo de ciclogênese, e no Sul da China formam-se em média menos 0.7 tempestades por mês (Figuras 15c e 15f). Sobre o Mediterrâneo, este processo de formação de sistemas também diminui, sendo mais evidente no CCSM4 (menos

0.6 tempestades que se formam por mês). A diminuição do número de tempestades na região do Mediterrâneo pode estar relacionada com a redução da geração das mesmas.

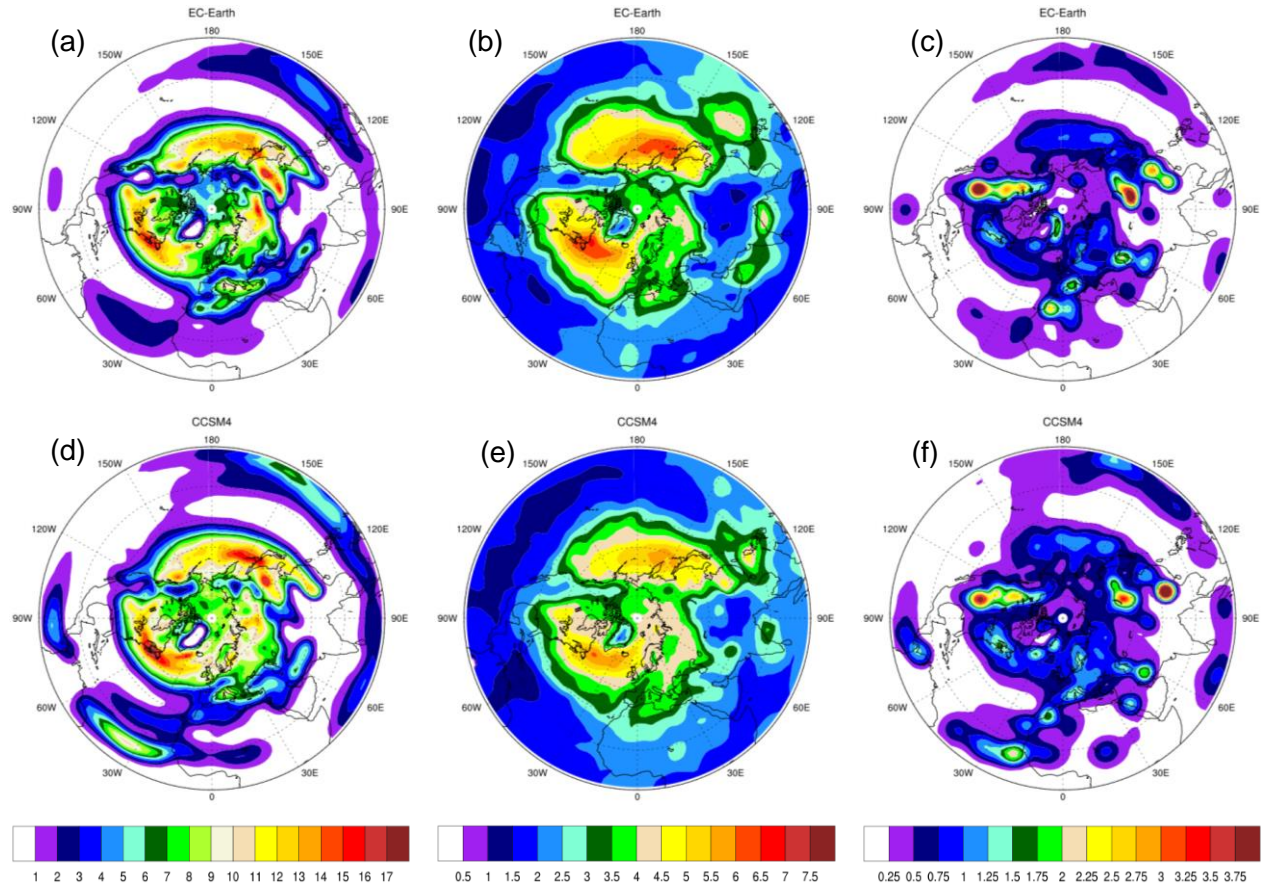


Figura 16 - Estatísticas espaciais para a Primavera do Hemisfério Norte (MAM) para EC-Earth e CCSM4 (2061-2100): (a, d) densidade de trajetória, (b, e) intensidade média e (c, f) densidade de ciclogénese do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente. A intensidade média está em unidades de $10^{-5} s^{-1}$.

Em JJA (Figura 17), na região a sudeste da Gronelândia, existe um aumento significativo do número de sistemas de entre 2 a 3 por mês. Em ambos os modelos, é visível um ligeiro deslocamento dos ciclones no Pacífico Noroeste na direção do polo e no Atlântico Norte para nordeste no sentido do polo (comparando os padrões médios do presente e futuro, Figuras 3 e 18, respetivamente). Este pequeno deslocamento dos ciclones na direção dos pólos, com um ligeiro desvio para Este no Atlântico Norte, está em concordância com alguns estudos, e.g. Bengtsson et al. (2006), Ulbrich et al. (2009), Yin (2005). Sobre a Europa e Norte do continente Asiático (Figuras 17a e 17d), existe uma redução significativa do número de tempestades, entre menos 1 a 2 tempestades que ocorrem por mês, visível em ambos os modelos. Esta redução é mais evidente sobre a região da Sibéria e Ilhas Britânicas, de sensivelmente menos 3 no EC-Earth e de menos 1.5 no CCSM4. O modelo EC-Earth mostra uma redução significativa do número de sistemas (~ -3 tempestades) na região Este da América do Norte, enquanto o modelo CCSM4 mostra um pequeno aumento nessa mesma região ($\sim +1.5$ tempestades). Apesar das diferenças na densidade de trajetória serem mínimas sobre a Índia, no modelo EC-Earth existe um aumento significativo na intensidade média, $+0.75 \times 10^{-5} s^{-1}$, sobre todo o país (Figura 17b), que no CCSM4 aparece como um dipolo de aumento a Norte e

diminuição a Sul (Figura 17e). Este aumento da intensidade média sobre a Índia poderá indicar uma intensificação das monções nesta região. Sobre a região Este do Oceano Pacífico, na área centrada entre os 0° e $30^{\circ}N$, existe uma deslocação dos sistemas na direcção do equador (Figuras 17a e 17c) associada a um incremento da densidade nesta região. No Atlântico Norte, na mesma faixa latitudinal, a transição das tempestades tem uma direcção oposta, ainda que mais ligeiramente. Sobre o Mar Mediterrâneo e a Europa Ocidental existe uma redução na intensidade média dos sistemas, bem como na costa leste dos Estados Unidos, de aproximadamente menos $2.5 \times 10^{-5} s^{-1}$. Nas encostas orientais do Tibete e sobre as Montanhas Rochosas existe uma diminuição na densidade de ciclogénese. No Pacífico, a Sul América Central existe um aumento significativo na geração de sistemas, o que pode explicar o aumento na densidade de trajetória nessa região.

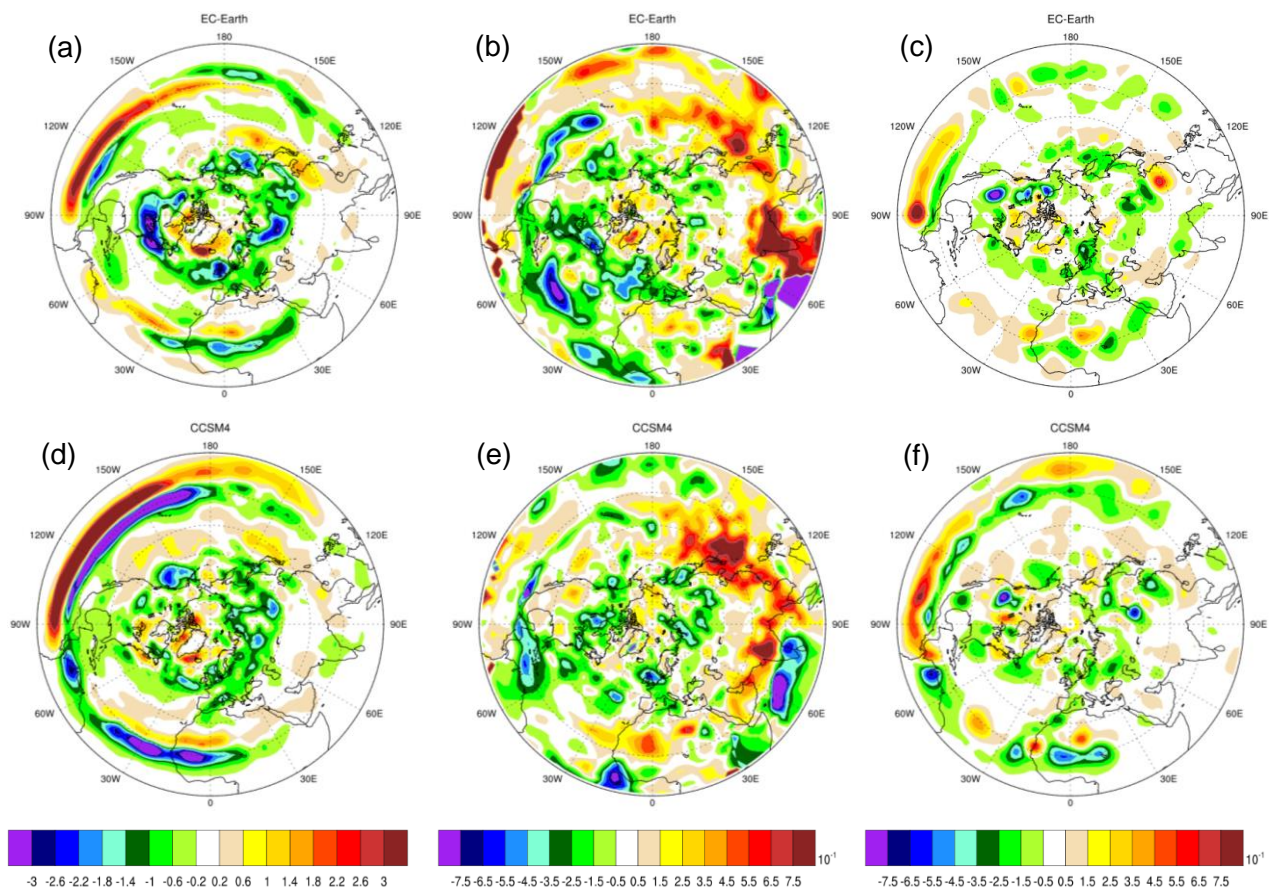


Figura 17 - Diferença das estatísticas espaciais para o Verão do Hemisfério Norte (JJA) entre os períodos 21C (2061-2100) e 20C (1961-2000) para os modelos EC-Earth e CCSM4: (a, d) densidade de trajetória, (b, e) intensidade média e (c, f) densidade de ciclogénese do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente. A anomalia da intensidade média está em unidades de $10^{-5} s^{-1}$.

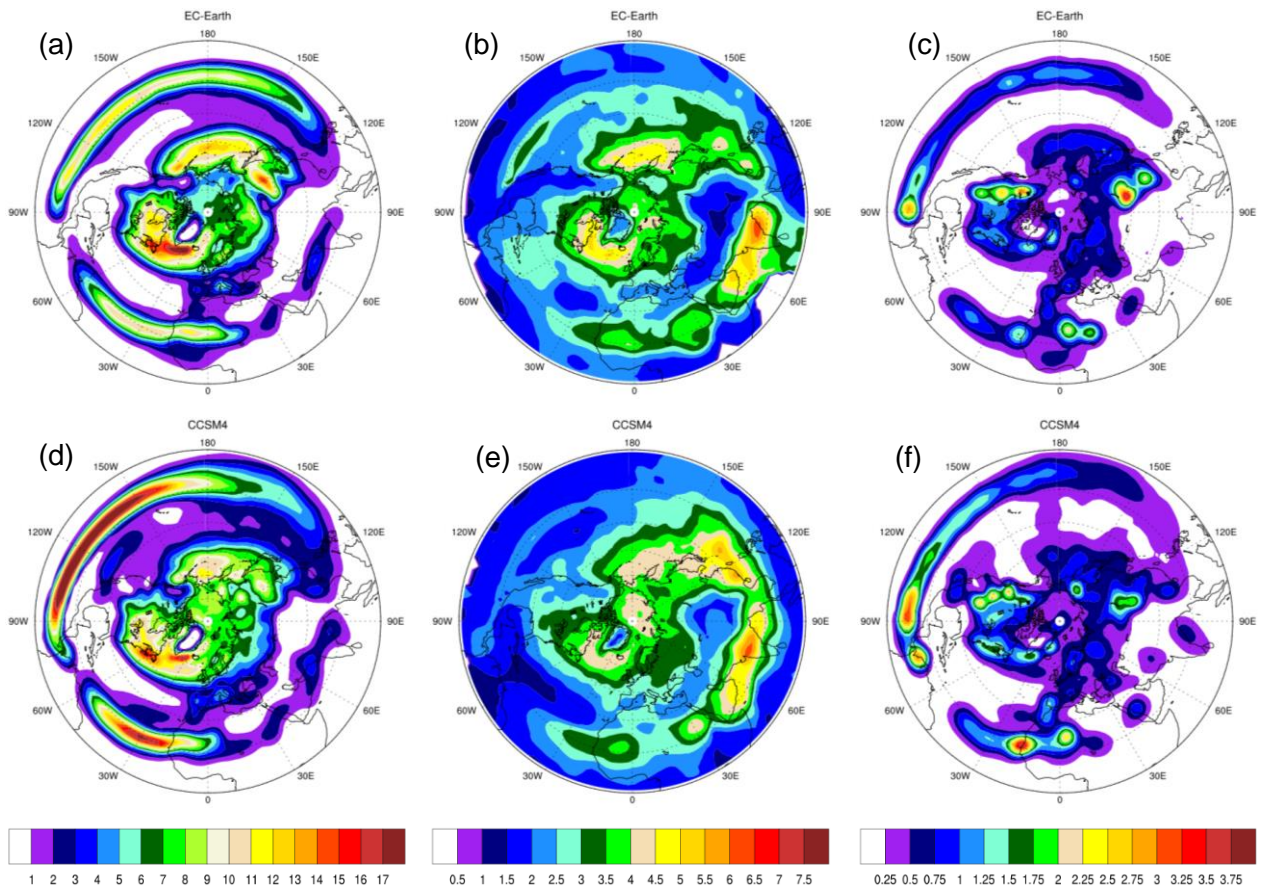


Figura 18 - Estatísticas espaciais para o Verão do Hemisfério Norte (JJA) para EC-Earth e CCSM4 (2061-2100): (a, d) densidade de trajetória, (b, e) intensidade média e (c, f) densidade de ciclogénese do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente. A intensidade média está em unidades de $10^{-5} s^{-1}$.

Em SON (Figura 19), em ambos os modelos, existe uma redução significativa no número de sistemas, em média menos 2.5 tempestades sobre a região Este da América do Norte, que se estende ao longo do Atlântico e Norte da Europa, e por consequência, uma diminuição na intensidade média de cerca de $3 \times 10^{-5} s^{-1}$, sendo mais pronunciada no modelo CCSM4. Sobre o Pacífico Nordeste, existe uma redução do número de tempestades entre 1 a 2 por mês, bem como das suas intensidades médias (Figuras 19c e 19f). Sobre o Mar Mediterrâneo e o Japão, a redução do número de tempestades (em média -1.4) e, por sua vez da intensidade média ($\sim -1.5 \times 10^{-5} s^{-1}$), é também significativa. Estas anomalias são visíveis aquando da comparação dos padrões médios da densidade de trajetória e da intensidade média do clima presente e futuro (Figuras 4 e 20). O padrão da anomalia da densidade de trajetória e de ciclogénese, (Figuras 19a, 19d, 19c e 19f), sobre os dois oceanos (Atlântico e Pacífico) é semelhante ao de JJA na região Este do Oceano Pacífico, mas menos pronunciado. Na região Noroeste da Índia existe um aumento na intensidade média dos sistemas de cerca de 25%. Sobre o Mediterrâneo existe uma diminuição na ciclogénese, sendo mais evidente no modelo EC-Earth (menos 0.75 tempestades a formarem-se por mês).

As alterações nas trajetórias das tempestades tropicais são consistentes com as alterações das temperaturas da superfície do mar na região tropical, e em particular com um grande aquecimento na região tropical do Pacífico Este. Segundo Bengtsson et al. (2006) este fator

significa que as alterações nas trajetórias dos ciclones tropicais são semelhantes com o que acontece durante um evento de El Niño, incluindo o enfraquecimento dos ciclones tropicais no Atlântico e um deslocamento na direção do equador dos ciclones no Pacífico Este. Este deslocamento na região tropical do Pacífico Este é visível no parâmetro da densidade de trajetória nas Figuras 17 e 19.

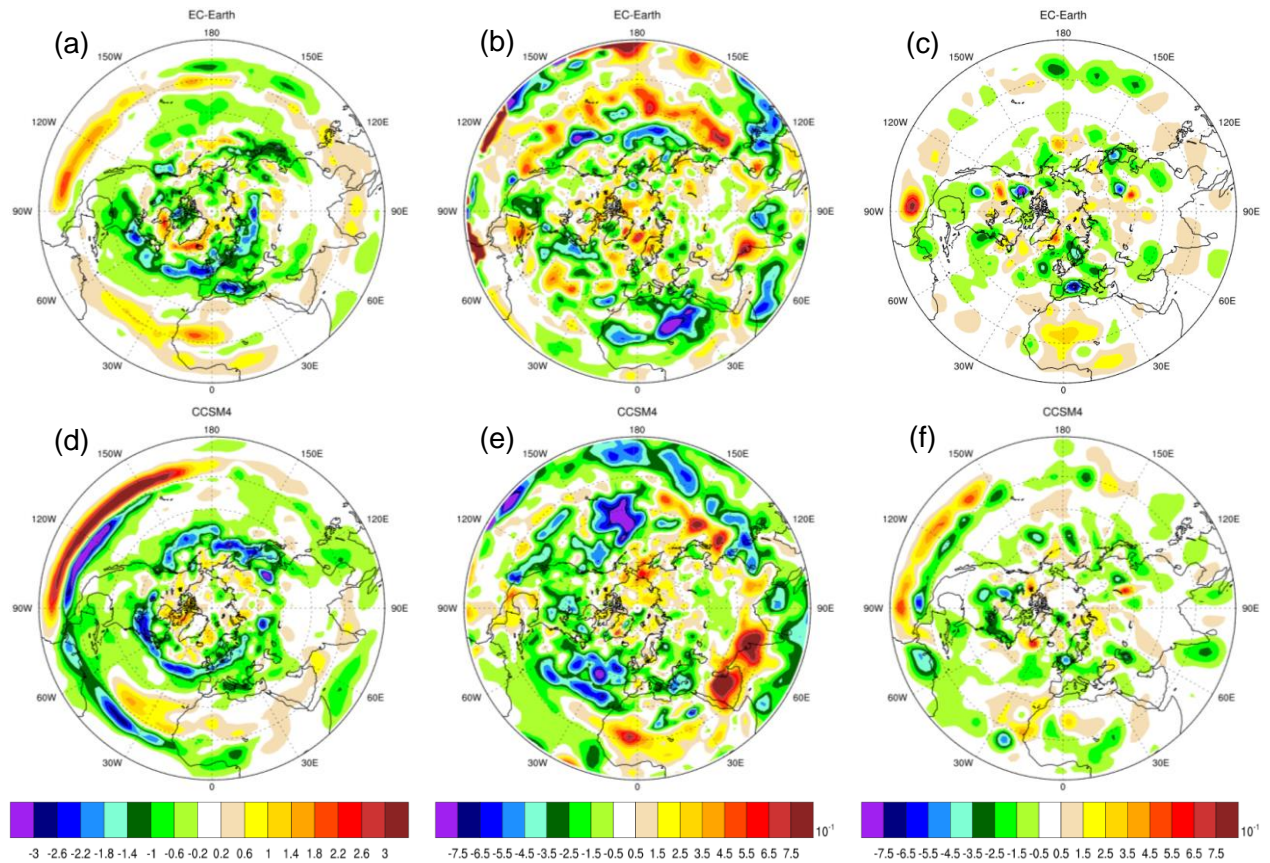


Figura 19 - Diferenças das estatísticas espaciais para o Outono do Hemisfério Norte (SON) entre os períodos 21C (2061-2100) e 20C (1961-2000) para os modelos EC-Earth e CCSM4: (a, d) densidade de trajetória, (b, e) intensidade média e (c, f) densidade de ciclogénese do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente. A anomalia da intensidade média está em unidades de $10^{-5} s^{-1}$.

Na Figura 21 está representada a distribuição do número de tempestades por mês em função da sua intensidade máxima para os dois modelos globais, nos dois períodos analisados, 20C (1961–2000) e 21C (2061–2100), para DJF, MAM, JJA e SON. A distribuição é bastante semelhante entre os períodos para o modelo EC-Earth. O modelo CCSM4 mostra uma ligeira diminuição do número de tempestades com intensidades máximas entre 4 a $7 \times 10^{-5} s^{-1}$ de cerca de 15%, em DJF (Figura 21a). Em MAM (Figura 21b), o modelo CCSM4 apresenta uma diminuição do número de tempestades ao longo de toda a distribuição, sendo que entre as intensidades máximas 4 a $8 \times 10^{-5} s^{-1}$, a redução é de aproximadamente 30%. O número de tempestades com intensidades intermédias apresenta uma ligeira redução no modelo EC-Earth de cerca de 10%. Durante JJA (Figura 21c), o padrão da distribuição é idêntico no modelo CCSM4, não evidenciando diferenças significativas entre os dois períodos. Nesta estação do ano, o modelo EC-Earth mostra uma diminuição de sensivelmente 25% dos sistemas de intensidade máxima intermédia (Figura 21c). Em SON (Figura 21d), o modelo CCSM4

apresenta um padrão semelhante ao de MAM, com uma redução ao longo de toda a distribuição, sendo que a diminuição é de cerca de 30% nos sistemas com intensidades máximas intermédias. Nesta estação, o modelo EC-Earth apresenta uma redução de aproximadamente 15% dos sistemas de intensidades máximas intermédias. Em DJF e JJA, não é evidente um aumento do número de tempestades mais intensas, ao passo que em MAM e SON é evidente uma diminuição no CCSM4 na cauda de cerca de 35%.

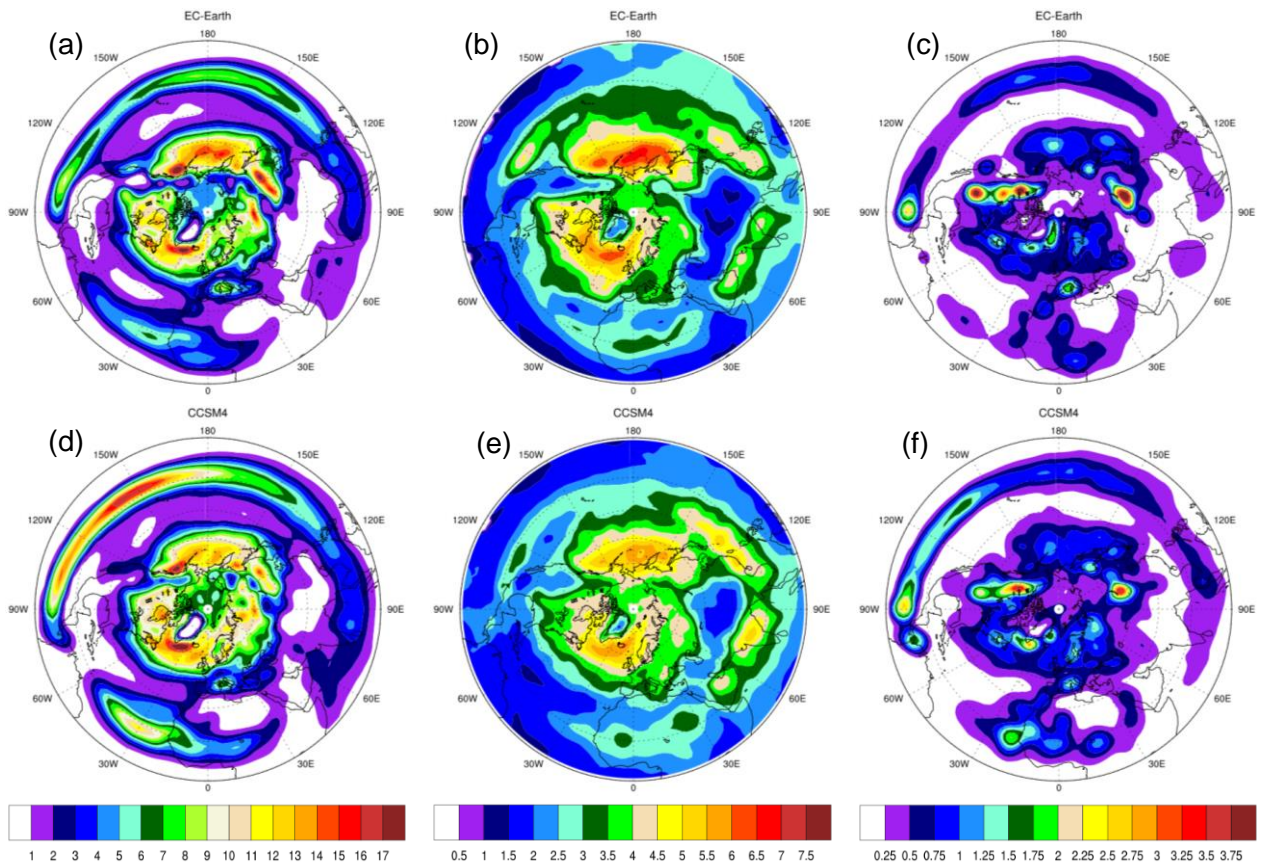


Figura 20 - Estatísticas espaciais para o Outono do Hemisfério Norte (SON) para EC-Earth e CCSM4 (2061-2100): (a, d) densidade de trajetória, (b, e) intensidade média e (c, f) densidade de ciclogénese do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente. A intensidade média está em unidades de $10^{-5} s^{-1}$.

Na Tabela 4 encontra-se sumariado o número total de ciclones extratropicais que ocorreram, em média, nas quatro estações de acordo com a reanálise ERA-Interim e com as simulações dos dois modelos globais para o clima presente e futuro. Em geral, observa-se uma pequena redução do número de tempestades em todas as estações do ano no clima futuro. Na Tabela 5 encontra-se o número de ciclones extratropicais que atingiram um valor de intensidade superior a $8 \times 10^{-5} s^{-1}$. Relativamente aos sistemas mais intensos, observa-se uma redução em todas as estações, exceto em JJA, em que ambos os modelos apontam para um aumento, consistente com Geng et al. (2003), que é de cerca de 10% no CCSM4 e de 4% no EC-Earth. Sobre condições de alterações climáticas, o número de ciclones durante o Inverno apresenta uma redução a nível global (Tabela 4), no entanto em determinadas regiões, tais como as Ilhas Britânicas (Figura 13), o número de sistemas aumenta, em ambos os modelos em concordância com diversos estudos (e.g. Geng et al., 2003; Bengtsson et al., 2006; Leckebush et al., 2004; Pinto et al., 2007; Ulbrich et al., 2008; Ulbrich et al., 2009).

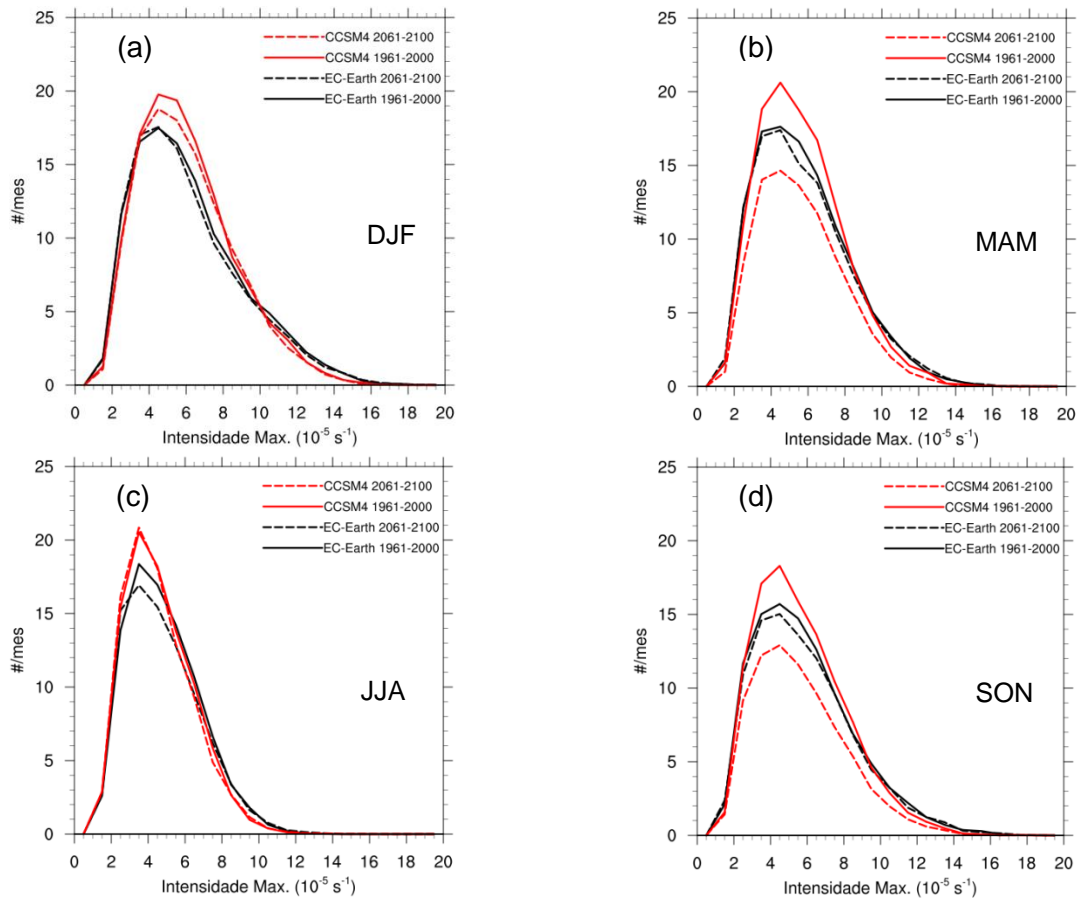


Figura 21 - Distribuição do número de tempestades ciclónicas por mês em função da sua intensidade máxima nos períodos 20C (—) e 21C (---) para os dois modelos globais, EC-Earth (preto) e CCSM4 (vermelho), para o HN, para cada estação, entre os 30° e 90°N: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON. A intensidade máxima está em unidades de $10^{-5} s^{-1}$.

Na Figura 22 está representada a distribuição do número de tempestades por estação em função da sua intensidade máxima para a região Atlântico Este. O modelo EC-Earth apresenta uma redução do número de sistemas de intensidade máxima intermédia em todas as estações, em especial em MAM e SON, na região Atlântico Este de cerca de 30%. Contrariamente ao que ocorre no EC-Earth, no modelo CCSM4, o número de tempestades aumenta em cerca de 15%, na Primavera, e em SON, existe um aumento em relação ao primeiro máximo relativo diverso e uma diminuição em relação ao segundo. Ambos os modelos apresentam uma redução do número de sistemas em DJF para intensidades máximas intermédias de cerca de 20%.

Na região da Índia (Figura 23), não existem alterações significativas no número de sistemas, em DJF, mas existe uma redução significativa em MAM, que é de cerca de 35% no modelo EC-Earth e de 15% no CCSM4. O padrão de distribuição é idêntico, para ambos os modelos, em JJA e SON, uma vez que o modelo EC-Earth indica uma redução no número de sistemas, ao passo que o modelo CCSM4 indica um aumento. Em JJA, o modelo CCSM4 mostra um pequeno aumento para intensidade máximas inferiores a $3 \times 10^{-5} s^{-1}$ e uma diminuição nas intensidades máximas intermédias, ao passo que o modelo EC-Earth aponta para uma redução

nessas intensidades máximas. Em SON, o comportamento do CCSM4 é bastante idêntico, sendo a redução no EC-Earth de sensivelmente 30%.

Tabela 4 – Média do número de tempestades por estação para as latitudes extratropicais no HN.

	EC-Earth			CCSM4			ERA-Interim
	20C	21C		20C	21C		1979 – 2002
DJF	366.25	352.35	-3.80%	377.88	361.03	-4.67%	393.83
MAM	349.28	336.73	-3.59%	367.55	354.98	-3.42%	369.38
JJA	280.40	265.90	-5.17%	287.60	283.73	-1.35%	306.92
SON	318.93	302.40	-5.18%	333.15	317.63	-4.66%	340.75

Tabela 5 - Média do número de tempestades por estação para as latitudes extratropicais no HN, para tempestades que excedem um valor de intensidade $> 8.0 \times 10^{-5} s^{-1}$.

	EC-Earth			CCSM4			ERA-Interim
	20C	21C		20C	21C		1979 – 2002
DJF	82.70	77.83	-5.89%	76.28	75.90	-0.50%	86.83
MAM	60.48	60.05	-0.71%	54.15	53.48	-1.24%	66.38
JJA	18.20	18.90	3.85%	12.85	14.10	9.73%	25.75
SON	59.93	57.88	-3.42%	55.43	51.53	-7.04%	69.67

A região do Mediterrâneo (Figura 24) mostra uma redução no número de tempestades com intensidade máxima superior que $2 \times 10^{-5} s^{-1}$, exceto em JJA. Em DJF, existe uma diminuição do número de sistemas com intensidades máximas entre os valores 2 a $8 \times 10^{-5} s^{-1}$, em ambos os modelos, sendo mais pronunciada no CCSM4, cerca de 25%. Em MAM, também é visível uma redução nos dois modelos, que é sensivelmente de 30% no EC-Earth e de 20% no CCSM4. Em JJA, a distribuição do modelo CCSM4 é bastante semelhante entre presente e futuro, excetuando entre os valores de intensidade máxima 2 a $4 \times 10^{-5} s^{-1}$, onde existe um aumento de quase 10%. No modelo EC-Earth, existe um desvio para menores valores da intensidade máxima e um aumento desse número máximo de sistemas. No Outono, as distribuições são idênticas às obtidas em MAM, com uma redução do número de sistemas ao longo de toda a distribuição e em ambos os modelos. No modelo EC-Earth, a diminuição é de aproximadamente 30% e no CCSM4 é de 15%. Bengtsson et al. (2006) sugere que o enfraquecimento dos ciclones sobre o Mediterrâneo possa estar associado a alterações de larga escala.

Na região do Norte da Europa (Figura 25), as diferenças entre o presente e o futuro não são muito significativas em ambos os modelos. Existem porém, dois aspetos que se podem salientar. Por um lado, o modelo EC-Earth apresenta uma diminuição dos ciclones de intensidade média em DJF e SON, e ambos os modelos na Primavera revelam um deslocamento das distribuições para intensidades máximas maiores.

Na Figura 26 está representada a distribuição do número de tempestades para a região Pacífico Este. Nesta região existe um aumento no número de tempestades de intensidades máximas intermédias em DJF e JJA, em ambos os modelos. Em SON, o padrão da distribuição

é semelhante entre os dois períodos, embora o modelo EC-Earth apresente um menor número de sistemas ao longo da curva. Na região Pacífico Oeste (Figura 27), em JJA, o padrão de distribuição entre presente e futuro é similar em ambos os modelos, mostrando um ligeira diminuição para intensidades máximas pequenas. Em MAM, existe uma redução do número de tempestades nos dois modelos globais, sendo mais pronunciada no EC-Earth (~30%). Em DJF, o modelo CCSM4 não apresenta alterações significativas entre presente e futuro, enquanto o modelo EC-Earth mostra um aumento de 20% no número de sistemas. Em SON, o modelo CCSM4 aponta para um pequeno aumento do pico máximo da distribuição, ao passo que o modelo EC-Earth apresenta uma diminuição de cerca de 25% ao longo de toda a distribuição.

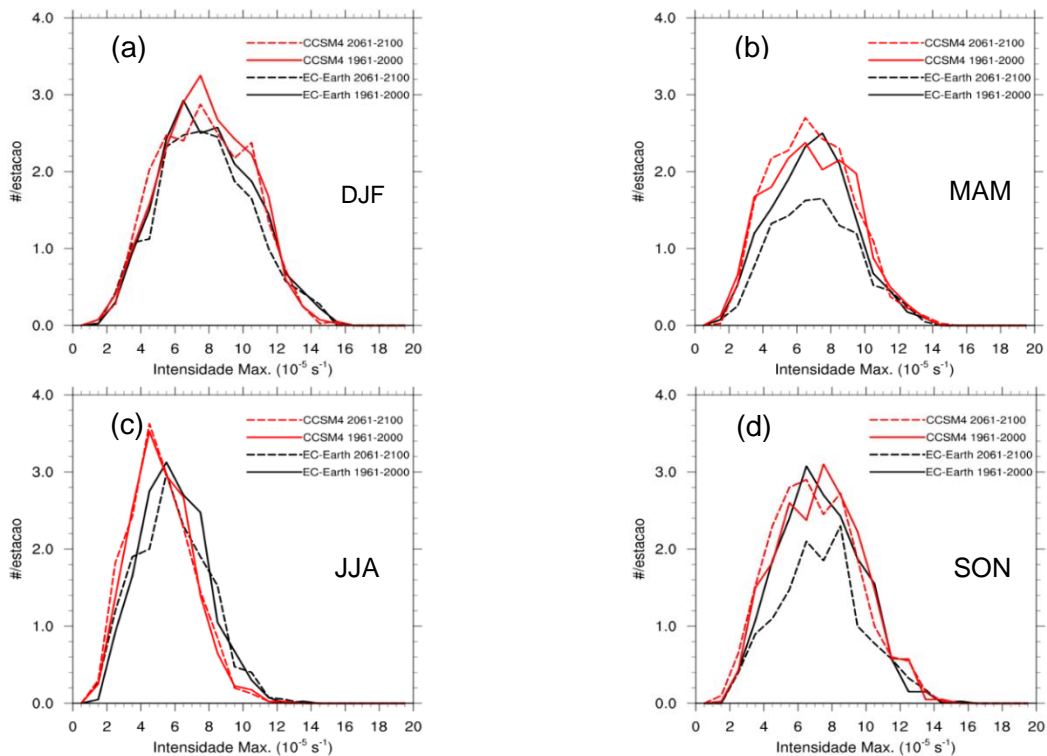


Figura 22 - Distribuição do número de tempestades ciclónicas por mês em função da sua intensidade máxima nos períodos 20C (—) e 21C (---) para os dois modelos globais, EC-Earth (preto) e CCSM4 (vermelho), para cada estação, para a região Atlântico Este: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.

Na Região Principal de Desenvolvimento do Atlântico, Figura 28, existe uma redução significativa da intensidade máxima dos ciclones em SON em ambos os modelos, que é de aproximadamente 50% no CCSM4 e de 30% no EC-Earth. Em DJF e MAM, o modelo EC-Earth mostra uma ligeira redução do número de sistemas ao longo de toda a distribuição, enquanto o modelo CCSM4 mostra um ligeiro aumento nos sistemas menos intensos. No Verão, JJA, o modelo CCSM4 mostra uma diminuição significativa do número de tempestades, cerca de 30%, enquanto o padrão da distribuição do EC-Earth se desloca para valores de intensidade máxima menores, mantendo o pico máximo semelhante entre os dois períodos.

As alterações regionais dos ciclones descritas anteriormente podem estar associadas a alterações regionais das temperaturas da superfície do mar. Inatsu et al. (2002) investigou os efeitos da temperatura da superfície dos mares tropicais e extratropicais nos ciclones de latitudes médias e mostrou que o forçamento da temperatura da superfície do mar tropical gera

grandes vórtices estacionários extratropicais que moldam a distribuição das trajetórias das tempestades. Este mecanismo é consistente com a propagação das ondas de Rossby (Inatsu et al., 2002).

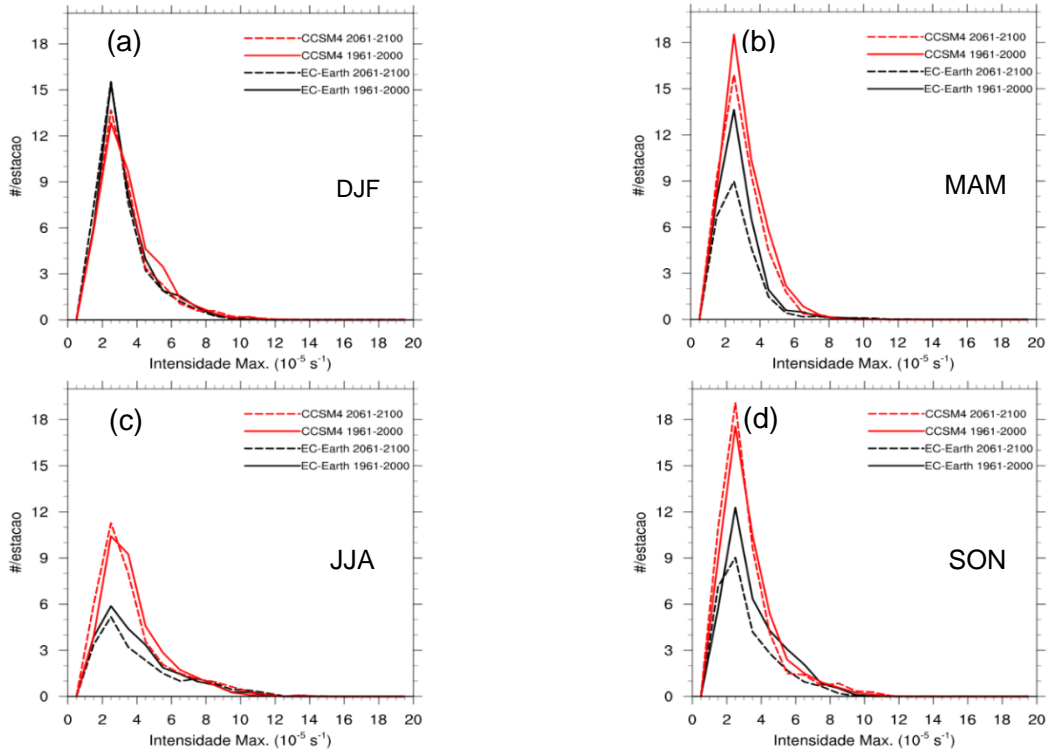
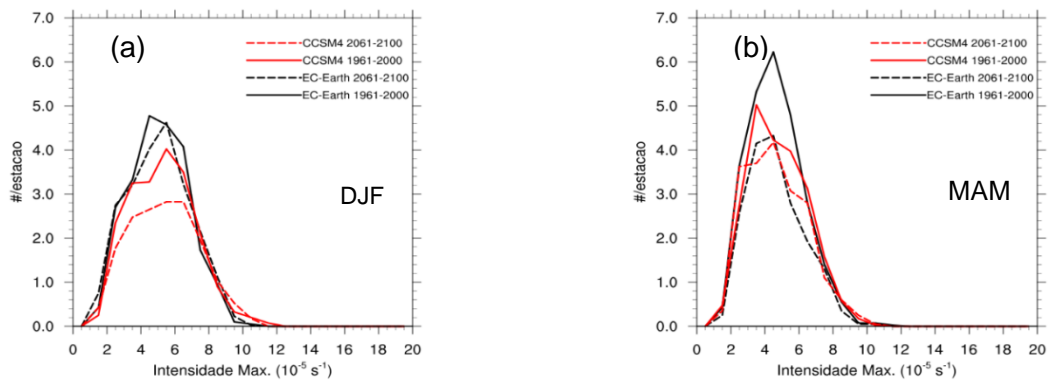


Figura 23 - Distribuição do número de tempestades ciclónicas por mês em função da sua intensidade máxima nos períodos 20C (–) e 21C (- -) para os dois modelos globais, EC-Earth (preto) e CCSM4 (vermelho), para cada estação, para a região da Índia: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.



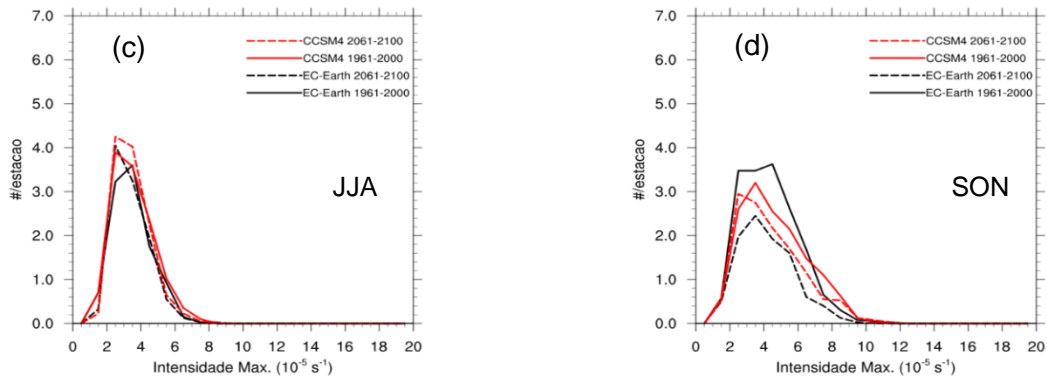


Figura 24 - Distribuição do número de tempestades ciclônicas por mês em função da sua intensidade máxima nos períodos 20C (-) e 21C (- -) para os dois modelos globais, EC-Earth (preto) e CCSM4 (vermelho), para cada estação, para a região do Mediterrâneo: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.

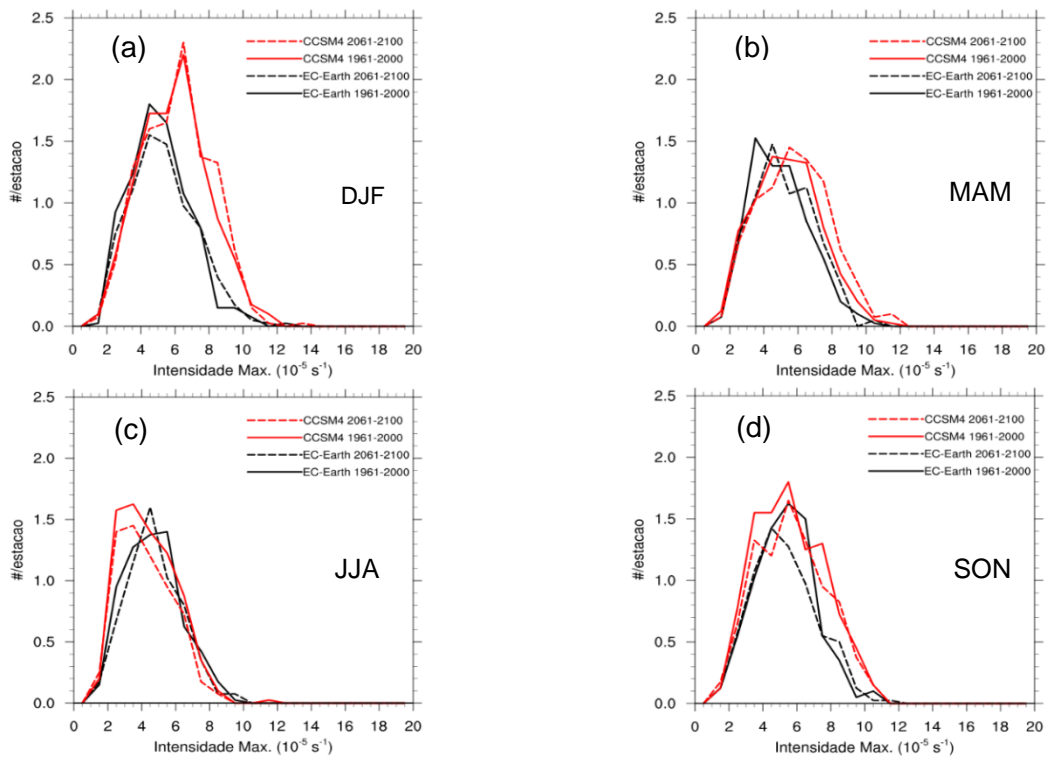
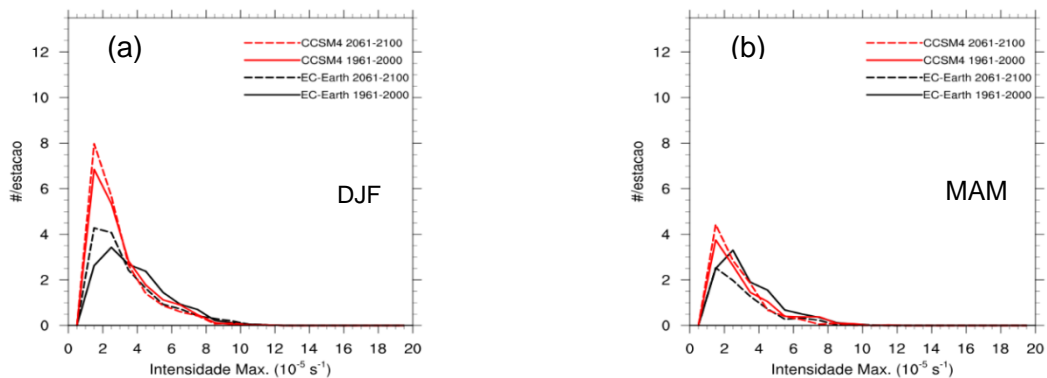


Figura 25 - Distribuição do número de tempestades ciclônicas por mês em função da sua intensidade máxima nos períodos 20C (-) e 21C (- -) para os dois modelos globais, EC-Earth (preto) e CCSM4 (vermelho), para cada estação, para a região do Norte da Europa: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.



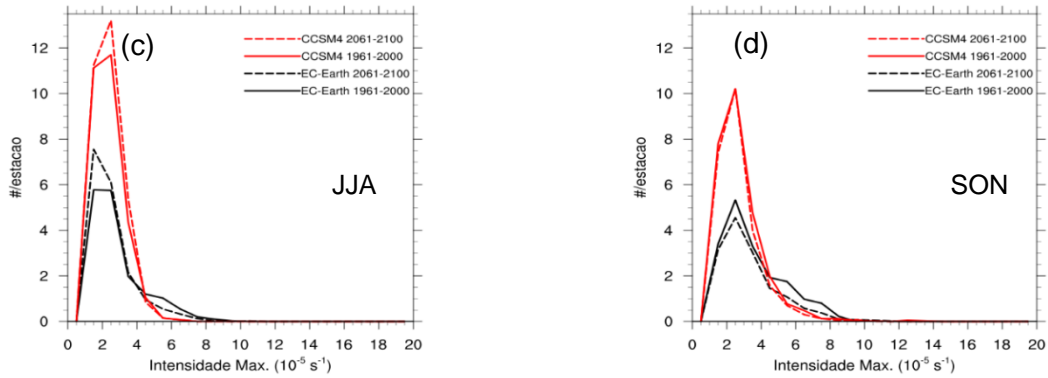


Figura 26 - Distribuição do número de tempestades ciclônicas por mês em função da sua intensidade máxima nos períodos 20C (-) e 21C (- -) para os dois modelos globais, EC-Earth (preto) e CCSM4 (vermelho), para cada estação, para a região Pacífico Este: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.

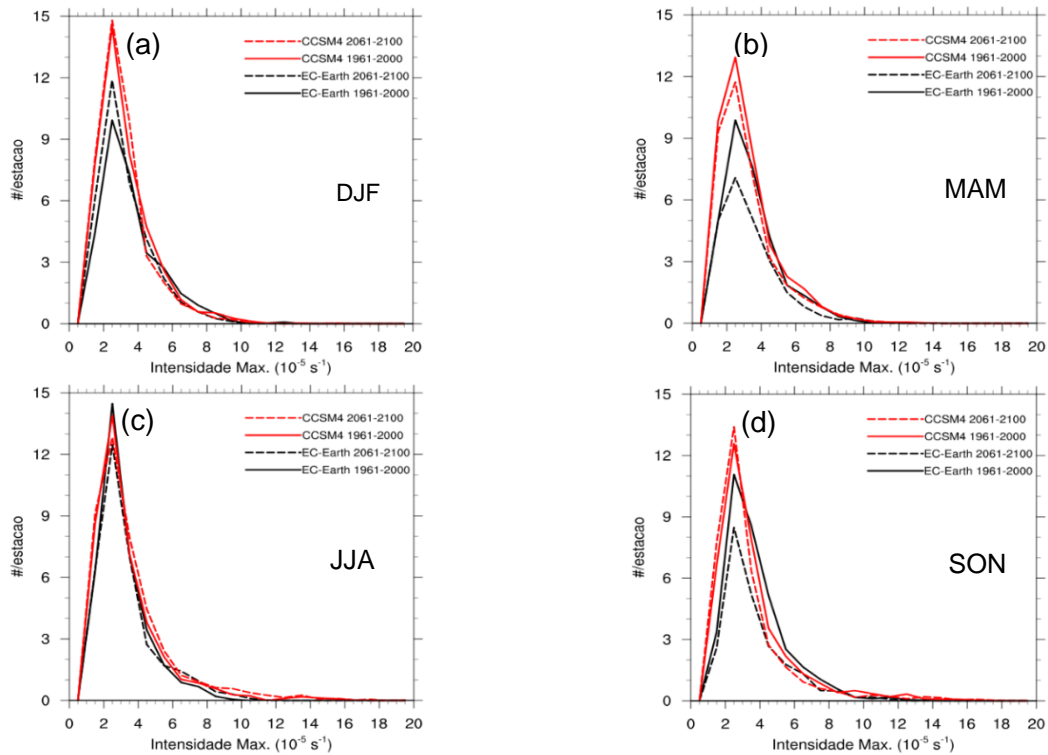
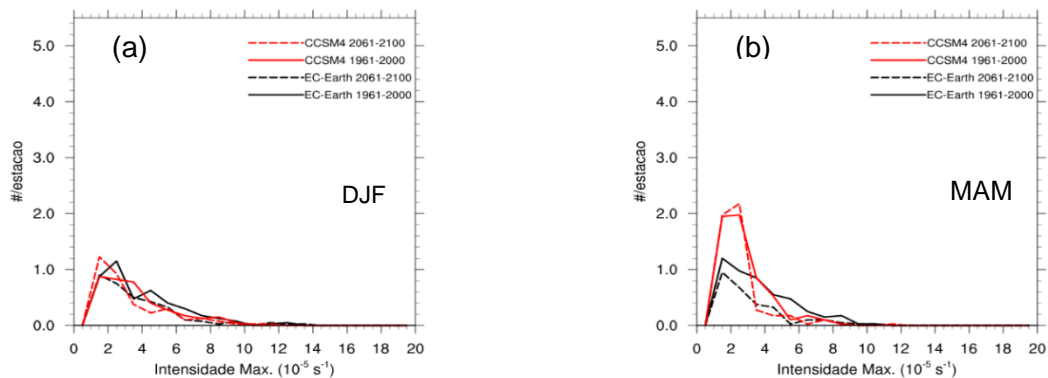


Figura 27 - Distribuição do número de tempestades ciclônicas por mês em função da sua intensidade máxima nos períodos 20C (-) e 21C (- -) para os dois modelos globais, EC-Earth (preto) e CCSM4 (vermelho), para cada estação, para a região Pacífico Oeste: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.



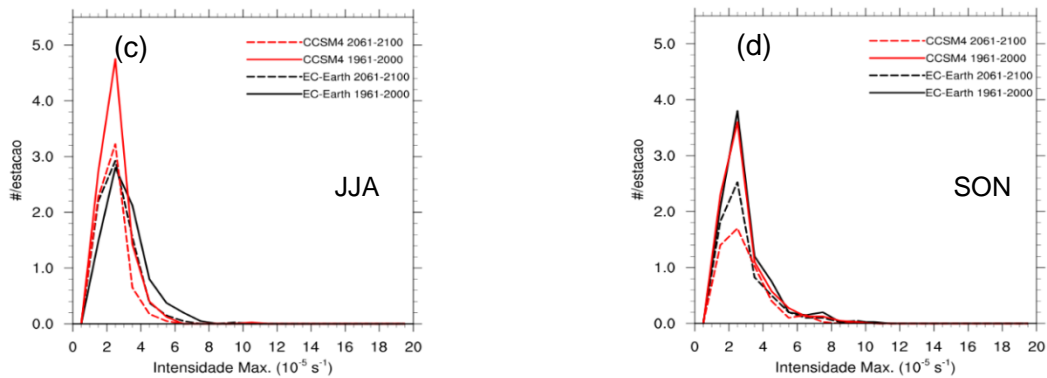


Figura 28 - Distribuição do número de tempestades ciclônicas por mês em função da sua intensidade máxima nos períodos 20C (—) e 21C (---) para os dois modelos globais, EC-Earth (preto) e CCSM4 (vermelho), para cada estação, para a Região de Desenvolvimento Médio do Atlântico: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.

5 Conclusões

Este estudo teve como principal objetivo a avaliação e caracterização das trajetórias dos ciclones extratropicais no Hemisfério Norte, no clima presente e no clima futuro, de acordo com o cenário de alterações climáticas RCP8.5, de modo a estimar o impacto do aquecimento global nos ciclones do HN. A identificação e caracterização dos ciclones extratropicais foram efetuadas recorrendo à metodologia de *storm tracking* de Hodges (1994, 1995). Foi utilizada como variável de análise a vorticidade relativa aos 850 hPa a cada 6h. Este parâmetro foi utilizado para determinar as trajetórias dos ciclones através do modelo de *storm tracking* implementado. Foram calculadas três estatísticas espaciais, densidade de trajetórias, intensidade média e densidade de ciclogénese. Os dois modelos globais utilizados, EC-Earth e CCSM4 (1961 – 2000), foram posteriormente avaliados comparando os seus resultados com os da reanálise ERA-Interim (1979 – 2002). Posteriormente, de modo a aferir as transformações nessas propriedades num clima futuro compararam-se os resultados do futuro, e de acordo com as projeções dos modelos globais no período 2061 – 2100, com os do clima presente (1961 – 2000).

De um modo geral, ambos os modelos globais, EC-Earth e CCSM4, são capazes de reproduzir o padrão espacial dos parâmetros estatísticos calculados apresentando uma boa concordância com a reanálise ERA-Interim. Apesar do padrão espacial ser idêntico ao da reanálise nos dois modelos, o CCSM4 apresenta padrões da densidade de trajetória e da intensidade média menos intensos comparativamente aos do EC-Earth. Em relação ao parâmetro da densidade de ciclogénese, as diferenças espaciais são mais evidentes na região extra-tropical. Relativamente à distribuição do número de tempestades por mês em função da sua intensidade máxima durante o seu tempo de vida, ambos os modelos apresentam um bom ajuste em relação à reanálise. Para valores de intensidade máxima inferiores a $\sim 8 \times 10^{-5} s^{-1}$, o modelo EC-Earth apresenta um menor número de sistemas e o modelo CCSM4 um maior número, relativamente à ERA-Interim.

Na distribuição global não são evidentes grandes diferenças entre a reanálise e os dois modelos, e por esse motivo foi determinada uma distribuição do número de tempestades por

estação em função da sua intensidade máxima para sete regiões de especial interesse. As distribuições são semelhantes entre os modelos e a reanálise para a maioria das regiões. Nas latitudes extratropicais, a região do Mediterrâneo é bem representada pelo modelo EC-Earth em todas as estações do ano, bem como a região da Índia. No modelo EC-Earth, as diferenças mais significativa na distribuição a nível regional referem-se às regiões tropicais, onde a densidade de trajetórias é menor em relação à reanálise. O modelo CCSM4 apresenta também algumas diferenças na distribuição das regiões tropicais, uma vez que para algumas estações a densidade de trajetória é maior relativamente à reanálise.

A partir do cálculo dos indicadores de erro entre os modelos e a reanálise verifica-se que, de um modo geral, o modelo EC-Earth é melhor que o CCSM4. O modelo EC-Earth apresenta valores de viés quase sempre negativos, exceto no parâmetro da intensidade média em DJF e MAM, o que indica que o modelo subestima a densidade de trajetória e de ciclogénese. O modelo CCSM4 genericamente sobrestima a densidade de trajetória e de ciclogénese e a intensidade média em todas as estações, exceto em DJF na densidade de ciclogénese. Relativamente à densidade de trajetória e à intensidade média, o modelo EC-Earth apresenta valores de erros inferiores aos do modelo CCSM4, sendo os coeficientes de correlação espacial acima de 0.90. Para a densidade de ciclogénese, o CCSM4 tem resultados de viés mais baixos em relação ao EC-Earth, mas em contrapartida os restantes indicadores de erro são maiores. O modelo EC-Earth tem uma representação mais aproximada da reanálise na intensidade média. A nível geral, o modelo EC-Earth apresenta uma boa representação dos ciclones extratropicais e das suas propriedades, o que é de esperar uma vez que a reanálise ERA-Interim e este modelo global são baseados no mesmo modelo de previsão do ECMWF (IFS).

Em resultado do aquecimento global, e no contexto do cenário RCP8.5, os modelos revelam algumas diferenças nas trajetórias dos ciclones extratropicais e das suas propriedades. A nível global, existe uma redução no número de tempestades entre o clima futuro e o presente, com maior relevância nas estações do Verão e Outono no EC-Earth, cerca de 5.20%, e no Inverno e Outono no CCSM4, cerca de 4.70%, na região extratropical (Tabela 4). A redução no número de ciclones extratropicais ocorre maioritariamente para intensidades máximas intermédias (Figura 21). Em MAM e SON, existe uma pequena diminuição do número de tempestades com intensidades máximas superiores a $8 \times 10^{-5} s^{-1}$. Em relação aos ciclones extratropicais com valores de intensidade superiores a $8 \times 10^{-5} s^{-1}$ existe um pequeno aumento em JJA, de cerca de 10% no CCSM4 e de 4% no EC-Earth (Tabela 5). É de salientar que ambos os modelos estão de acordo com os aumentos e diminuições do número de sistemas total e que atingem valores de intensidade superior a $8 \times 10^{-5} s^{-1}$, mas com valores distintos.

Nas duas bacias oceânicas (Atlântico e Pacífico Norte) existe um ligeiro sinal indicador de uma deslocação dos ciclones extratropicais na direção do polo, em JJA. A região do Mediterrâneo apresenta um enfraquecimento nas trajetórias das tempestades e das intensidades médias. Este enfraquecimento ocorre em todas as estações sazonais, à exceção de JJA. Nas estações intermédias, nesta região, as diferenças são mais relevantes, chegando a diminuir em cerca de 30% o número de sistemas que ocorre por estação do ano. Sobre a Europa, em DJF, observa-se um pequeno aumento na densidade de trajetória, mas também na intensidade média, em especial na região Oeste da Europa. Em JJA, existe uma redução no número de sistemas,

entre 1 a 2 tempestades por mês, e da sua intensidade média no continente europeu, mais acentuada sobre as Ilhas Britânicas. Sobre o continente asiático existem diferenças quer a nível da formação de ciclones mas também em termos da intensidade média das mesmas. Na costa leste dos Estados Unidos existe uma redução do número de sistemas, em especial em SON, de cerca de 2.5 tempestades por mês, em ambos os modelos. Nesta mesma região, em JJA, os dois modelos apresentam sinais contrários.

Neste estudo foi possível identificar algumas alterações no padrão médio espacial dos ciclones extratropicais a nível global e regional, em linha com outros estudos, em que em que pode destacar a redução generalizada dos ciclones extratropicais no HN, e um aumento do número de ciclones extratropicais mais intensos no Verão. Apesar da maioria dos estudos apontarem para a redução da baroclinicidade como causa fundamental da diminuição do número de ciclones, outros mecanismos devem ser considerados, como a maior humedificação da troposfera. No entanto, a real importância destes mecanismos está ainda longe de ser consensual, sendo necessários mais estudos para confirmar as conclusões obtidas pelas diversas investigações realizadas.

Num trabalho futuro serão utilizados mais modelos globais climáticos, implementando a mesma metodologia, de forma a realizar um ensemble de modelos, de maneira a obter resultados mais robustos e medir as incertezas existentes nessas mesmas projeções.

6 Referências

- Ahrens, C. D., 2008: Essentials of Meteorology, An Invitation to the Atmosphere, Thomson Brooks/Cole, pp 222 – 231, Belmont, USA.
- Bengtsson, L., K. I. Hodges, e E. Roeckner, 2006: Storm Tracks and Climate Change, *J. Climate*, 19, 3518–3543.
- Bengtsson, L., K. I. Hodges, M. Esch, N. Keenlyside, L. Kornblueh, J.-J. Luo e T. Yamagata, 2007: How may tropical cyclones change in a warmer climate?, *Tellus*, 59A, 539–561.
- Bengtsson, L., K. I. Hodges, e N. Keenlyside, 2009: Will Extratropical Storms Intensify in a Warmer Climate?, *J. Climate*, 22, 2276–2301.
- Berrisford P., D. Dee, K. Fielding, M. Fuentes, P. Kalberg, S. Kobayashi e S. Uppala, 2009: The ERA-Interim Archive, ERA report series. 1. Technical report. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Shinfield Park, Reading.
- Colle, B. A., Z. Zhang, K. A. Lombardo, E. Chang, P. Liu, M. Zhang e S. Hameed, 2012: Historical and Future Predictions of Eastern North America and Western Atlantic Extratropical Cyclones in CMIP5 During the Cool Season, *J. Climate*.
- Geng, Q. e M. Sugi, 2003: Possible Change of Extratropical Cyclone Ectivity due to Enhanced Greenhouse Gases and Sulfate Aerosols – Study with a High-Resolution AGCM, *J. Climate*, 16, 2262–2274.
- Gent, P. R., Danabasoglu, G., Donner, L. J., Holland, M. M., Hunke, E. C., Jayne, S. R., Lawrence, D. M., Neale, R. B. , Rasch, P. J., Vertenstein, M., Worley, P. H., Yang, Z. e Zhang, M., 2011: The Community Climate System Model Version 4, *J. Climate*, 24, 4973–4991.
- Greeves, C. Z., V. D. Pope, R. A. Stratton, G. M. Martin, 2007: Representation of Northern Hemisphere winter storm tracks in climate models, *Climate Dyn.*, 28, 683–702.
- Haarsma, R. J., W. Hazeleger, C. Severijns, H. de Vries, A. Sterl, R. Bintanja, G. J. van Oldenborgh e H. W. van den Brink, 2013: More hurricanes to hit Western Europe due to global warming, *Amer. Geophys. Union*, doi: 10.1002/grl.50360.
- Hanley, J e R. Caballero, 2012: The role of large-scale atmospheric flow and Rossby wave breaking in the evolution of extreme windstorms over Europe, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L21708.
- Hazeleger, W., C. Severijns, T. Semmler, S. Stefanescu, S. Yang, X. Wang, K. Wyser, E. Dutra, R. Bintanja, B. van den Hurk, T. van Noije, F. Selten e A. Sterl, 2010: EC-Earth: A Seamless Earth-System Prediction Approach in Action, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91, 1357–1363.
- Hodges, K. I., 1994: A general method for tracking analysis and its application to meteorological data. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 2573–2586.

- Hodges, K. I., 1995: Feature tracking on the unit sphere. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 3458–3465.
- Hodges, K. I., 1996: Spherical nonparametric estimators applied to the UGAMP model integration for AMIP. *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2914–2932.
- Hodges, K. I., 1999: Adaptive constraints for feature tracking. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 1362–1373.
- Hoskins, B. J., e K. I. Hodges, 2002: New perspectives on the Northern Hemisphere winter storm tracks, *J. Atmos. Sci*, 59, 1041–1061.
- Hoskins, B. J., e K. I. Hodges, 2005: A new perspective on Southern Hemisphere storm tracks. *J. Climate*, 18, 4108–4129.
- Inatsu, M. e B. J. Hoskins, 2004: The zonal asymmetry of the Southern Hemisphere winter storm track, *J. Climate*, 17, 4882–4892.
- Inatsu, M., H. Mukougawa, e S.Xie, 2002: Tropical and extratropical SST effects on the midlatitude storm track. *J. Meteor. Soc. Japan*, 80, 1069–1076.
- Leckebusch, G. C. e U. Ulbrich, 2004: On the relationship between cyclones and extreme windstorm events over Europe under climate change, *Global Planet. Change*, 44, 181–193.
- Mizuta, R., M. Matsueda, H. Endo e S. Yukimoto, 2011: Future Change in Extratropical Cyclones Associated with Change in the Upper Troposphere, *J. Climate*, 24, 6456–6470.
- Pinto, J. G., Ulbrich, U., Leckebusch, G. C., Spanghel, T., Reyers, M. e Zacharias, S., 2007: Changes in storm track and cyclone activity in the three SRES ensemble experiments with the ECHAM5/MPI-OM1 GCM, *Clim. Dyn.*, 29, 195–210.
- Ulbrich, U., G. C. Leckebusch, e J. G. Pinto, 2009: Extra-tropical cyclones in the present and future climate: A review. *Theor. Appl. Climatol.*, 96, 117–131.
- Ulbrich, U., J. G. Pinto, H. Kupfer, G. C. Leckebusch, T. Spanghel e M. Reyers, 2008: Changing Northern Hemisphere Storm Tracks in an Ensemble of IPCC Climate Change Simulations, *J. Climate*, doi: 10.1175/2007JCLI1992.1
- Yin, J. H., 2005: A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L18701, doi:10.1029/2005GL023684.

7 Apêndice A – Artigo “Storm Tracks and Climate Change”

7.1 Trajectórias das Tempestades no Clima Presente

7.1.1 Hemisfério Norte – Latitudes Extratropicais

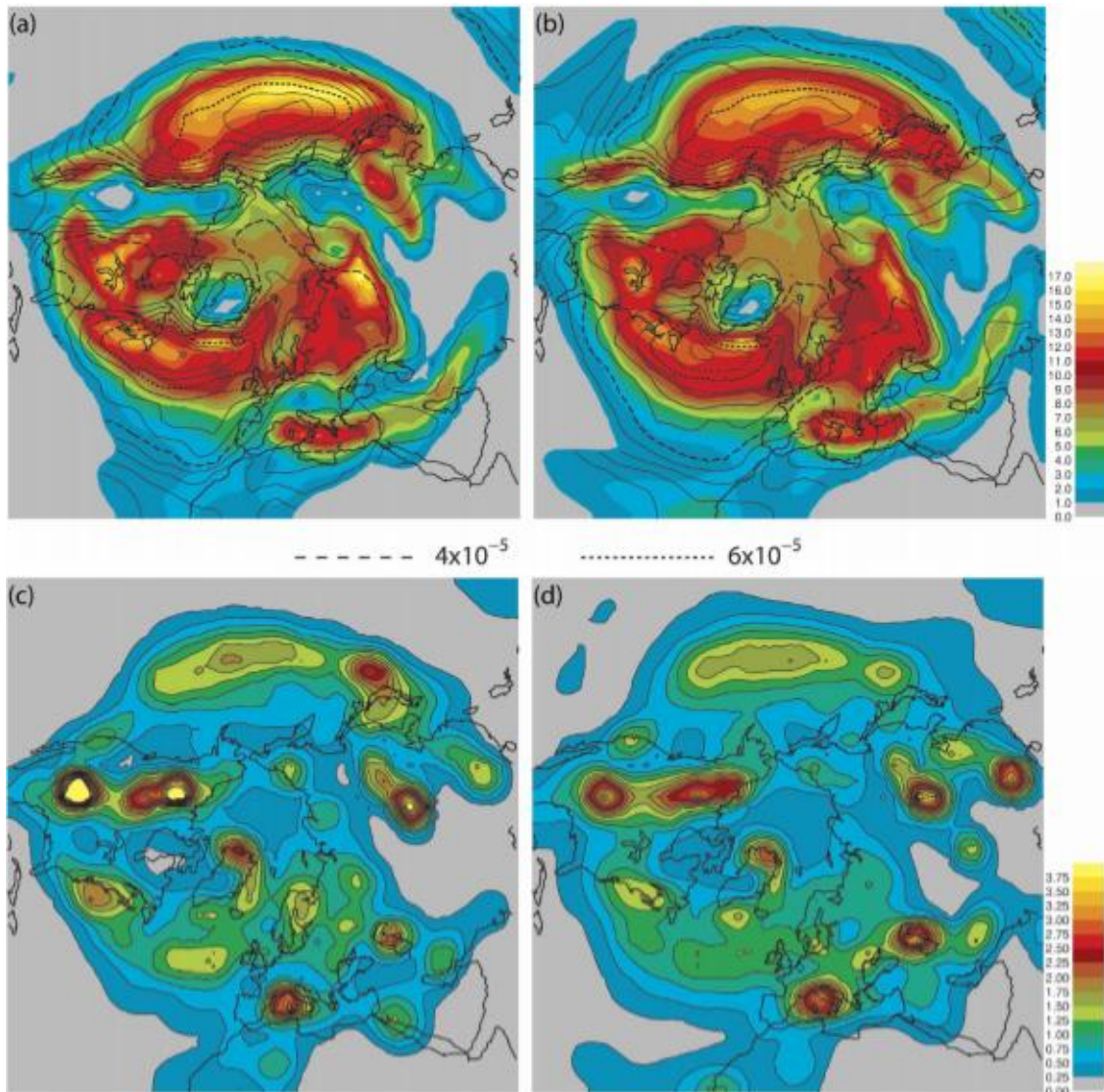


Figura 29 – Estatística espacial no Inverno do Hemisfério Norte (DJF) para ERA-40 (1979-2002) e ECHAM5 (média das três simulações AMIP): (a) densidade de trajetória (cor) e intensidade média (linha) para ERA-40; (b) densidade de trajetória (cor) e intensidade média (linha) para ECHAM5; (c) densidade de ciclogénese para ERA-40 e (d) densidade de ciclogénese para ECHAM5. As densidades correspondem à densidade numérica por unidade de área por mês, onde a unidade de área é equivalente a 5° esféricos ($\sim 10^6 \text{ km}^2$). As intensidades médias estão em unidades de 10^{-5} s^{-1} . As linhas a tracejado indicam as intensidades médias específicas.

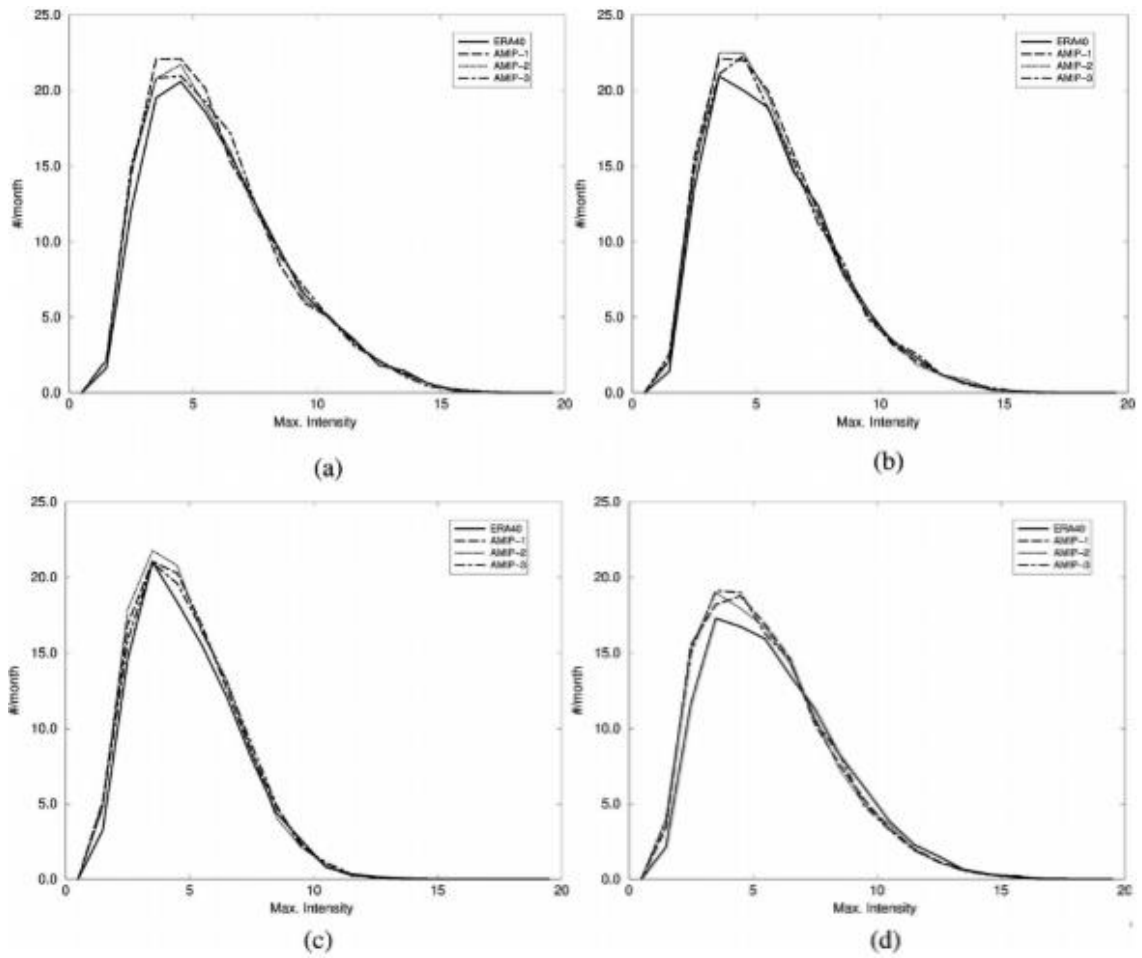


Figura 30 - Distribuição do número de tempestades ciclônicas por mês em função da sua intensidade máxima para a reanálise ERA-40 e para os três membros das integrações AMIP ECHAM5, para o HN, para cada estação, entre os 30° e 90°N: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON. A intensidade máxima está em unidades de 10^{-5} s^{-1} .

8 Apêndice B – Hemisfério Sul

8.1 Avaliação Global dos Modelos

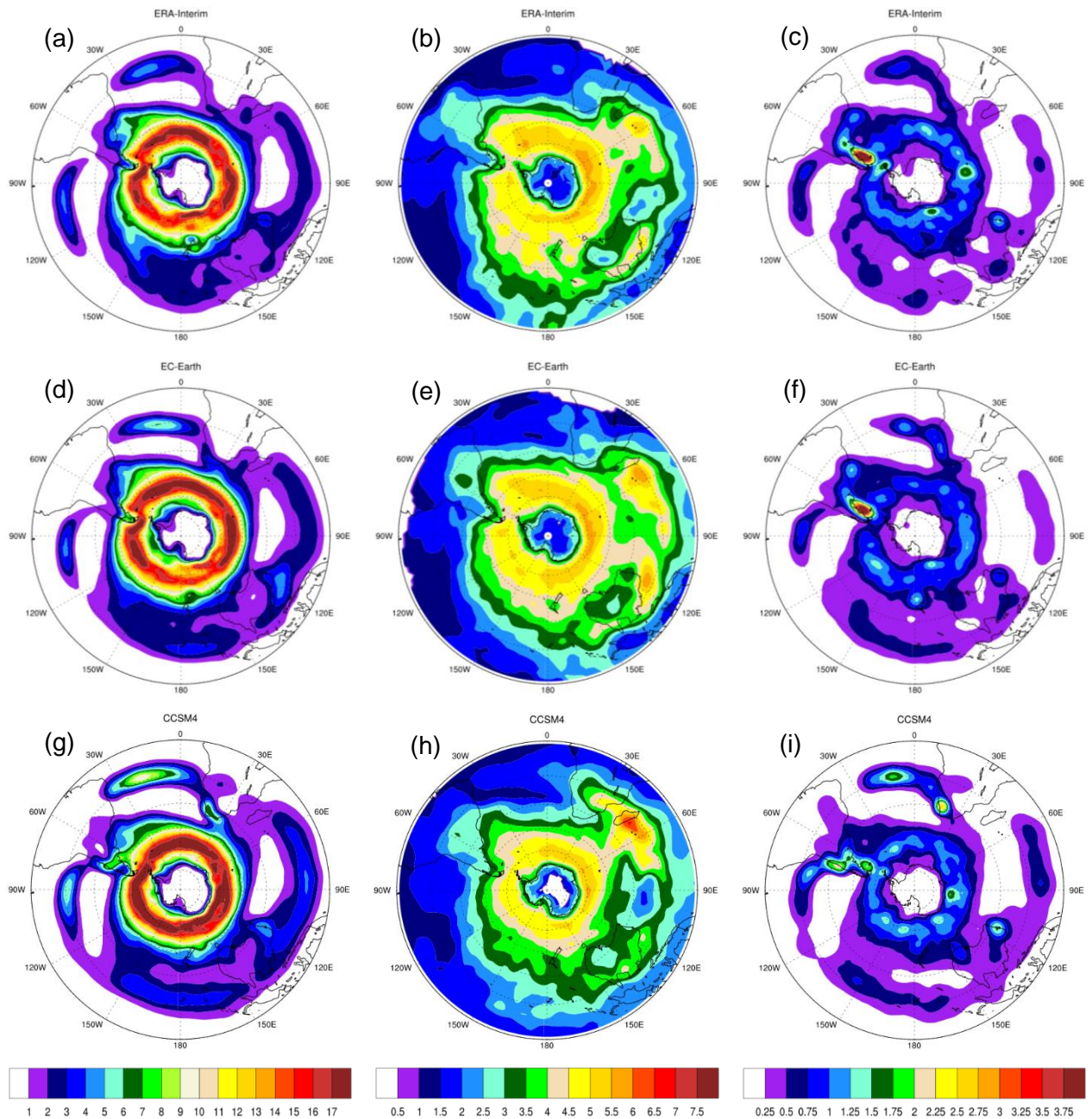


Figura 31 - Estatísticas espaciais para o Verão do Hemisfério Sul (DJF) para ERA-Interim (1979-2002), EC-Earth e CCSM4 (1961-2000): (a, d, g) densidade de trajetória, (b, e, h) intensidade média e (c, f, i) densidade de ciclogênese da ERA-I, do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente. A intensidade média está em unidades de $10^{-5} s^{-1}$.

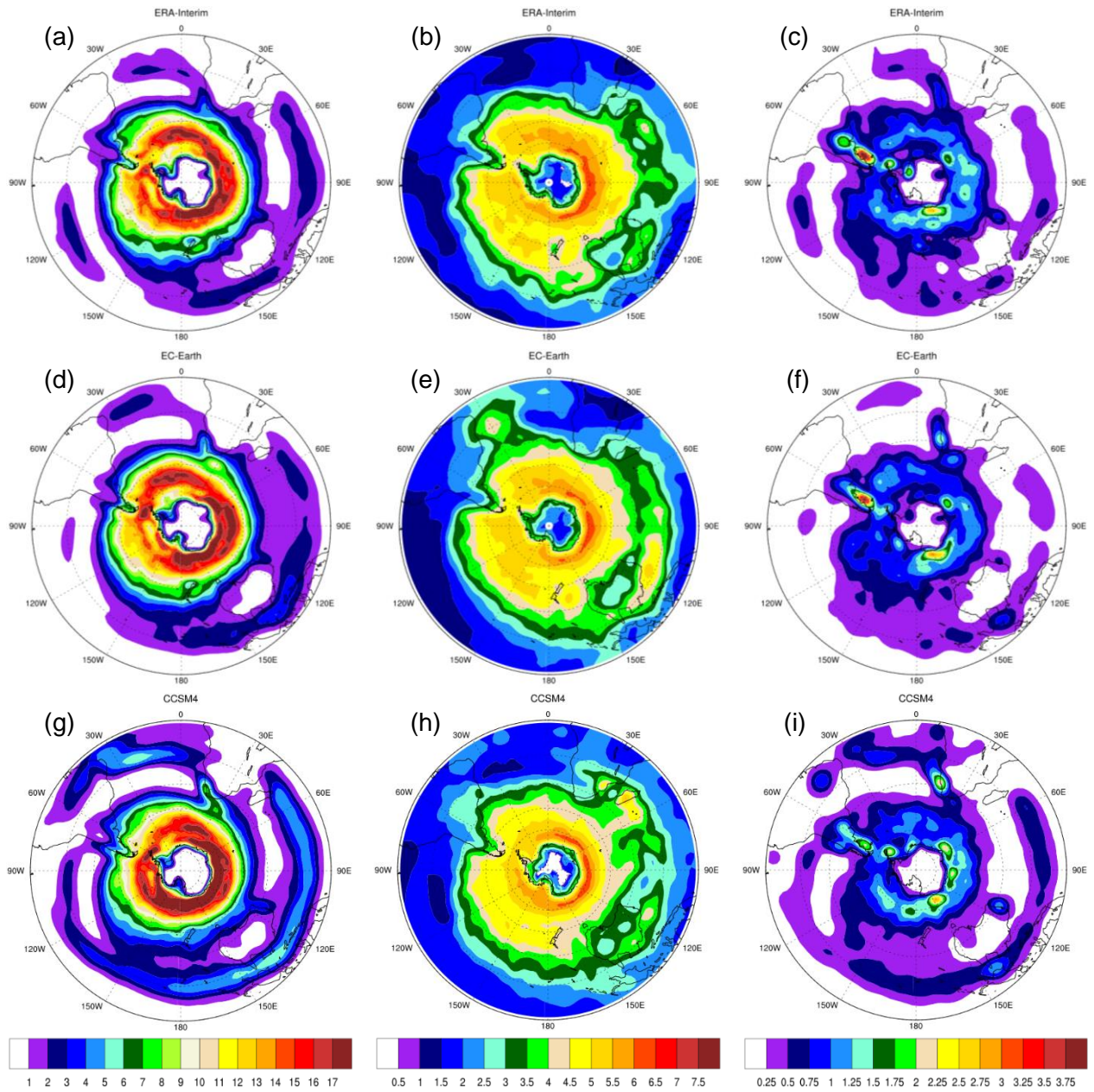


Figura 32 - Estatísticas espaciais para o Outono do Hemisfério Sul (MAM) para ERA-Interim (1979-2002), EC-Earth e CCSM4 (1961-2000): (a, d, g) densidade de trajetória, (b, e, h) intensidade média e (c, f, i) densidade de ciclogénese da ERA-I, do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente. A intensidade média está em unidades de $10^{-5} s^{-1}$.

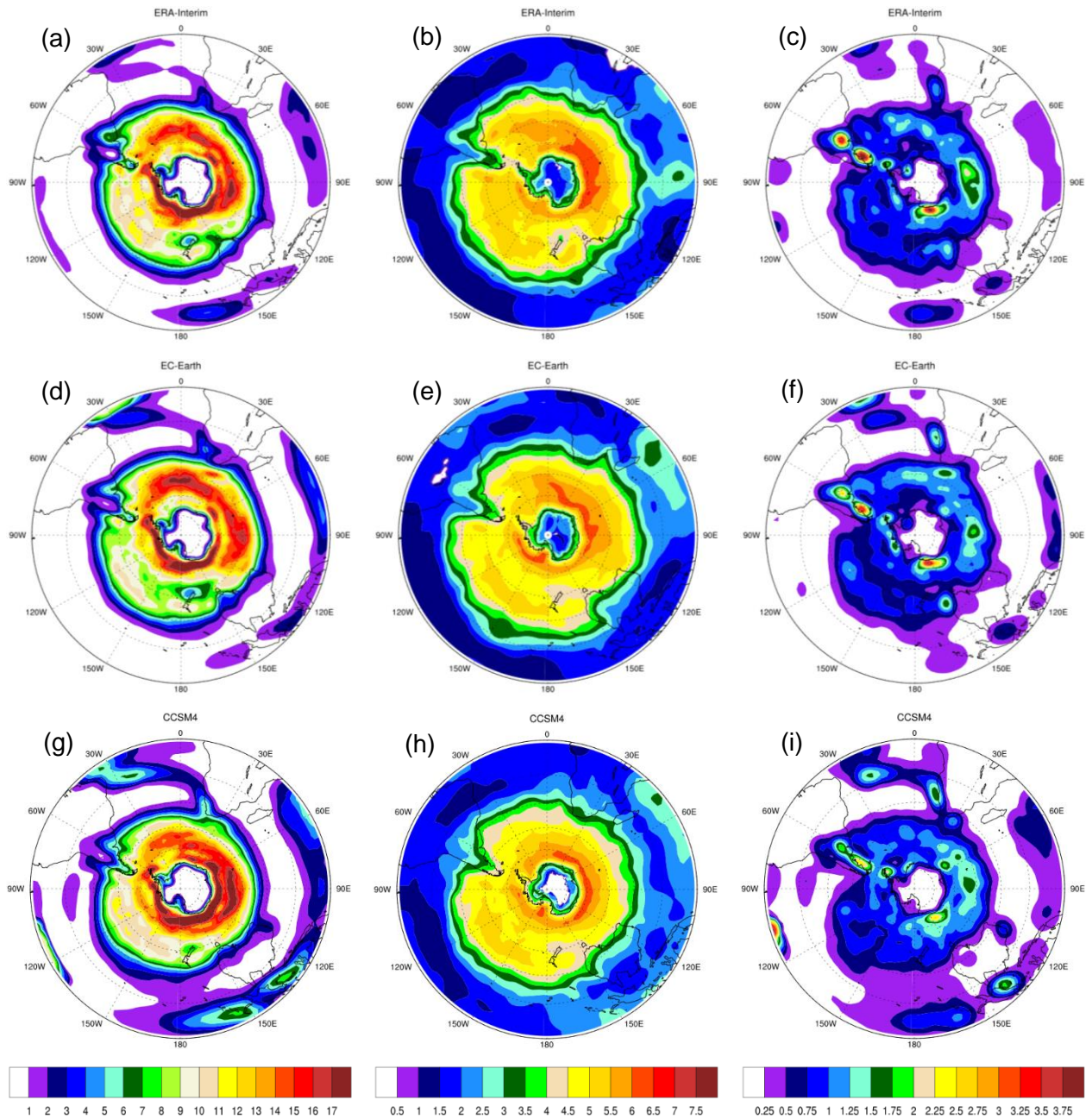


Figura 33 - Estatísticas espaciais para o Inverno do Hemisfério Sul (JJA) para ERA-Interim (1979-2002), EC-Earth e CCSM4 (1961-2000): (a, d, g) densidade de trajetória, (b, e, h) intensidade média e (c, f, i) densidade de ciclogénese da ERA-I, do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente. A intensidade média está em unidades de $10^{-5} s^{-1}$.

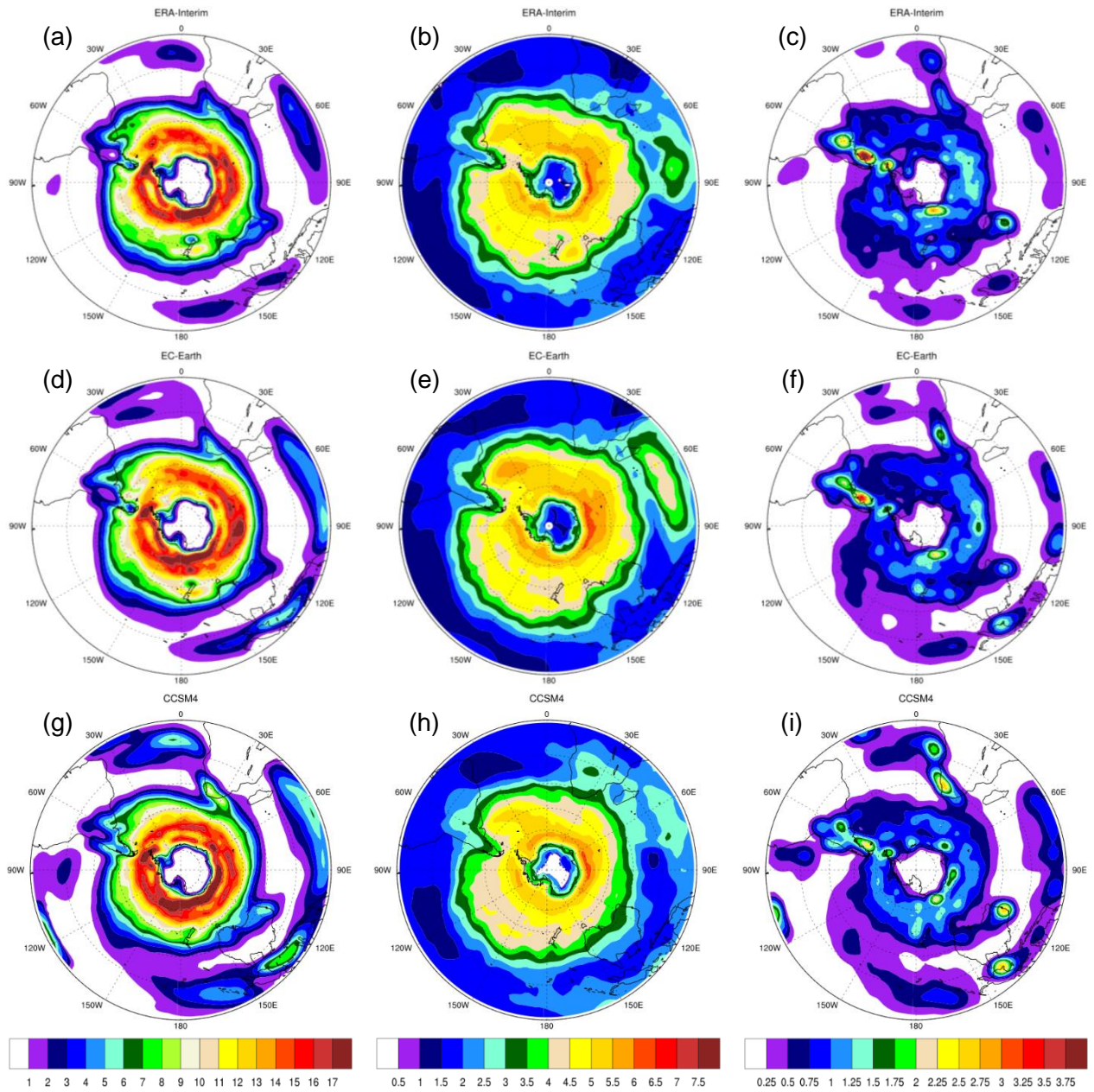


Figura 34 - Estatísticas espaciais para a Primavera do Hemisfério Sul (SON) para ERA-Interim (1979-2002), EC-Earth e CCSM4 (1961-2000): (a, d, g) densidade de trajetória, (b, e, h) intensidade média e (c, f, i) densidade de ciclogénese da ERA-I, do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente. A intensidade média está em unidades de $10^{-5} s^{-1}$.

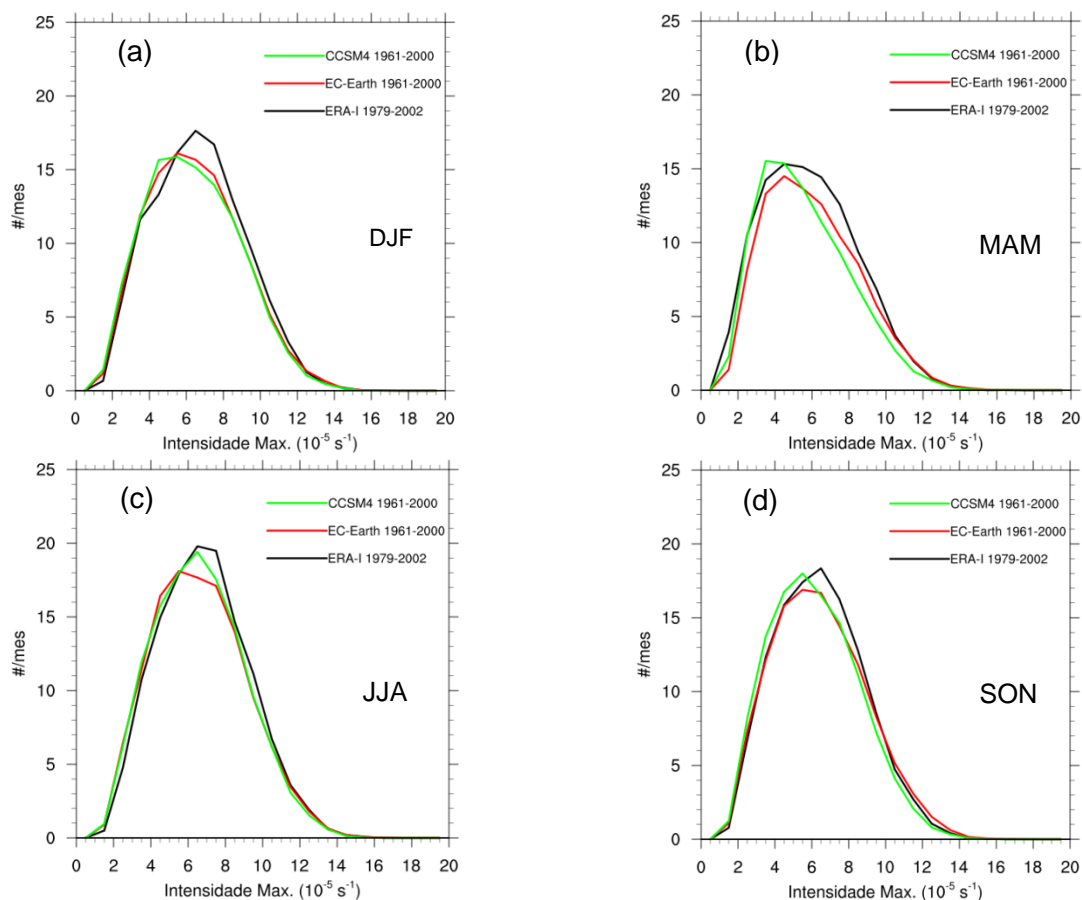


Figura 35 - Distribuição do número de tempestades ciclónicas por mês em função da sua intensidade máxima para a reanálise ERA-Interim e os dois modelos globais, EC-Earth e CCSM4, para o HS, para cada estação, entre os 30° e 90°S: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON. A intensidade máxima está em unidades de $10^{-5} s^{-1}$.

Tabela 6 - Indicadores de erro espaciais dos dois modelos (1961-2000) relativamente à reanálise (1979-2002), para DJF, MAM, JJA e SON, para a densidade de trajetória.

Densidade de Trajetória		DJF	MAM	JJA	SON
BIAS (#/month)	EC-Earth	0.07	0.20	0.12	0.22
	CCSM4	0.21	0.37	0.37	0.33
PBIAS (%)	EC-Earth	1.44×10^{-4}	3.51×10^{-4}	2.01×10^{-4}	3.93×10^{-4}
	CCSM4	4.23×10^{-4}	6.35×10^{-4}	6.14×10^{-4}	5.63×10^{-4}
MAE (#/month)	EC-Earth	0.72	0.65	0.80	0.81
	CCSM4	1.07	1.35	1.08	1.05
MAPE (%)	EC-Earth	15.30	11.97	14.82	14.93
	CCSM4	22.66	24.88	19.89	19.41
RMSE (#/month)	EC-Earth	1.18	0.92	1.26	1.27
	CCSM4	1.63	2.10	1.56	1.54
r	EC-Earth	0.98	0.99	0.98	0.98
	CCSM4	0.96	0.95	0.97	0.97

Tabela 7 - Indicadores de erro espaciais dos dois modelos (1961-2000) relativamente à reanálise (1979-2002), para DJF, MAM, JJA e SON, para a densidade de ciclogénese.

Densidade de Ciclogénese		DJF	MAM	JJA	SON
BIAS (#/month)	EC-Earth	-0.32	-0.05	-0.03	-0.03
	CCSM4	-4.65×10^{-3}	-1.64×10^{-3}	0.02	0.02
PBIAS (%)	EC-Earth	-6.86×10^{-4}	-8.37×10^{-4}	-4.47×10^{-4}	-4.54×10^{-4}
	CCSM4	-9.82×10^{-5}	-2.86×10^{-5}	2.69×10^{-4}	3.67×10^{-4}
MAE (#/month)	EC-Earth	0.09	0.12	0.12	0.11
	CCSM4	0.14	0.17	0.17	0.17
MAPE (%)	EC-Earth	20.48	21.57	21.50	21.61
	CCSM4	30.79	31.63	32.13	32.09
RMSE (#/month)	EC-Earth	0.14	0.18	0.17	0.18
	CCSM4	0.26	0.27	0.27	0.26
r	EC-Earth	0.95	0.92	0.94	0.92
	CCSM4	0.80	0.82	0.84	0.84

Tabela 8 - Indicadores de erro espaciais dos dois modelos (1961-2000) relativamente à reanálise (1979-2002), para DJF, MAM, JJA e SON, para a intensidade média.

Intensidade Média		DJF	MAM	JJA	SON
BIAS ($\times 10^{-5} s^{-1}$)	EC-Earth	0.02	0.06	0.04	-0.08
	CCSM4	-0.24	-0.13	-0.12	-0.18
PBIAS (%)	EC-Earth	4.70×10^{-5}	1.63×10^{-4}	1.07×10^{-4}	2.24×10^{-4}
	CCSM4	-6.78×10^{-4}	-3.43×10^{-4}	-3.17×10^{-4}	-4.88×10^{-4}
MAE ($\times 10^{-5} s^{-1}$)	EC-Earth	0.26	0.28	0.25	0.21
	CCSM4	0.47	0.44	0.41	0.41
MAPE (%)	EC-Earth	7.89	7.75	6.98	6.17
	CCSM4	14.34	12.47	11.50	11.90
RMSE ($\times 10^{-5} s^{-1}$)	EC-Earth	0.39	0.42	0.34	0.30
	CCSM4	0.63	0.62	0.60	0.59
r	EC-Earth	0.95	0.96	0.98	0.98
	CCSM4	0.90	0.92	0.94	0.93

8.2 Impacto do Aquecimento Global

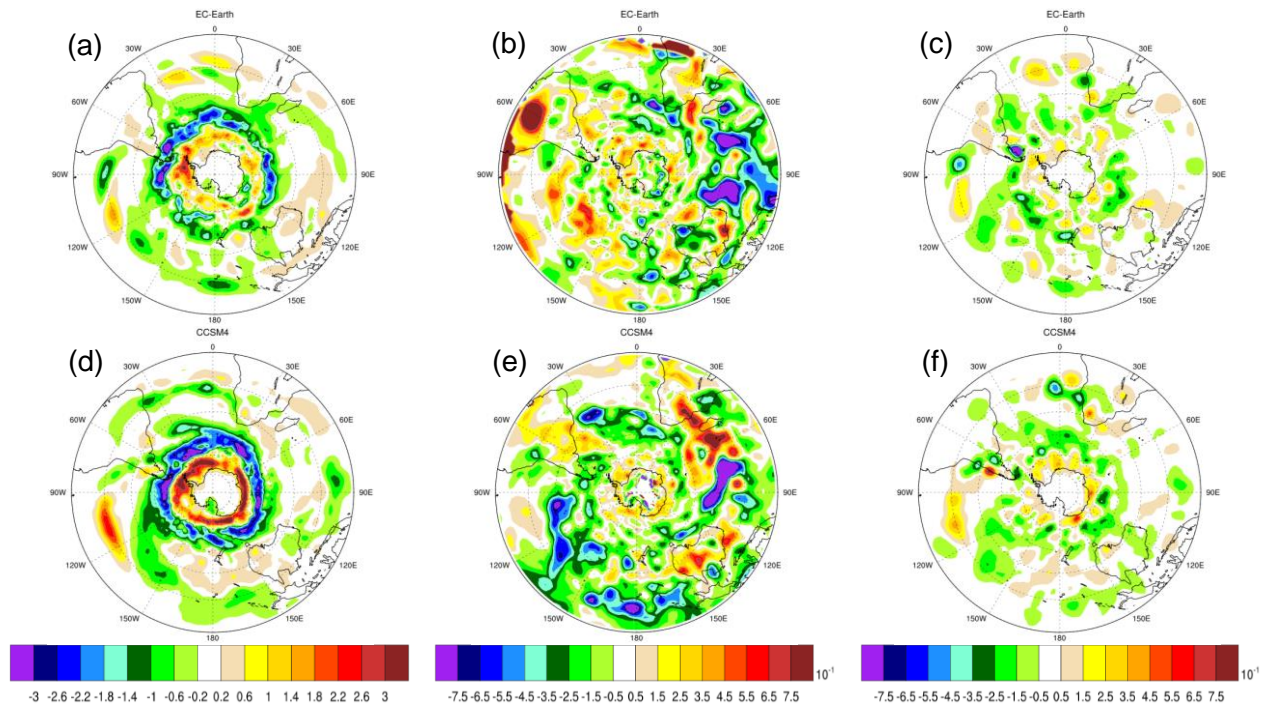


Figura 36 - Diferenças das estatísticas espaciais para o Verão do Hemisfério Sul (DJF) entre os períodos 21C (2061-2100) e 20C (1961-2000) para os modelos EC-Earth e CCSM4: (a, d) densidade de trajetória, (b, e) intensidade média e (c, f) densidade de ciclogénese do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente.

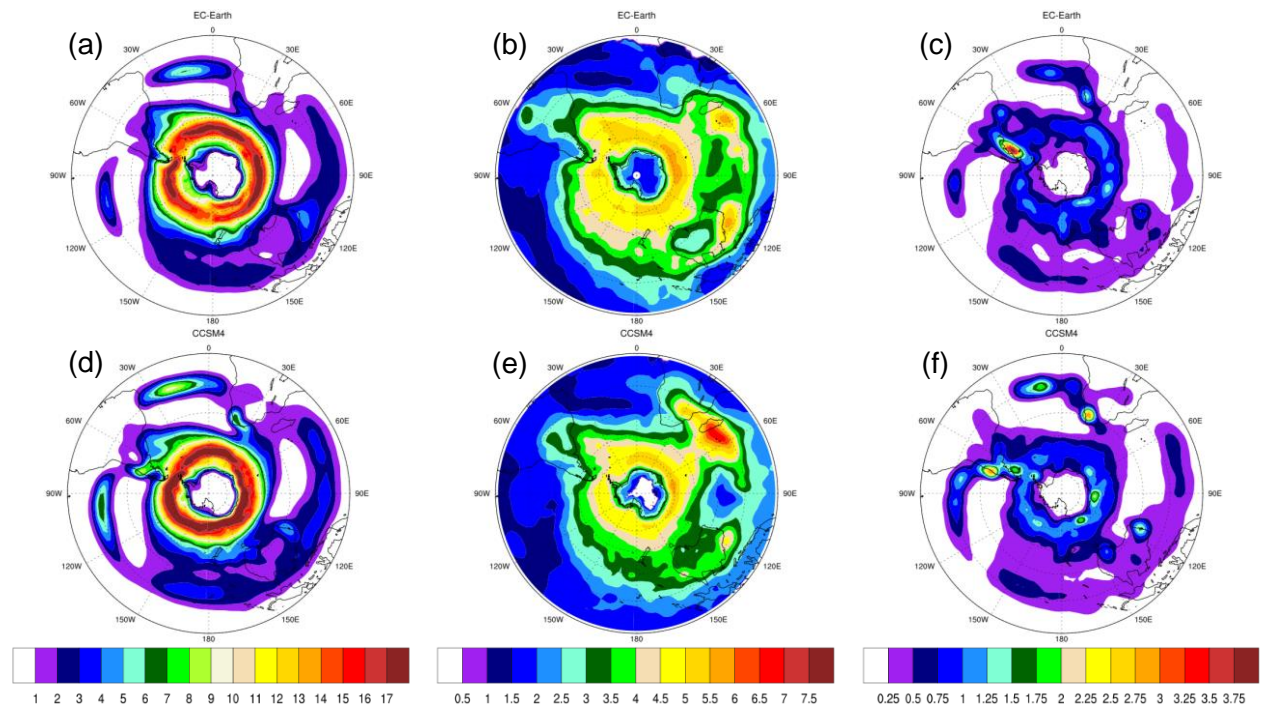


Figura 37 - Estatísticas espaciais para o Verão do Hemisfério Sul (DJF) para EC-Earth e CCSM4 (2061-2100): (a, d) densidade de trajetória, (b, e) intensidade média e (c, f) densidade de ciclogénese do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente. A intensidade média está em unidades de $10^{-5} s^{-1}$.

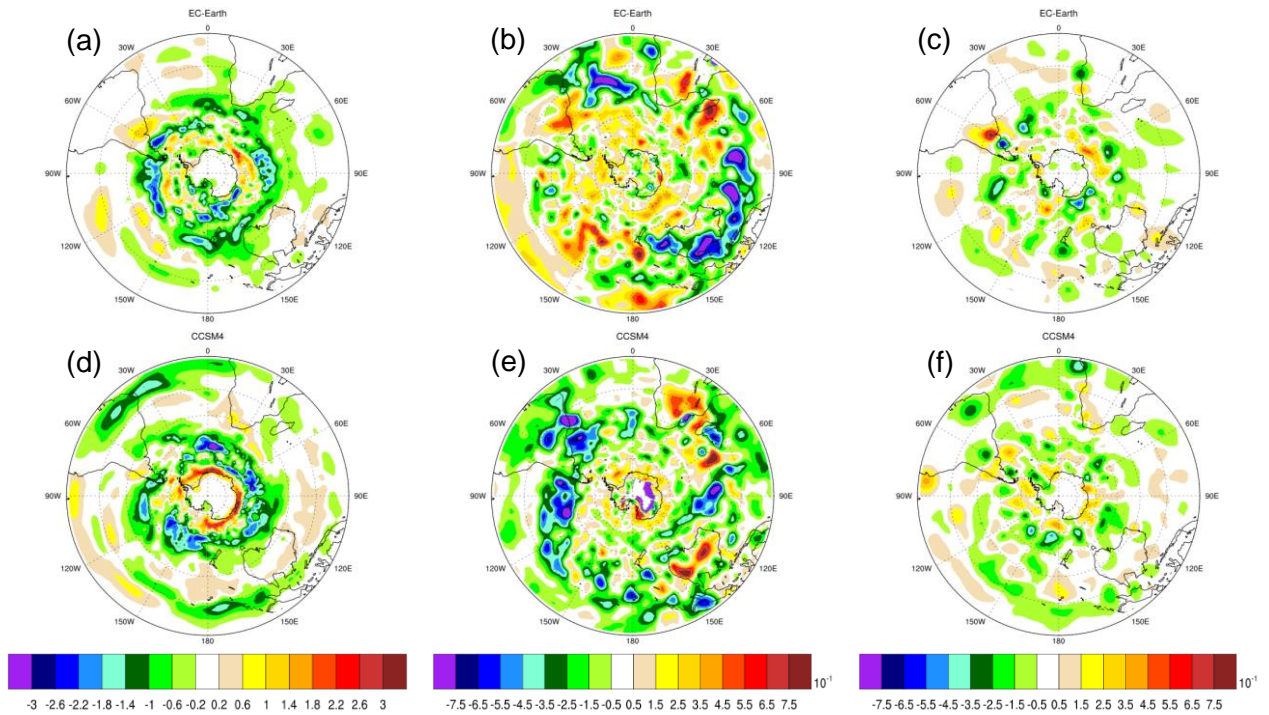


Figura 38 - Diferenças das estatísticas espaciais para o Outono do Hemisfério Sul (MAM) entre os períodos 21C (2061-2100) e 20C (1961-2000) para os modelos EC-Earth e CCSM4: (a, d) densidade de trajetória, (b, e) intensidade média e (c, f) densidade de ciclogênese do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente.

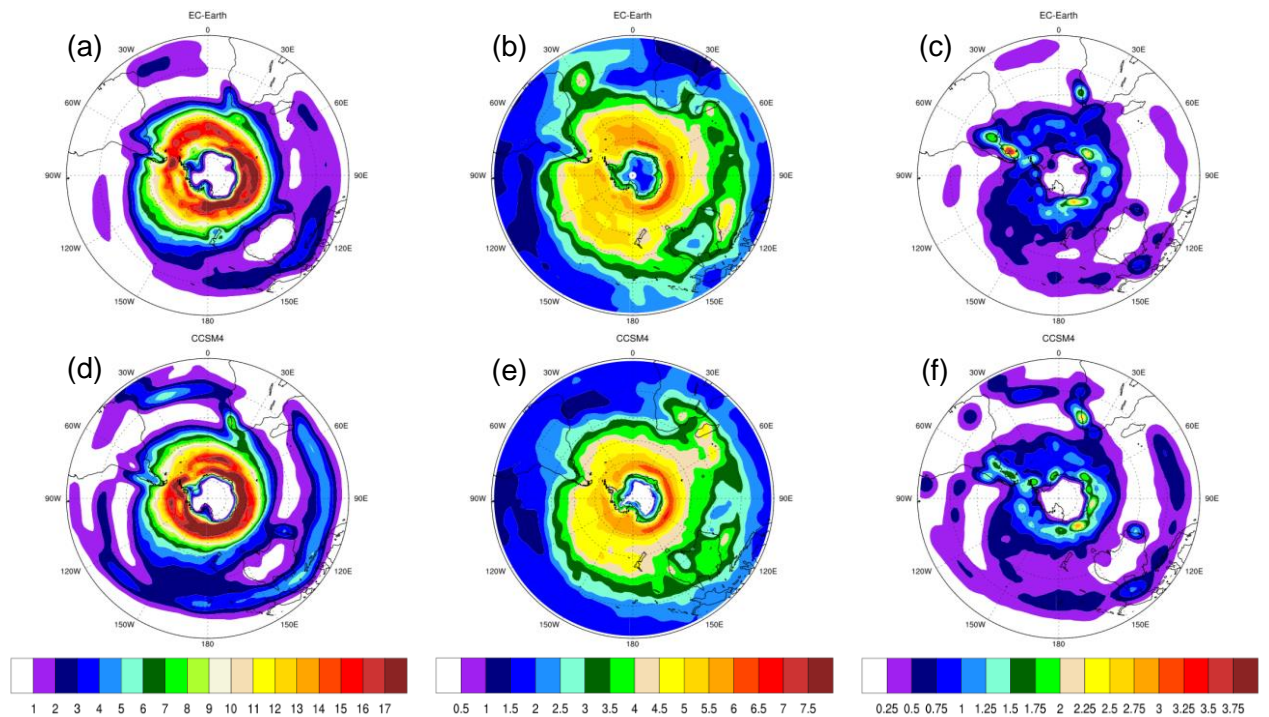


Figura 39 - Estatísticas espaciais para o Outono do Hemisfério Sul (MAM) para EC-Earth e CCSM4 (2061-2100): (a, d) densidade de trajetória, (b, e) intensidade média e (c, f) densidade de ciclogênese do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente. A intensidade média está em unidades de $10^{-5} s^{-1}$.

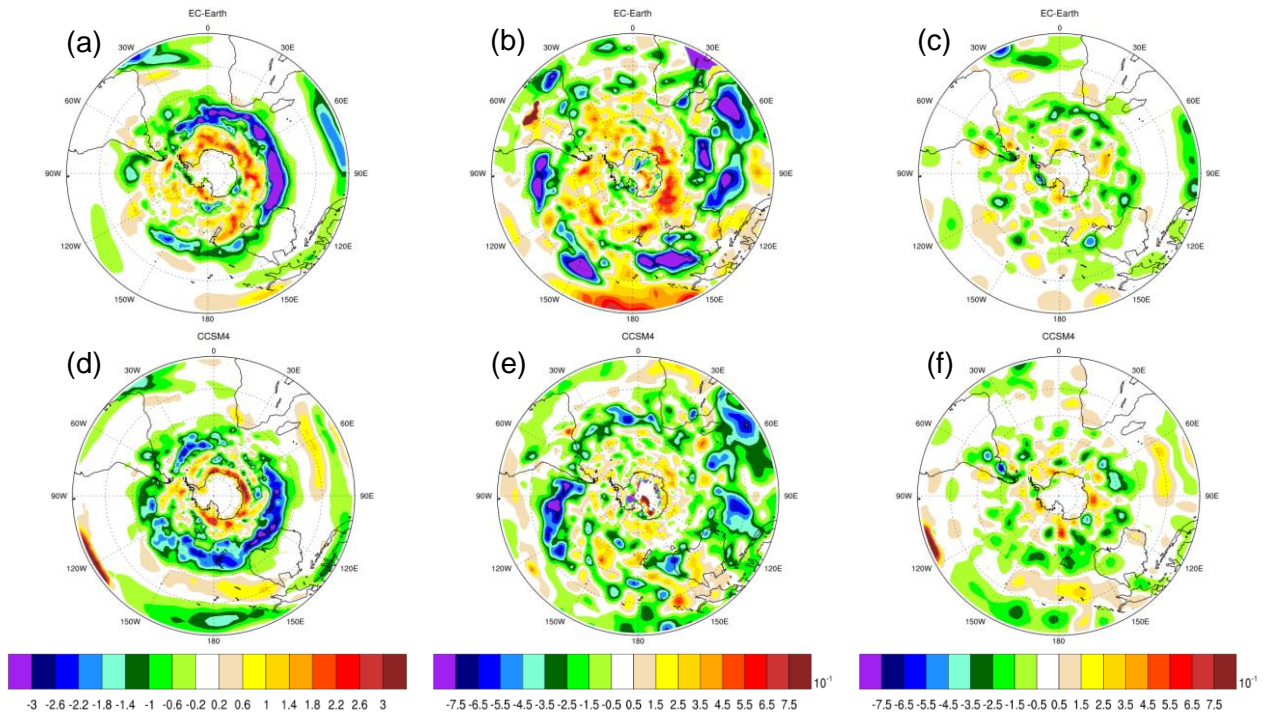


Figura 40 - Diferença das estatísticas espaciais para o Inverno do Hemisfério Sul (JJA) entre os períodos 21C (2061-2100) e 20C (1961-2000) para os modelos EC-Earth e CCSM4: (a, d) densidade de trajetória, (b, e) intensidade média e (c, f) densidade de ciclogênese do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente.

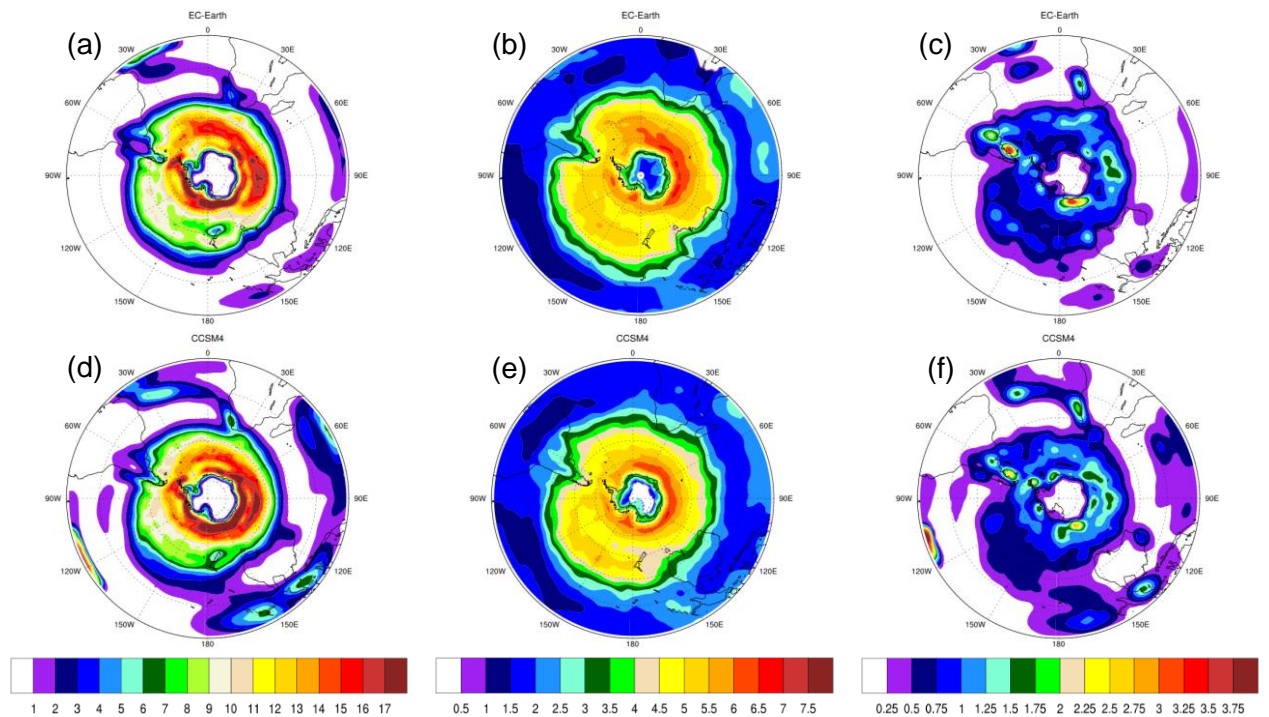


Figura 41 - Estatísticas espaciais para o Inverno do Hemisfério Sul (JJA) para EC-Earth e CCSM4 (2061-2100): (a, d) densidade de trajetória, (b, e) intensidade média e (c, f) densidade de ciclogênese do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente. A intensidade média está em unidades de $10^{-5} s^{-1}$.

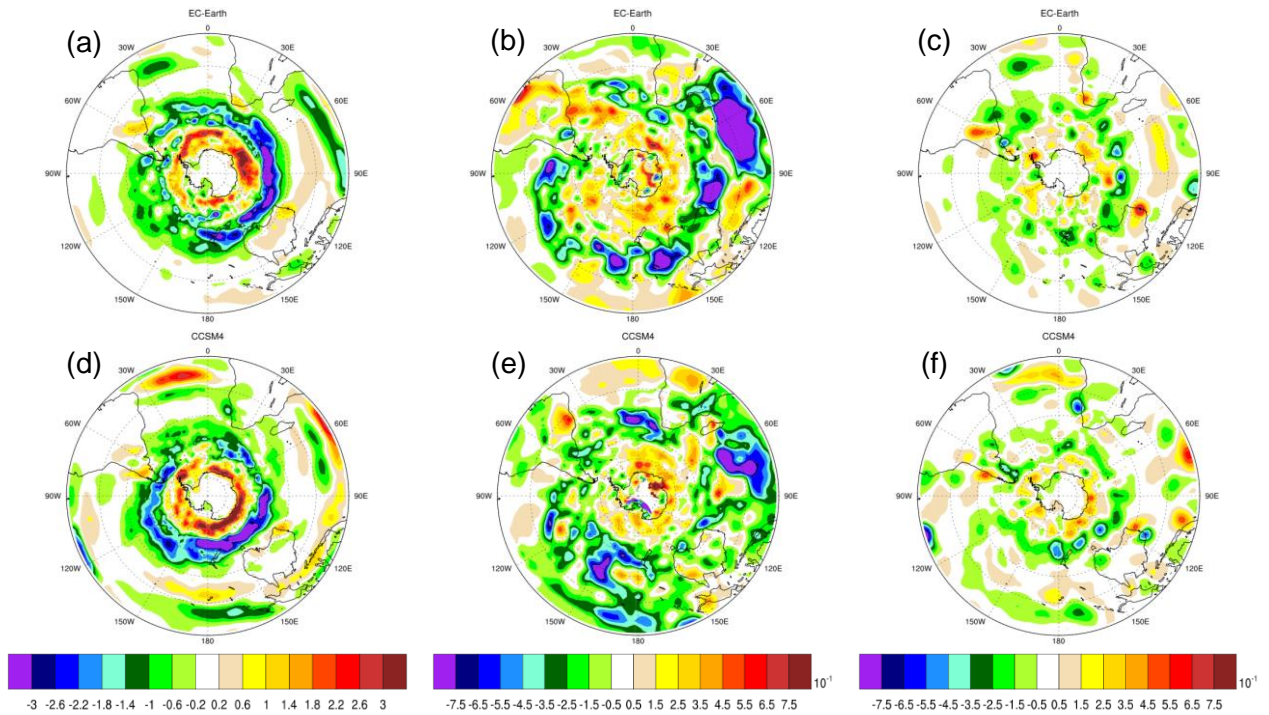


Figura 42 - Diferença das estatísticas espaciais para a Primavera do Hemisfério Sul (SON) entre os períodos 21C (2061-2100) e 20C (1961-2000) para os modelos EC-Earth e CCSM4: (a, d) densidade de trajetória, (b, e) intensidade média e (c, f) densidade de ciclogénese do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente.

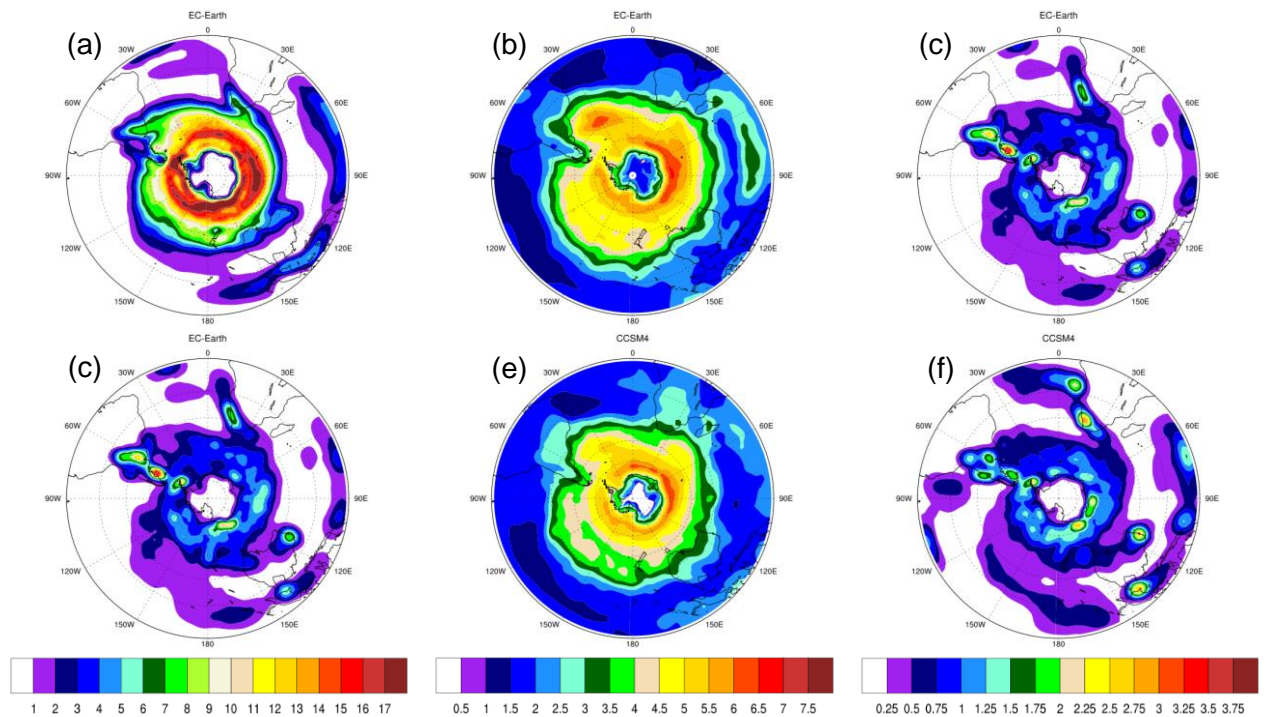


Figura 43 - Estatísticas espaciais para a Primavera do Hemisfério Sul (SON) para EC-Earth e CCSM4 (2061-2100): (a, d) densidade de trajetória, (b, e) intensidade média e (c, f) densidade de ciclogénese do EC-Earth e do CCSM4, respetivamente. A intensidade média em unidades de $10^{-5} s^{-1}$.

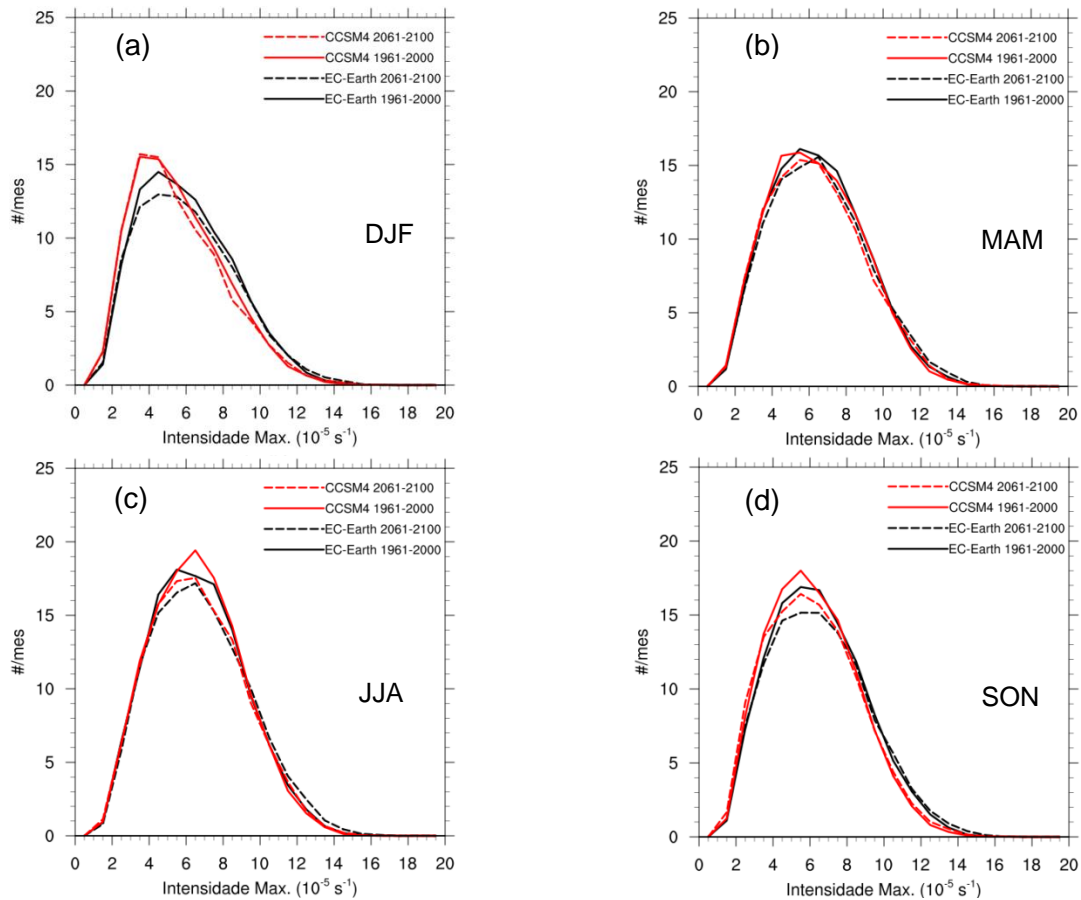


Figura 44 - Distribuição do número de tempestades ciclónicas por mês em função da sua intensidade máxima nos períodos 20C (—) e 21C (---) para os dois modelos globais, EC-Earth (preto) e CCSM4 (vermelho), para o HS, para cada estação, entre os 30° e 90°S: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON. A intensidade máxima está em unidades de $10^{-5} s^{-1}$.

Tabela 9 - Média do número de tempestades por estação para as latitudes extratropicais no HS.

	EC-Earth			CCSM4			ERA-Interim
	20C	21C		20C	21C		1979 – 2002
DJF	301.50	285.23	-5.40%	296.40	283.23	-4.44%	315.21
MAM	349.13	333.13	-4.58%	344.30	332.75	-3.35%	362.75
JJA	385.00	370.75	-3.70%	386.00	369.28	-4.33%	391.88
SON	357.35	342.15	-4.25%	357.10	344.35	-3.57%	367.08

Tabela 10 - Média do número de tempestades por estação para as latitudes extratropicais no HS, para tempestades que excedem um valor de intensidade de $> 8.0 \times 10^{-5} s^{-1}$.

	EC-Earth			CCSM4			ERA-Interim
	20C	21C		20C	21C		1979 – 2002
DJF	64.20	63.55	-1.01%	49.93	46.83	-6.21%	68.46
MAM	91.83	94.58	2.99%	89.25	85.63	-4.06%	102.38
JJA	108.23	113.40	4.78%	106.40	104.65	-1.64%	117.29
SON	92.40	96.15	4.06%	77.48	80.03	3.29%	91.08

9 Apêndice C – Domínios Regionais

Atlântico Este

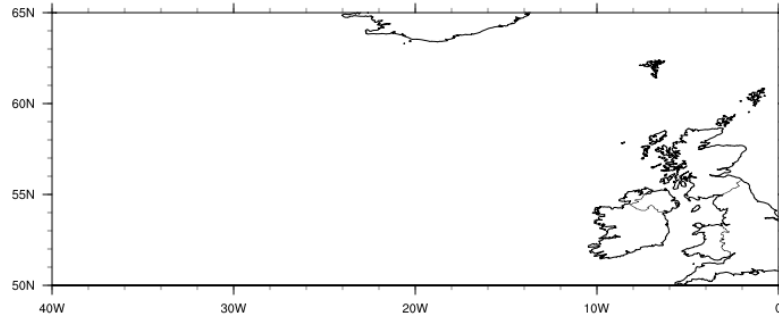


Figura 45 – Domínio geográfico da região Atlântico Este.

Índia

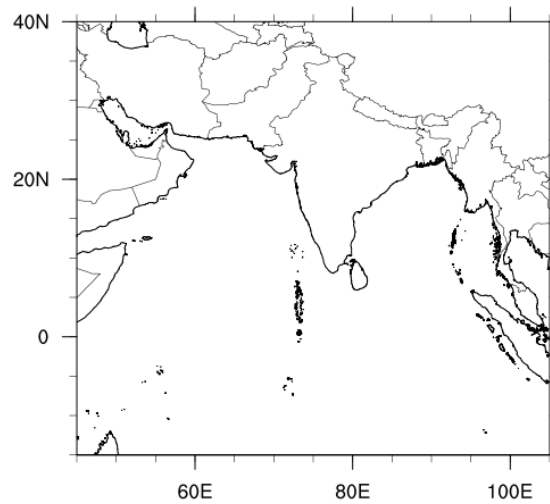


Figura 46 – Domínio geográfico da região da Índia.

Mediterrâneo

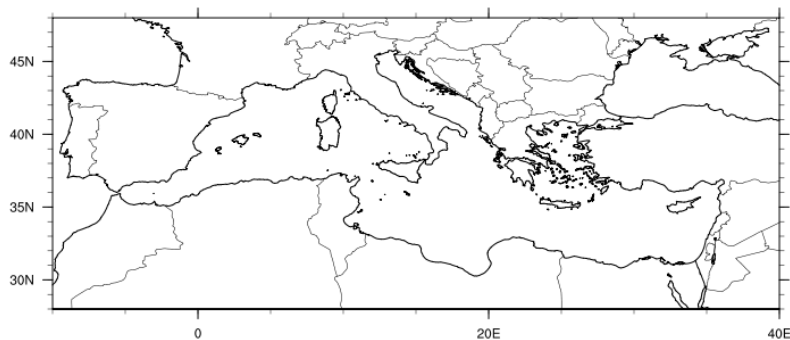


Figura 47 – Domínio geográfico da região do Mediterrâneo.

Norte da Europa

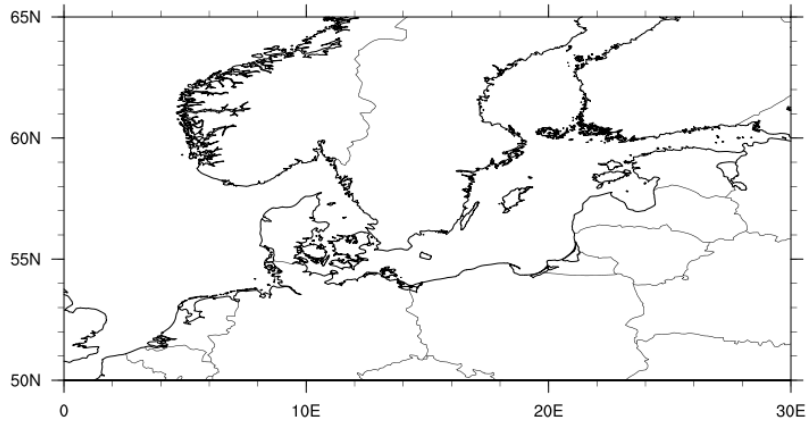


Figura 48 – Domínio geográfico da região Norte da Europa.

Pacífico Este

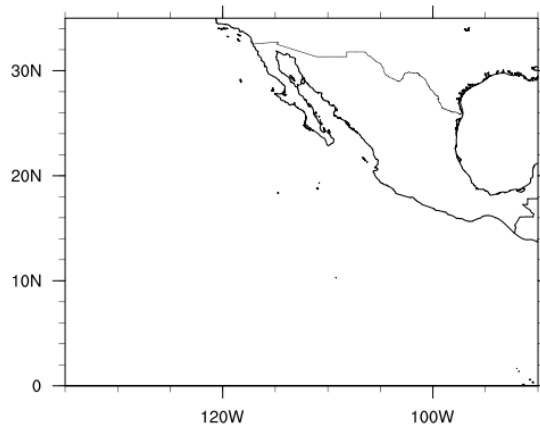


Figura 49 – Domínio geográfico da região Pacífico Este.

Pacífico Oeste

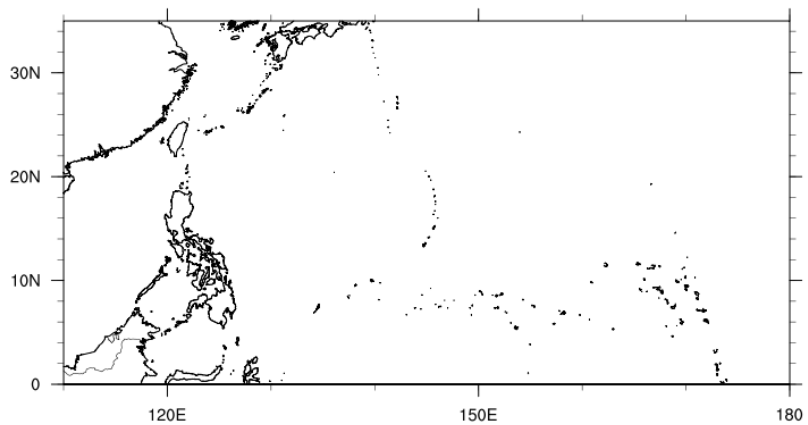


Figura 50 – Domínio geográfico da região Pacífico Oeste.

Região Principal de Desenvolvimento do Atlântico

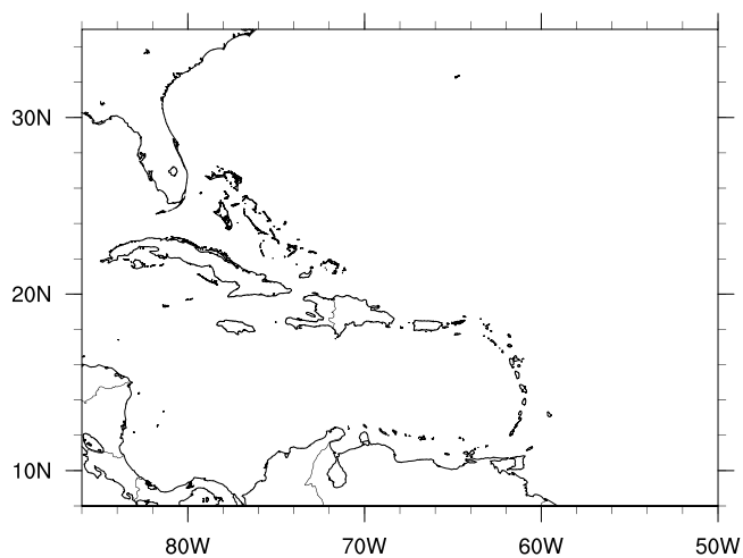


Figura 51 – Domínio geográfico da Região Principal de Desenvolvimento do Atlântico.