

Mudanças futuras de precipitação e temperatura no Brasil a partir dos níveis de aquecimento global de 1,5°C, 2°C e 4°C

Future rainfall and temperature changes in Brazil under global warming levels of 1.5°C, 2°C and 4°C

Diego Jatobá dos Santos^a

George Ulguim Pedra^b

Marcelo Guatura Barbosa da Silva^c

Carlos Augusto Guimarães Júnior^d

Lincoln Muniz Alves^e

Gilvan Sampaio^f

José Antônio Marengo^g

^a Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), São José dos Campos, SP, Brasil
End. Eletrônico: diego.santos@inpe.br

^b Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), São José dos Campos, SP, Brasil
End. Eletrônico: george.pedra@inpe.br

^c Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), São José dos Campos, SP, Brasil
End. Eletrônico: marcelo.guatura@inpe.br

^d Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), São José dos Campos, SP, Brasil
End. Eletrônico: carlos.guimaraesjr@gmail.com

^e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), São José dos Campos, SP, Brasil
End. Eletrônico: lincoln.alves@inpe.br

^f Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), São José dos Campos, SP, Brasil
End. Eletrônico: gilvan.sampaio@inpe.br

^g Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – Cemaden,
São José dos Campos, SP, Brasil
End. Eletrônico: jose.marengo@cemaden.gov.br

doi:10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33933

Received: 04/09/2020
Accepted: 10/11/2020

Os dados e os resultados apresentados nesta publicação foram desenvolvidos no âmbito do projeto “Quarta Comunicação Nacional e Relatórios de Atualização Bienal do Brasil à Convenção do Clima”, coordenado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, com apoio do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, por meio dos recursos do Fundo Global para o Meio Ambiente, aos quais oferecemos nossos agradecimentos.

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo analisar os impactos do aquecimento global de 1,5°C, 2°C e 4°C acima dos níveis pré-industriais sobre o território brasileiro. As mudanças projetadas entre os diferentes níveis de aquecimento global foram analisadas para a precipitação, temperatura e índices de extremos climáticos. As projeções utilizadas são oriundas do modelo climático global HadGEM3-A, derivadas do projeto internacional *High-End cLimate Impacts and eXtremes* (Helix), Reino Unido, forçado pela temperatura da superfície do mar e concentração de gelo marinho de um subconjunto de seis modelos climáticos globais do *Coupled Model Intercomparison Project phase 5* (CMIP5) e considerando o cenário de emissão *Representative Concentration Pathways* (RCP 8.5) ao longo do século XXI. As projeções indicam diferenças robustas nas características climáticas regionais. Essas diferenças incluem aumentos: na temperatura mínima e máxima do ar próximo à superfície para todas as regiões do País, nos extremos de calor, em particular no norte do País, na ocorrência de chuva intensa (regiões Sul e Sudeste) e na probabilidade de seca e déficits de chuva em algumas regiões (Norte e Nordeste).

Palavras-chave: Mudança do clima. Helix. Aquecimento global. Projeções climáticas. Modelos climáticos.

ABSTRACT

The present study analyzes the impacts of global warming of 1.5°C, 2°C, and 4°C above pre-industrial levels in the Brazilian territory. Climate change projected among the different global warming levels has been analyzed for rainfall, temperature and extreme climate indices. The projections are derived from the global climate model HadGEM3-A, from the High-End cLimate Impacts and eXtremes (HELIX) international project, from the United Kingdom, forced by sea surface temperature and sea ice concentration of a subset of six CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5) global climate models and considering the RCP 8.5 (Representative Concentration Pathways) emissions scenario throughout the 21st century. Projections indicate robust differences in regional climate characteristics. These differences include changes: in the minimum and maximum air temperature close to the surface to all the country's regions, in extremes of heat, particularly in northern Brazil, in the occurrence of heavy rainfall (Southern and Southeastern regions), and in the probability of droughts and rain deficits in some regions (Northern and Northeastern Brazil).

Keywords: Climate Change, HELIX, Global Warming, Climate projections, Climate models.

1 INTRODUÇÃO

Em decorrência de processos naturais, tais como a dinâmica das massas de ar, correntes marinhas, erupções vulcânicas, entre outros, o clima da Terra está sempre mudando ao longo do tempo, sendo a modelagem numérica essencial para aprimorar o conhecimento a respeito dos componentes do sistema climático (atmosfera, superfície terrestre, oceano, gelo marinho, etc.), bem como para elencar os possíveis impactos da mudança do clima em diversos setores importantes de um país (como, por exemplo, os de recursos hídricos, energético, agricultura, etc.).

O resultado dessa modelagem é um dos principais componentes nos estudos de vulnerabilidade climática e de elaboração de medidas e estratégias de adaptação às mudanças climáticas atuais e por

vir, servindo como base para análises de risco e vulnerabilidade, e para, assim, propor políticas de Estado para mitigação (IPCC, 2018; PBMC, 2013; TCN, 2016). Os modelos climáticos são ferramentas essenciais para investigar a resposta do sistema climático a várias forçantes, como as concentrações de gelo marinho, mudança de uso do solo, temperatura da superfície do mar, entre outras. Nesse sentido, eles permitem que se façam projeções não apenas de como a temperatura global média pode aumentar no século XXI, mas também de como essas mudanças podem afetar o clima no mundo todo (FLATO et al., 2013).

Para uma melhor compreensão de como as mudanças climáticas ocorrem em nível regional, é fundamental o acesso a informações mais detalhadas a respeito da região de estudo, como topografia, bacias hidrográficas e linhas costeiras. Com isso, torna-se importante o aumento da resolução espacial dos modelos climáticos globais (MCGs), que, em geral, têm baixa resolução espacial (da ordem de uma a duas centenas de quilômetros) devido ao alto custo computacional necessário para realizar simulações em escala global, e/ou utilizar técnicas de regionalização (conhecidas como *downscaling*) para traduzir as informações fornecidas pelos MCGs em uma escala espacial mais refinada (AMBRIZZI et al., 2019; CHOU et al., 2014; FLATO et al., 2013; MARENGO et al., 2012).

No Brasil, a modelagem numérica de clima teve início com as atividades operacionais do Cptec/Inpe, em 1995. Inicialmente, os modelos eram utilizados apenas para a realização de previsões numéricas de tempo (dias) e de clima sazonal (estações do ano) (CAVALCANTI et al., 2002; MARENGO et al., 2003, 2012). Porém, com o advento tecnológico e potentes supercomputadores, foi possível realizar projeções climáticas para a América do Sul. As primeiras projeções de mudanças climáticas sobre a América do Sul foram realizadas a partir de modelos climáticos regionais (AMBRIZZI et al., 2007; MARENGO; AMBRIZZI, 2006; MARENGO et al., 2009).

Esses primeiros estudos foram baseados nos resultados dos modelos regionais RegCM3 (GIORGI; MEARN, 1999; PAL et al., 2007), HadRMP3 (JONES et al., 2004) e Eta-CCS (PISNICHENKO; TARASOVA, 2009) para o período de 2070-2100, com uma alta resolução horizontal (50 km) e forçados pelo modelo global atmosférico HadAM3P, do Met Office Hadley Centre (MOHC) do Reino Unido, a partir dos cenários de emissões de GEE (A2 e B2).

Nas últimas décadas, tanto os MCGs quanto os modelos climáticos regionais (MCRs) têm tido grandes avanços na representação dos componentes do sistema climático, principalmente devido à melhor representação dos processos físicos e fenômenos a eles associados e as suas interações (MARENGO et al., 2012). Além disso, o avanço na tecnologia computacional vem contribuindo cada vez mais para o aumento na resolução espacial dos modelos climáticos, a exemplo dos modelos globais utilizados no projeto Helix (resolução de 40 km e 60 km), ao passo que, geralmente, os MCGs são executados usando resolução horizontal da ordem de uma a duas centenas de quilômetros.

A melhoria na resolução e nas parametrizações físicas dos modelos tem permitido uma representação mais detalhada das características da paisagem, como cordilheiras, lagos, tipos de vegetação e características do solo, levando a uma melhor caracterização do ciclo hidrológico e dos eventos extremos associados, bem como a uma representação mais realista do clima regional/local em comparação aos modelos com resoluções mais baixas (100 km – 200 km) (AMBRIZZI et al., 2019; CHOU et al., 2014; FLATO et al., 2013; NAUMANN et al., 2018).

Na temática das mudanças climáticas na política internacional, está em debate desde meados da década de 1990 a discussão sobre o estabelecimento de metas para limitar o aquecimento global em um limiar de temperatura predefinido em relação aos níveis pré-industriais (WBGU, 1995). Em 2010, a 16ª Conferência das Partes (COP16) da UNFCCC (do original em inglês *United Nations Framework Convention on Climate Change*), realizada em Cancun (México), resultou na formalização de uma série de acordos, como o de limitar a um máximo de 2°C o aumento da temperatura média global.

Posteriormente, na 21ª Conferência das Partes (COP21), em Paris (França), foi adotado um novo acordo, mais ambicioso, com o objetivo central de fortalecer a resposta global à ameaça da mudança do clima e de reforçar a capacidade dos países para lidar com os impactos decorrentes dessas mudanças. Em resposta a esse acordo, o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) elaborou o Relatório Especial sobre os impactos do aquecimento global de 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (IPCC SR1.5 2018) e entre as principais conclusões destaca-se que é provável que o aquecimento global atinja 1,5°C entre 2030 e 2052, caso continue a aumentar no ritmo atual, e projeta-se que os riscos de secas e inundações sejam maiores a 2°C, quando comparado ao aquecimento global de 1,5°C.

Alinhado às demandas da sociedade e aos desafios da comunidade científica no entendimento do complexo sistema climático, na última década um número crescente de estudos foi desenvolvido considerando os impactos de diferentes níveis de aquecimento médio global – GWL (*Global Warming Level*, em inglês) – em âmbito regional (domínio continental ou parte dele), a exemplo de Déqué et al. (2017), James e Washington (2013), Lennard et al. (2018), Nikulin et al. (2018), Vautard et al. (2014), entre outros.

Em geral, esses estudos revelam que os padrões de temperatura em nível regional não são determinados apenas pelos GWLs, mas também dependem fortemente da região – área natural marcada por um conjunto específico de elementos climáticos, geológicos, hidrográficos e da biosfera –, e da época do ano considerada. Além disso, a magnitude do aquecimento no nível de 1,5°C, 2°C ou superior (média global) pode ser muito maior em nível local, conduzindo a condições climáticas mais extremas e severas do que poderia ser, quando considerado apenas o padrão global.

A exemplo dos referidos estudos, no Brasil as projeções climáticas produzidas pelo modelo regional Eta-Cptec (CHOU et al., 2014a; CHOU et al., 2014b), alinhado aos modelos globais HadGEM2-ES e MIROC5 (CMIP5), foram adequadas aos GWLs 1,5°C, 2°C e 4°C a fim de subsidiar os estudos de medidas de vulnerabilidade climática e adaptação relacionados às seguranças hídrica, energética, alimentar e socioambiental do País no âmbito da Quarta Comunicação Nacional do Brasil (4CN) à UNFCCC. Para tanto, os períodos de tempo (*time slices*) 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100 nos estudos da 4CN correspondem aproximadamente aos GWLs de 1,5°C, 2°C e 4°C respectivamente.

No entanto, ainda é necessário e urgente um número maior de estudos que busquem quantificar os impactos associados ao aumento médio da temperatura global e as magnitudes desses impactos sob diferentes GWLs nas diversas regiões geográficas do Brasil. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é analisar as possíveis mudanças e seus impactos em se tratando das variáveis de precipitação e temperatura no território brasileiro sob condições de aquecimento global de 1,5°C, 2°C e 4°C acima dos níveis pré-industriais, a partir de um conjunto de experimentos desenvolvidos pelo MOHC no âmbito do projeto High-End cLimate Impacts and eXtremes (Helix).

A abordagem por níveis de aquecimento permite ponderar de forma mais categórica os impactos da mudança do clima sob cenários específicos de aquecimento médio global e, com isso, o presente trabalho tem potencial de contribuir para os estudos de vulnerabilidade e adaptação às mudanças climáticas em setores estratégicos do País, já anteriormente mencionados.

2 DADOS E METODOLOGIA

2.1 MODELO CLIMÁTICO GLOBAL (HADGEM3-A)

No presente estudo foi utilizada a versão do modelo climático mundial *Global Atmosphere Hadley Centre Model, version 3* – HadGEM3-A (WALTERS et al., 2017) desenvolvida no *Met Office Hadley Centre*, em Exeter, Reino Unido, a qual fez parte do projeto *High-End cLimate Impacts and eXtremes*

(HELIX) e da Fase 6 do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP6; EYRING et al., 2016). Com melhorias em suas parametrizações físicas e inclusão de novas funcionalidades, o referido modelo, assim como o EC-EARTH3.1 (também utilizado no projeto Helix) do *Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), Suécia*, representam atualmente o estado da arte em termos de representação do sistema climático global (FLATO et al., 2013).

As simulações obtidas pelo modelo HadGEM3-A foram realizadas em alta resolução espacial (60 km), considerando como condições de contorno a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e a concentração de gelo marinho provenientes de um subconjunto de seis modelos globais do CMIP5 (Tabela 1). Desse modo, cada projeção do clima futuro refere-se à integração do modelo HadGEM3-A com seis variantes de TSM e concentração de gelo marinho, fornecendo assim um conjunto de seis projeções para até o final do século XXI. Informações detalhadas das principais características e referências desse subconjunto de modelos podem ser obtidas em Flato et al. (2013).

Tabela 1 | Conjunto de simulações (realizações) globais a partir do modelo HadGEM3-A (projeto Helix) em combinação com seis modelos do CMIP5 (modelos forçantes). Os períodos em que os GWLs são alcançados para cada experimento realizado também são listados.

Modelo Atmosférico	Simulação HELIX	Modelo forçante CMIP5	GWL1,5	GWL2	GWL4
HadGEM3-A	r1	IPSL-CM5A-LR	2006-2036	2020-2050	2056-2086
HadGEM3-A	r2	GFDL-ESM2M	2021-2051	2037-2067	*
HadGEM3-A	r3	HadGEM2-ES	1998-2028	2018-2048	2056-2086
HadGEM3-A	r6	IPSL-CM5A-MR	2005-2035	2020-2050	2055-2085
HadGEM3-A	r8	MIROC-ESM-CHEM	2000-2030	2017-2047	2053-2083
HadGEM3-A	r9	ACCESS1-0	2012-2042	2024-2054	2066-2096

* o modelo correspondente não atingiu o GWL4 até o final da projeção (2100).

Fonte: Elaboração própria.

Os experimentos a partir do modelo HadGEM3-A consideraram o cenário de emissão *Representative Concentration Pathways* (RCP 8.5), o qual corresponde a um cenário de alta emissão das concentrações de GEE, em que o CO₂ equivalente excede a 1000 partes por milhão (ppm) – em volume até o final do século XXI e, com isso, o forçamento radiativo atinge 8,5 W/m² (watt por metro quadrado) até o ano 2100, o que permite avaliar os efeitos das mudanças climáticas sob diferentes níveis de aquecimento (VUUREN et al., 2011).

2.2 NÍVEL DE AQUECIMENTO GLOBAL (GWL)

O conceito de nível de aquecimento (GWL) representa a variação média da anomalia global da temperatura do ar à superfície em relação ao período pré-industrial (1861-1880) (NAUMANN et al., 2018), ou seja, o aumento ou diminuição de temperatura ao longo dos anos em relação a tal período. Tal abordagem foi trabalhada por cientistas da Universidade de Exeter e do *Met Office Hadley Centre*, ambas do Reino Unido, em parceria com diversas instituições europeias, na execução do projeto Helix (RICHARDSON; BRADSHAW, 2017; WYSER et al., 2017).

Neste trabalho, adotou-se como definição para GWL, o momento no qual o valor específico de aquecimento (1,5°C, 2°C e 4°C) calculado em relação ao período pré-industrial é atingido, considerando as projeções das médias globais da temperatura anual. O ano no qual cada GWL foi encontrado pela primeira vez foi considerado como o ano central, e em torno deste foram adicionados os 15 anos que o antecedem e os 15 anos que o sucedem, totalizando um período de 31 anos para cada GWL. Assim, para cada uma das simulações futuras, foram determinados os períodos correspondentes a cada GWL analisado (1,5°C, 2°C e 4°C) no presente estudo, conforme listado na Tabela 1. O valor de + 0,61°C foi

assumido como sendo o valor observado de aquecimento entre o período pré-industrial até o período-base utilizado neste trabalho: 1981 a 2010 (HadCRUT4, MORICE et al., 2012).

2.3 ÍNDICES DE EXTREMOS CLIMÁTICOS

O cálculo dos índices climáticos extremos de temperatura e precipitação (Tabela 2) teve como base as metodologias descritas no estudo de Frich et al. (2002) e que começaram a ser usados pelo IPCC a partir de 2007.

Tabela 2 | Índices de extremos climáticos de temperatura máxima (TX) e precipitação (PRCP)

Índice	Definição	Unidade
TX90p	Número de dias com TX > percentil 90	dias
RX5day	Quantidade máxima de precipitação acumulada em cinco dias	mm
CDD	Número máximo de dias secos consecutivos (PRCP < 1 mm)	dias

Fonte: Frich et al. (2002).

Para as análises a respeito do índice de temperatura máxima extrema (TX90p) e das variáveis temperatura mínima e máxima, foi utilizado o conjunto de dados diários de temperatura do *Climate Prediction Center/National Oceanic and Atmospheric Administration (CPC/NOAA)*¹. Por outro lado, para as análises envolvendo a precipitação e os índices RX5day e CDD, foi utilizada a base de dados de precipitação diária do *Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations – Chirps*² (FUNK et al., 2015). A respeito da metodologia empregada no cálculo da tendência linear (seção 3.1), uma breve descrição pode ser obtida em Satyamurty et al. (2010).

3 RESULTADOS

3.1 TENDÊNCIA DO CLIMA ATUAL NO BRASIL

Na Figura 1 são mostradas as tendências ocorridas nas últimas décadas (1980-2018) no Brasil para a temperatura do ar (máxima e mínima), precipitação e os índices climáticos extremos TX90p, RX5day e CDD para diferentes estações sazonais do ano, verão (dezembro-janeiro-fevereiro), outono (março-abril-maio), inverno (junho-julho-agosto), primavera (setembro-outubro-novembro), e anual.

Uma tendência de aquecimento (da ordem de 0,5°C por década) é observada nas temperaturas mínimas e máximas em todas as regiões do País e em todas as estações do ano (Figura 1, colunas 1 e 2). O setor mais ao centro do País e a região Norte se destacam durante as estações de inverno e primavera onde os incrementos são de até 1°C/década. Uma tendência de resfriamento de até 0,5°C/década é observada, porém de forma pontual em algumas áreas do País (noroeste do Amazonas, leste de Mato Grosso, interior da Paraíba e Pernambuco, sul de Minas Gerais, leste do estado de São Paulo e no Rio Grande do Sul), principalmente para a temperatura mínima durante a estação de outono. Ressalta-se que os incrementos observados nas últimas décadas para a maior parte do País estão em concordância com as tendências positivas de temperatura do ar próxima à superfície verificadas em outros estudos, como em Schwingshackl et al. (2018) e Simmons et al. (2017).

1 | <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/>

2 | <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>

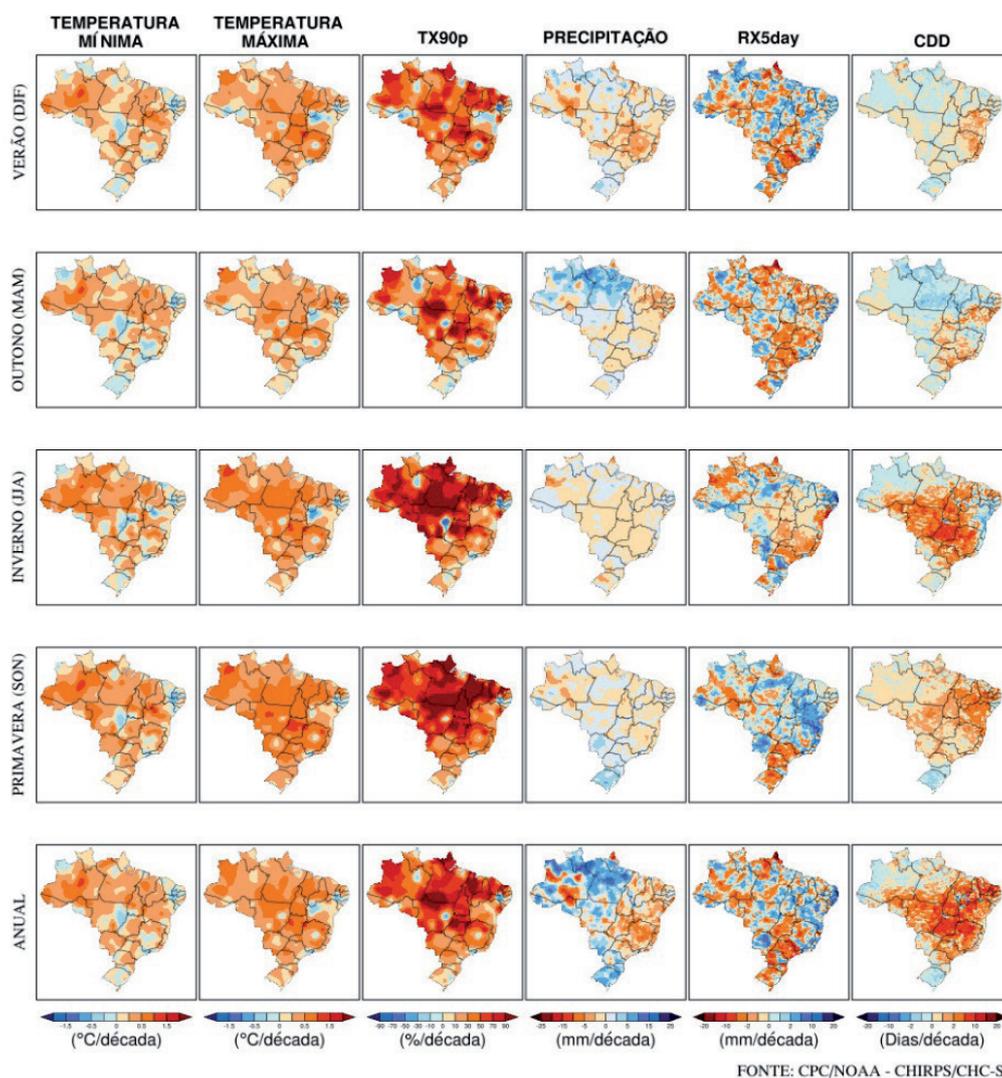


Figura 1 | Tendência linear da temperatura mínima e máxima (graus Celsius/década), do número de dias com temperatura máxima acima do percentil 90 – TX90p (%/década), da precipitação (mm/década), quantidade máxima de precipitação acumulada em cinco dias – RX5day (mm/década) e do número máximo de dias secos consecutivos – CDD (dias/década), no período de 1980-2018.

Fonte: CPC/NOAA e CHIRPS/CHC-SB.

Um aumento no número de dias com temperatura máxima extrema – TX90p (Figura 1, coluna 3) também é observado ao longo do período analisado (1980-2018). O incremento é superior a 30% por década em praticamente todo o País, com destaque para a região centro-norte do País e norte da Região Nordeste, por apresentar aumentos expressivos em todas as escalas temporais, principalmente durante as estações de inverno (JJA) e primavera (SON), nas quais a tendência de aumento dos casos chega a ser superior a 90%.

Diferentemente das temperaturas, a tendência de precipitação (Figura 1, coluna 4) evidencia uma grande variabilidade espacial. Para o extremo norte da Região Norte, centro-leste do Nordeste e na Região Sul do País nota-se um aumento dos totais acumulados de precipitação ao longo das estações sazonais. Padrão oposto (redução) é verificado no sudoeste da Região Norte, com tendência de redução total da ordem de 20 mm ao longo das últimas quatro décadas. Considerando que durante o verão (DJF) tem-se climatologicamente o período com maior volume de precipitação na Região Norte e que durante a referida estação essa região contribui fortemente para os regimes de chuva nas regiões Centro-Oeste e Sudeste do País (ESCOBAR; MATOSO, 2018; REBOITA et al., 2010; SILVA et al., 2019), essa tendência negativa também é observada nas regiões supracitadas, principalmente nos estados de Goiás, Minas Gerais e Espírito Santo, nos quais essa redução (5 mm/década) é verificada de forma mais proeminente.

Em suma, verifica-se, ao longo de todas as estações, uma tendência negativa de precipitação no sul do Amazonas, norte de Rondônia, nos estados do Tocantins e Goiás, e nas regiões Sudeste e Nordeste do País, e um incremento positivo na faixa norte da Região Norte (principalmente no norte do Amazonas, Roraima, metade norte do Pará e sul do Amapá), bem como na maior parte da Região Sul do Brasil.

Esses comportamentos ficam mais evidentes na escala anual, na qual nota-se um padrão mais marcante de tendência positiva ao longo das últimas décadas no extremo norte da Região Norte (de até 40 mm totais), na Região Sul (até 20 mm), e em áreas dos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, porém, de forma menos acentuada. Por outro lado, nas demais áreas do País, englobando os estados da Região Nordeste, Região Sudeste e parte leste da Região Centro-Oeste, é observada uma tendência de redução no regime de precipitação da ordem de 20 mm entre 1980-2018.

A respeito dos eventos extremos de precipitação (RX5day) (Figura 1, coluna 5), nota-se um incremento anual positivo principalmente no leste da Região Nordeste, no estado da Bahia, no leste da Região Sudeste, em grande parte da Região Centro-Oeste (com exceção do estado de Goiás) e em áreas intercaladas na Região Norte. Nessas áreas os totais pluviométricos dos eventos extremos tiveram um acréscimo da ordem de 8 mm a 40 mm nas últimas décadas. As maiores magnitudes são observadas no leste do Nordeste (com destaque para a faixa litorânea dos estados do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Alagoas), onde uma persistência da tendência positiva é observada também nas escalas sazonais, principalmente durante o inverno (JJA). Isso sugere que o aumento levemente positivo na tendência de precipitação (Figura 1, coluna 4) para essa faixa do Nordeste durante o referido trimestre, como citado anteriormente, possivelmente está associado a esses incrementos nos eventos extremos de precipitação.

Em relação às tendências do número máximo de dias secos consecutivos (Figura 1, coluna 6), observa-se uma tendência de aumento principalmente nas estações de inverno e primavera na faixa sul da Região Norte, norte e oeste da Região Nordeste e nas regiões Centro-Oeste e Sudeste do País, indicando uma possível intensificação da estação seca nessas áreas, principalmente na região correspondente ao “arco do desmatamento” e ao bioma Cerrado.

O acréscimo acentuado na tendência dos eventos de dias secos consecutivos também é evidente no campo anual para essas áreas, bem como para a Região Nordeste como um todo. Com isso, tal condição tem o potencial de agravar ainda mais algumas questões socioambientais relacionadas ao período de estiagem nessas regiões, como o aumento dos focos de queimadas, deficiência hídrica no solo – que, por sua vez, implica em impactos severos na produtividade das safras de *commodities* agrícolas exportadas pelo Brasil –, bem como o aumento dos riscos à saúde humana devido à baixa umidade do ar durante o período de estiagem (PBMC, 2013).

Cabe ressaltar que as séries temporais analisadas na Figura 1 apresentaram tendências estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95% (teste de *Mann-Kendall*) para todas as variáveis e índices abordados. Isso foi verificado para a maior parte do território brasileiro (figura não disponibilizada), com exceção de algumas áreas na Região Sul durante as estações de outono e inverno, e no leste do Nordeste em se tratando das tendências de temperatura mínima. Ademais, os resultados apresentados nesta seção estão, em geral, de acordo com estudos prévios que investigaram os aspectos físicos, dinâmicos e termodinâmicos dos fenômenos atmosféricos e oceânicos (CARVALHO et al., 2002; LIEBMANN et al., 2004; MARENGO et al., 2010).

Esses estudos têm ressaltado que o clima do Brasil está mudando, em particular a frequência de eventos extremos de precipitação, que estão ocorrendo com uma maior intensidade (PBMC, 2013), da mesma forma que a variabilidade das temperaturas e precipitação aparenta também estar sofrendo alterações importantes. Os resultados corroboram as análises de Dunn et al. (2020), que mostram que para o período de 1901-2018 observam-se aumentos no índice TX90p (dias quentes) e redução do índice TX10p (noites frias) em todo o Brasil, sendo as mudanças maiores no inverno – JJA. Os autores também

mostram que os índices de extremos de chuva R10 mm e R95p apresentam redução no Nordeste e aumento na Região Sul e em parte das regiões Sudeste, Centro-Oeste e oeste da Amazônia.

3.2 PROJEÇÕES DE MUDANÇAS NA PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA

Na Figura 2 é mostrada a mudança anual de precipitação sobre o Brasil, projetada para diferentes níveis de aquecimento (1,5°C, 2°C e 4°C) e em relação à média do período 1981-2010 (clima atual) a partir dos resultados do modelo HadGEM3-A forçado com as TSMs e gelo marinho de um subconjunto de modelos do CMIP5 (Tabela 1). Algumas similaridades são notadas entre os diferentes níveis de aquecimento e experimentos realizados (combinação do modelo HadGEM3-A com os modelos forçantes).

Os padrões de mudanças são aproximadamente similares, divergindo somente em magnitude, ou seja, à medida que se aumenta o nível de aquecimento, as mudanças projetadas se tornam maiores. Em geral, projeta-se redução de precipitação sobre grande parte da Amazônia (15% a 30%), enquanto que no sul da Região Sudeste e na Região Sul do País nota-se um aumento, que é mais intenso no GWL4, com incremento de precipitação em torno de 25% ao ano. Nota-se, também, que à medida que o GWL aumenta, as áreas de mudança se expandem em direção ao centro do território brasileiro. Esses padrões são coerentes nos diferentes modelos forçantes, o que corrobora uma menor incerteza nas projeções.

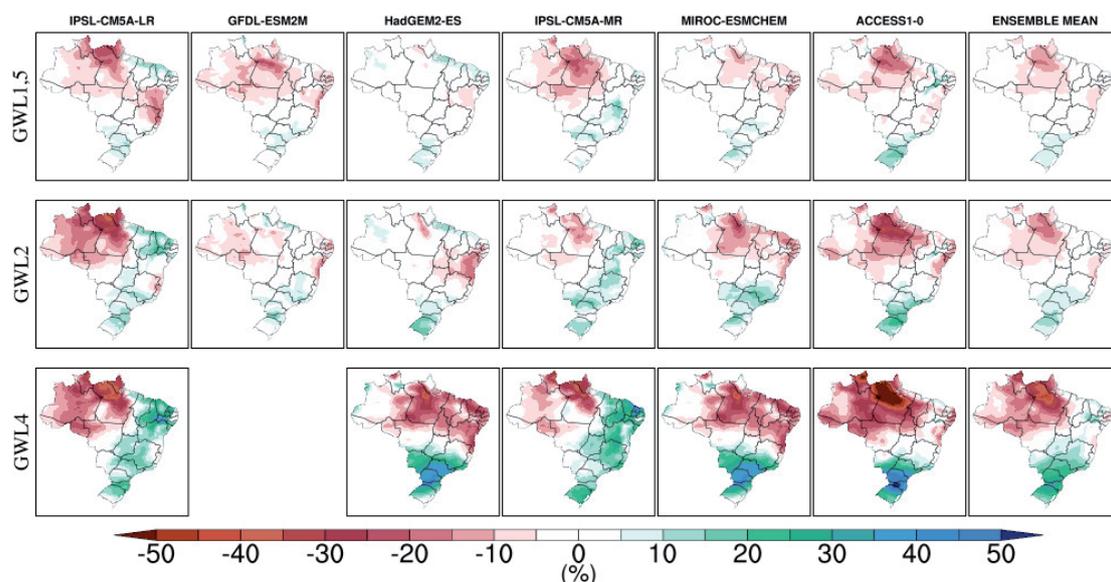


Figura 2 | Projeções de precipitação: variação da precipitação anual (%) em relação ao período de referência (1981-2010) de acordo com o GWL1,5, GWL2 e GWL4 de cada experimento realizado com o modelo HadGEM3-A.

Fonte: Projeto Helix.

Em relação às projeções de mudanças das temperaturas mínima e máxima (Figuras 3 e 4, respectivamente), há indicação de aumento de temperatura sobre todas as regiões do Brasil, sendo este igual ou superior ao GWL, ou seja, podendo ultrapassar os limiares predefinidos de 1,5°C, 2°C e 4°C.

A maioria das simulações analisadas apresenta um incremento expressivo nas temperaturas mínimas e máximas para todos os GWL abordados, com destaque para as simulações com os modelos *IPSL-CM5A-LR*, *IPSL-CM5A-MR* e *ACCESS1-0*. Por outro lado, os menores incrementos são apresentados pelo subconjunto formado pelo *HadGEM2-ES* e *MIROC-ESM-CHEM*. O modelo *GFDL-ESM2M*, apesar de também se destacar pelo incremento nas temperaturas nos níveis de GWL 1,5°C e 2°C, não atingiu a temperatura de 4°C na média global. Diante dessa situação, as projeções associadas a esse modelo para o GWL4 não são apresentadas.

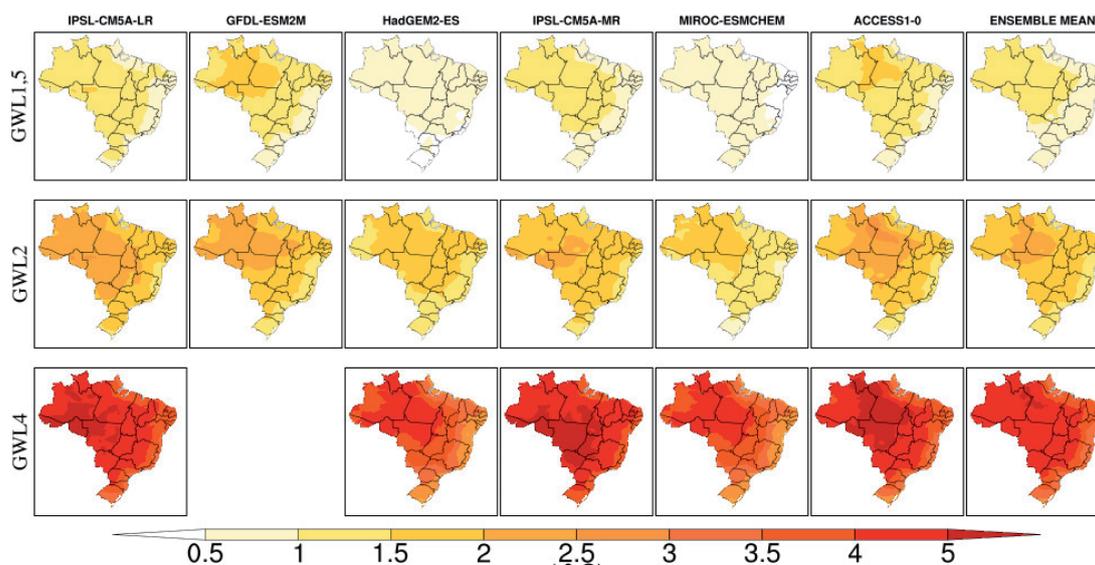


Figura 3 | Projeções de temperatura: variação da média anual de temperatura mínima (°C) em relação ao período de referência (1981-2010) de acordo com o GWL1,5, GWL2 e GWL4 de cada experimento realizado com o modelo HadGEM3-A.

Fonte: Projeto Helix.

Analisando as Figuras 3 e 4 conjuntamente, é possível identificar que o centro-sul da Região Norte e o Centro-Oeste do Brasil apresentam as maiores possibilidades de alterações severas quanto ao aumento de temperatura, sendo essas as principais regiões onde as temperaturas mínima e máxima sofrem incrementos expressivos e em igual proporção, sugerindo uma mudança drástica em seus padrões climatológicos de temperaturas e corroborando as projeções apresentadas na Figura 2, onde as estas mostram redução significativa na precipitação.

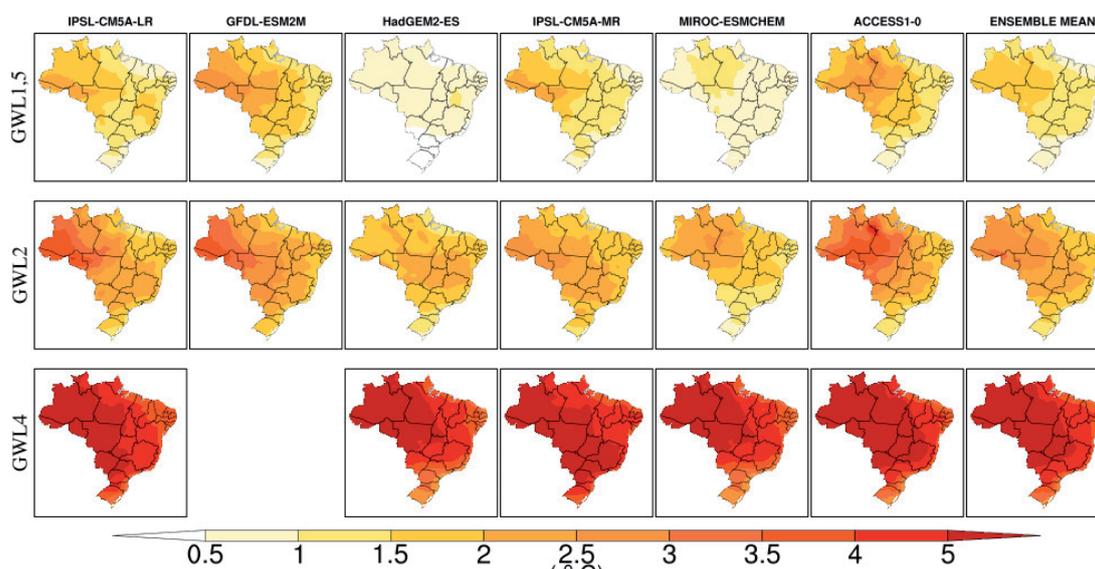


Figura 4 | Projeções de temperatura: variação da média anual de temperatura máxima (°C) em relação ao período de referência (1981-2010) de acordo com o GWL1,5, GWL2 e GWL4 de cada experimento realizado com o modelo HadGEM3-A.

Fonte: Projeto Helix.

No presente tópico, foram analisadas as possíveis mudanças climáticas no contexto da média anual da precipitação e temperatura. Entretanto, não são apenas as mudanças nos padrões médios que

são relevantes para caracterização do clima. Sobre esse aspecto, os extremos climáticos podem ser igualmente importantes, pois têm uma forte influência sobre os ecossistemas naturais e em atividades humanas, como a agricultura, pecuária, gestão da água, transporte, energia e turismo (PBMC, 2013).

3.3 PROJEÇÕES DE MUDANÇA NOS EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS

As projeções indicam um crescente aumento de eventos extremos de secas e estiagens prolongadas (Figura 5), principalmente no norte das regiões Norte e Nordeste, sendo que tais mudanças tornam-se mais proeminentes no GWL4 e em particular no inverno (Figura 5b), com os estados do Amapá, norte do Pará e praticamente toda a Região Nordeste apresentando um aumento substancial no número de dias secos consecutivos. Ainda sobre a Figura 5b e o GWL4, há uma divergência entre os modelos sobre a redução ou aumento no período de estiagem sobre as regiões Sudeste e Centro-Oeste. Vale ressaltar que esse aumento de dias secos consecutivos (em conjunto com o aumento das temperaturas) tem o potencial de intensificar o risco de ocorrência de queimadas, bem como de mudar o comportamento espaço-temporal da precipitação, o que, conseqüentemente, aumenta a vulnerabilidade dos ecossistemas.

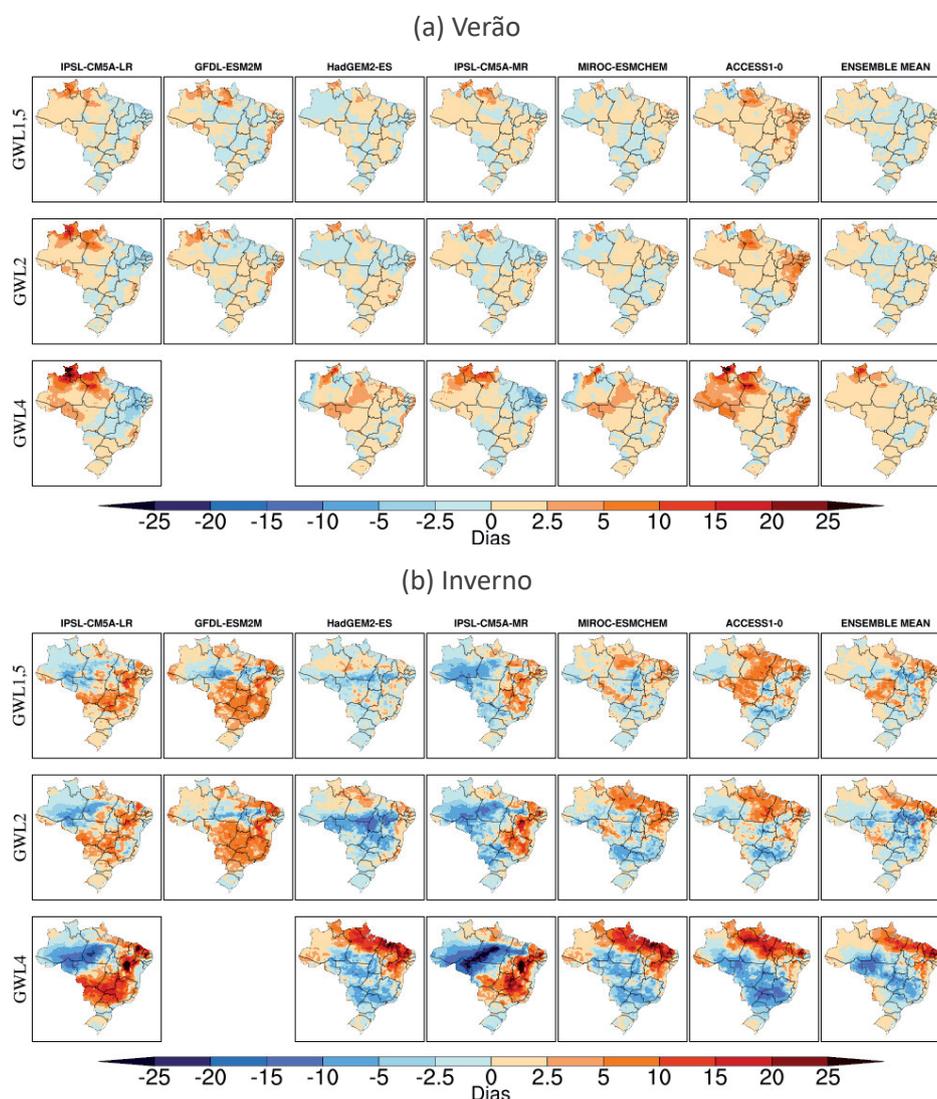


Figura 5 | Projeções de extremos climáticos: número de dias secos consecutivos – CDD em relação ao período de referência (1981-2010) para o GWL 1,5, GWL2 e GWL4 no verão (a) e inverno (b) para cada experimento realizado com o modelo HadGEM3-A.

Fonte: Projeto Helix.

Embora os resultados apresentados na Figura 5 indiquem o aumento significativo na ocorrência de secas prolongadas ou estiagens na Região Nordeste, o indicador apresentado na Figura 6 traz a informação de como os máximos de precipitação serão distribuídos. Durante o verão (Figura 6a), os estados do Amazonas e Pará mostram relativa redução no percentual de precipitação acumulado durante esses eventos de extremos de precipitação.

Em contrapartida, nas demais áreas do País, há uma indicação de aumento significativo, cujo padrão é observado em todos os GWLs. Já durante o inverno (Figura 6b), a ocorrência desses extremos se estende por toda a região Norte e Sul. Entretanto há uma maior dispersão entre as projeções dos modelos, principalmente no GWL 1,5 e 2 para áreas do leste da Região Centro-Oeste e norte da Região Sudeste. Para o sul da Região Sudeste e a Região Sul do Brasil, a predominância de aumento no percentual de precipitação intensa é verificada na maioria dos modelos, indicando que essas regiões poderão apresentar um risco maior de ocorrência de enchentes, inundações e alagamentos.

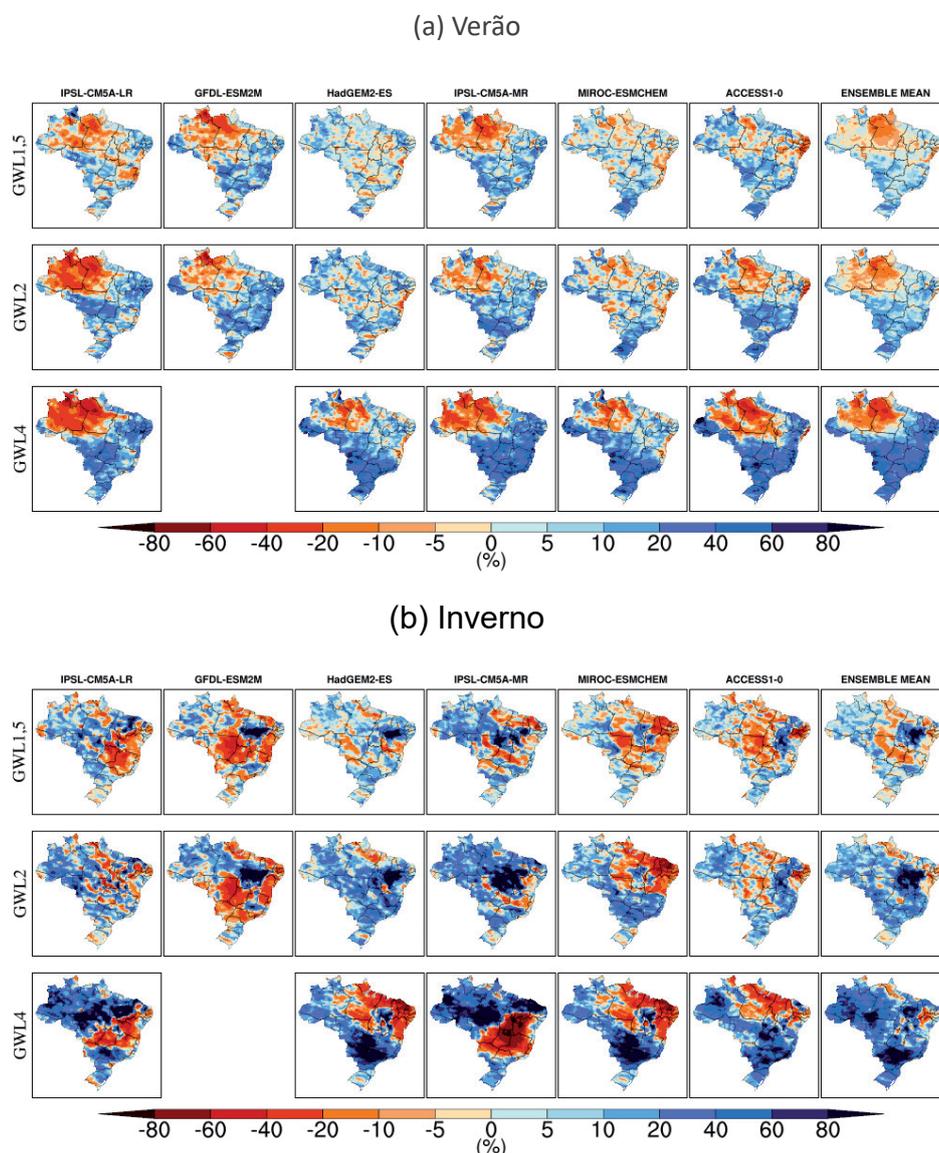


Figura 6 | Projeções de extremos climáticos: variação da precipitação máxima acumulada em 5 dias – RX5day (%) em relação ao período de referência (1981-2010) para o GWL 1,5, GWL2 e GWL4 no verão (a) e inverno (b) para cada experimento realizado com o modelo HadGEM3-A.

Fonte: Projeto Helix.

As análises de temperaturas mínimas e máximas anuais apresentadas nas Figuras 3 e 4, respectivamente, não estabelecem como serão distribuídas as alterações associadas ao aumento da temperatura, isto é, não fica evidente se irão aumentar o número de dias quentes e/ou de noites menos frias. De todo modo, observa-se nos resultados das projeções de dias quentes (Figura 7), um aumento significativo nesse indicador. E, ao se analisar de forma individual cada nível de aquecimento abordado, nota-se uma variação de 15% a 35% no GWL1,5, principalmente na Região Norte durante o verão (Figura 7a), e nas regiões Norte e Nordeste no inverno (Figura 7b). No GWL2 o padrão espacial é de 25% a 65%, com grande destaque para a Região Norte, enquanto no GWL4 o aumento no número de dias quentes ultrapassa os 75% nas regiões supracitadas para as estações analisadas.

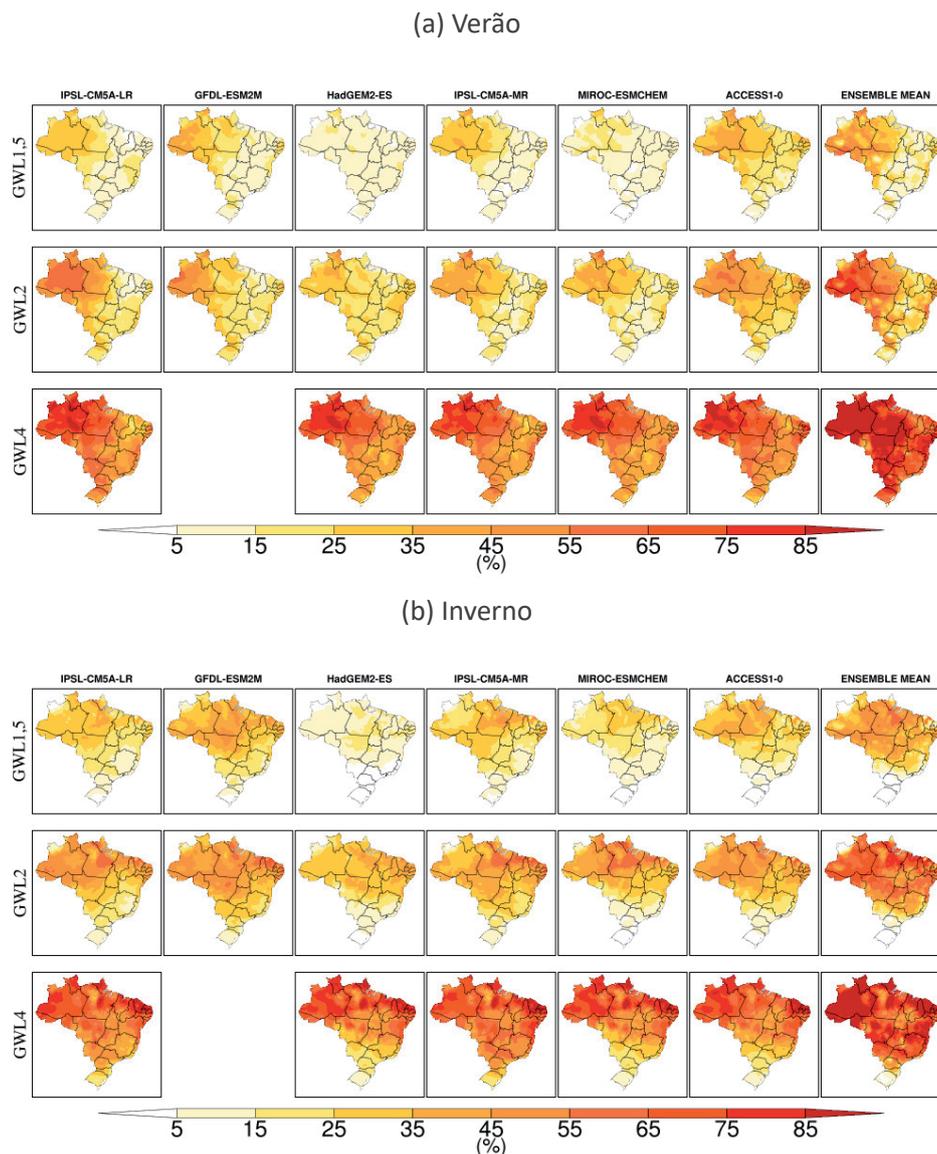


Figura 7 | Projeções de extremos climáticos: aumento de dias quentes – TX90p (%) em relação ao período de referência (1981-2010) para o GWL1,5, GWL2 e GWL4 no verão (a) e inverno (b) para cada experimento realizado com o modelo HadGEM3-A.

Fonte: Projeto Helix.

Entre as conclusões divulgadas no quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre as Mudanças Climáticas – AR5 (IPCC, 2013), destaca-se a do relato no qual os processos que afetam o clima podem apresentar considerável variabilidade natural, exibindo variações de recorrentes a imprevisíveis, em diferentes escalas de tempo e espaço. Com isso, as variabilidades naturais do clima

ocorrem em amplo espectro temporal, desde as escalas sazonais até dezenas de milhares de anos, resultando em múltiplos estados do clima, os quais podem ser exemplificados, seja pelos estágios dos ciclos glaciais (dezenas de milhares de anos) ou mesmo pela variabilidade interna associada ao El-Niño Oscilação Sul (Enso) na escala de tempo interanual. Mudanças no estado básico do clima resultam na alteração da variabilidade interna do sistema climático, o qual é controlado pelas complexas interações entre os componentes do sistema terrestre (atmosfera, oceanos, criosfera e biosfera) e forçantes externas (ex.: variabilidades orbitais e atividade solar).

Desse modo, as relações entre a variabilidade natural, as forçantes climáticas externas e internas (como a variabilidade oceânica em grande escala) e suas interdependências revelam a complexidade da dinâmica do sistema climático, cujo entendimento é crucial para a avaliação da mudança do clima devido às contribuições antropogênicas (como as emissões de gases de efeito estufa e mudanças das propriedades físicas da superfície), bem como para a predição do clima futuro. Nesse sentido, o IPCC-AR5 confirma que provavelmente a frequência e a intensidade de eventos extremos do clima aumentarão (ou seja, a variabilidade será intensificada), e que, portanto, modelos climáticos, com alta resolução espacial e temporal, devem ser usados para a realização de projeções futuras cada vez mais acuradas.

Por fim, apesar de não ser apropriado para algumas finalidades comparar diretamente os resultados aqui apresentados com os produzidos pelo IPCC com os modelos climáticos globais participantes do CMIP3 e CMIP5, por causa de suas naturezas distintas (como, por exemplo, resolução espacial e esquemas de parametrização) e metodologia de integração, é importante ressaltar que as projeções aqui analisadas estão bastante consistentes com aquelas apresentadas em seus relatórios, bem como trabalhos de mudanças climáticas que utilizaram a técnica de *downscaling* dinâmico, como em Chou et al. (2014), Marengo et al. (2012), Reboita et al. (2014) e Solman et al. (2013).

4 CONCLUSÃO

Neste estudo, foi realizada uma análise, para todo o território brasileiro, das projeções futuras de precipitação, temperatura e índices de extremos climáticos associados a essas variáveis. Para tanto, as análises das projeções foram tratadas por níveis de aquecimento médio global (GWL) de 1,5°C, 2°C e 4°C, utilizando as simulações climáticas do modelo global HadGEM3-A (projeto Helix).

As projeções indicam aumento de temperatura (mínima e máxima) sobre todas as regiões do Brasil, sendo esse aumento igual ou superior ao GWL analisado, ou seja, as mudanças regionais de temperaturas ultrapassam a média global de aquecimento em cada nível abordado (1,5°C, 2°C e 4°C). As regiões Norte, Centro-Oeste e Nordeste apresentaram as maiores alterações quanto ao aumento de temperatura. Nessas regiões, as projeções de extremos climáticos de temperatura máxima também apresentaram as alterações mais severas, principalmente para as regiões Norte e Nordeste e no GWL4, nível de aquecimento de maior impacto, no qual um aumento superior a 75% no número de dias quentes é verificado nessas regiões para as duas estações sazonais analisadas (verão e inverno).

Em relação às projeções de precipitação, os padrões de mudanças são aproximadamente similares entre os diferentes níveis de aquecimento, divergindo somente em magnitude. Nesse caso, à medida que se aumenta o nível de aquecimento, as mudanças projetadas se intensificam. De modo geral, as projeções mostram uma redução de precipitação sobre grande parte da Amazônia (15% a 30%), enquanto no Sudeste e Sul do País nota-se um aumento, o qual é mais intenso no GWL4, com incremento na precipitação anual da ordem de 25%.

As diferentes projeções também indicam um aumento nos eventos extremos de seca, principalmente no norte da Região Norte e no norte e semiárido da Região Nordeste. Isso é verificado em todos os GWLs, em especial durante a estação de inverno. Por outro lado, a maioria das simulações projeta um aumento na ocorrência de eventos extremos de precipitação para o sul da Região Sudeste e Sul do

País, indicando que essas regiões apresentam as maiores suscetibilidades ao aumento do número de ocorrência de enchentes, inundações e alagamentos.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer ao Dr. Richard Betts, Dr. Chris Jones e toda a equipe do projeto Helix e do *Met Office Hadley Centre* pela ajuda e na disponibilização dos experimentos utilizados neste trabalho. Agradecemos também à Coordenação de Mudanças Climáticas do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) do Brasil, pelo apoio institucional. Estendemos nossos agradecimentos ao Projeto BRA/16/G31 do Pnud e do CNPq (Processo 443807/2018-3).

REFERÊNCIAS

- AMBRIZZI, T. et al. **Cenários regionalizados de clima no Brasil para o Século XXI**: projeções de clima usando três modelos regionais. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Secretaria de Biodiversidade e Florestas (SBF). Diretoria de Conservação da Biodiversidade, 2007.
- AMBRIZZI, T. et al. The state of the art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1436, n. 1, p. 98-120, 2019.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Terceira comunicação nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**. Setor Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas. MCT, Brasília, DF, Brasil, p. 79, 2016.
- CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme precipitation events in southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic convergence zone. **Journal of Climate**, v. 15, n. 17, p. 2377-2394, 2002.
- CAVALCANTI, I. F. A. et al. Global climatological features in a simulation using the Cptec – COLA AGCM. **Journal of Climate**, v. 15, n. 21, p. 2965-2988, 2002.
- CHOU, S. C. et al. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 512-525, 2014.
- CHOU, S. C. et al. Evaluation of the eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 05, p. 438, 2014.
- DÉQUÉ, M. et al. A multi-model climate response over tropical Africa at +2°C. **Climate Services**, v. 7, p. 87-95, 2017.
- DUNN, R. J. H. et al. Development of an Updated Global Land in Situ-Based Data Set of Temperature and Precipitation Extremes: HadEX3. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 125, n. 16, 2020.
- ESCOBAR, G. C. J.; MATOSO, V. Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS): definição prática segundo uma visão operacional. In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2018, Maceió. **Anais...** Maceió-AL, 2018.
- EYRING, V. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 5, p. 1937-1958, 2016.
- FLATO, G. et al. Evaluation of climate models. In: **Climate change 2013: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2014. p. 741-866.
- FRICH, P. et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. **Climate Research**, v. 19, n. 3, p. 193-212, 2002.

FUNK, C. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations – a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, n. 150066, 2015.

GIORGI, F.; MEARNS, L. O. Introduction to special section: regional climate modeling revisited. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 104, n. D6, p. 6335-6352, 1999.

IPCC. **Climate Change 2013: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. STOCKER, T. F. et al. (Ed.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.

IPCC. **Global Warming of 1.5°C**. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty MASSON-DELMOTTE, V. et al. (Ed.). In Press.

JAMES, R.; WASHINGTON, R. Changes in African temperature and precipitation associated with degrees of global warming. **Climatic change**, v. 117, n. 4, p. 859-872, 2013.

JONES, R. G. et al. **Generating high resolution climate change scenarios using Precis**. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK, v. 40, 2004.

LENNARD, C. J. et al. On the need for regional climate information over Africa under varying levels of global warming. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 6, p. 060401, 2018.

LIEBMANN, B. et al. An observed trend in central South American precipitation. **Journal of Climate**, v. 17, n. 22, p. 4357-4367, 2004.

MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T. Use of regional climate models in impacts assessments and adaptations studies from continental to regional and local scales. In: **Proceedings of**, 2006. p. 291-296.

MARENGO, J. A. et al. An intercomparison of observed and simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century: part 2: historical trends. **Climatic Change**, v. 98, n. 3-4, p. 509-529, 2010.

MARENGO, J. A. et al. Assessment of regional seasonal rainfall predictability using the Cptec/COLA atmospheric GCM. **Climate Dynamics**, v. 21, n. 5-6, p. 459-475, 2003.

MARENGO, J. A. et al. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta Cptec/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. **Climate Dynamics**, v. 38, p. 1829-1848, 2012.

MARENGO, J. A. et al. Future change of climate in South America in the late XXI Century: intercomparison of scenarios from three regional climate models (2009) Climate Dynamics. **Climate Dynamics**. doi:10.1007/s00382-009-0721-6, v. 10.

MORICE, C. P. et al. Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: the HadCRUT4 data set. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 117, n. D8, 2012.

NAUMANN, G. et al. Global changes in drought conditions under different levels of warming. **Geophysical Research Letters**, v. 45, n. 7, p. 3285-3296, 2018.

NIKULIN, G. et al. The effects of 1.5 and 2 degrees of global warming on Africa in the Cordex ensemble. **Environmental Research Letters**, v. 13, n. 6, p. 065003, 2018.

PAL, J. S. et al. Regional climate modeling for the developing world: the ICTP RegCM3 and RegCNET. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 88, n. 9, p. 1395-1410, 2007.

PBMC. **Base científica das mudanças climáticas**. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas. AMBRIZZI, T.;

ARAUJO, M. (Ed.). Coppe. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 464 p.

PISNICHENKO, I. A.; TARASOVA, T. A. **The climate version of the Eta regional forecast model**. 2. Evaluation of the Eta CCS model performance against reanalysis data and surface observations. Disponível em: <arXiv preprint arXiv:0901>.1461, 2009.

REBOITA, M. S. et al. Evidências de Circulação de Brisa Vale-Montanha na Serra da Mantiqueira: Cidade de Itajubá-MG. **Ciência e Natura**, v. 36, n. 1, p. 61-71, 2014.

REBOITA, M. S. et al. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

RICHARDSON, K.; BRADSHAW, C. **Assessment of the impacts of climate change on national level food insecurity using the Hunger and Climate Vulnerability Index**. University of Exeter, 2017.

SATYAMURTY, P. et al. Rainfall trends in the Brazilian Amazon Basin in the past eight decades. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 99, n. 1-2, p. 139-148, 2010.

SCHWINGSHACKL, C.; HIRSCHI, M.; SENEVIRATNE, S. I. Global Contributions of Incoming Radiation and Land Surface Conditions to Maximum Near-Surface Air Temperature Variability and Trend. **Geophysical research letters**, v. 45, n. 10, p. 5034-5044, 2018.

SILVA, J. P. R.; REBOITA, M. S.; ESCOBAR, G. C. J. Caracterização da Zona de Convergência do Atlântico Sul em Campos Atmosféricos recentes. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019.

SIMMONS, A. J. et al. A reassessment of temperature variations and trends from global reanalysis and monthly surface climatological datasets. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 143, n. 702, p. 101-119, 2017.

SOLMAN, S. A. et al. Evaluation of an ensemble of regional climate model simulations over South America driven by the ERA-Interim reanalysis: model performance and uncertainties. **Climate Dynamics**, v. 41, n. 5-6, p. 1139-1157, 2013.

VUUREN, D. P. van et al. RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. **Climatic Change**, v. 109, n. 1-2, p. 95-116, 2011.

VAUTARD, R. et al. The European climate under a 2°C global warming. **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 3, p. 034006, 2014.

WALTERS, D. et al. The Met Office unified model global atmosphere 6.0/6.1 and Jules global land 6.0/6.1 configurations. **Geoscientific Model Development**, v. 10, n. 4, p. 1487-1520, 2017.

WBGU. **Scenario for the derivation of global CO2 reduction targets and implementation strategies**. WBGU, Bremerhaven, Germany. 1995.

WYSER, K. et al. **Documentation of changes in climate variability and extremes simulated by the Helix AGCMs at the 3 GWLs and comparison in equivalent SST/SIC low-resolution CMIP5 projections**. HELIX Project Deliverable 3.1. 2017.

