

Projeções Climáticas de Temperatura do Ar e Precipitação para o Estado de São Paulo Utilizando o Modelo Regional RegCM4

Climate Projections of Air Temperature and Precipitation in Sao Paulo Using the RegCM4 Regional Model

Renan Muinos Parrode de Godoy¹ , Luiz Felipe Gozzo¹ , Marta Llopart¹ ,
Bruna Luiza Peron¹ , Michelle Simões Reboita² , Henrique Fuchs Bueno Repinaldo¹ 
& Vitor Hugo de Almeida Marrafon² 

¹ Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências, Bauru, SP, Brasil

² Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Instituto de Recursos Naturais Itajubá, MG, Brasil

E-mails: renanmpg@hotmail.com; luiz.gozzo@unesp.br; m.llopart@unesp.br; brunaluizaperon@gmail.com; reboita@unifei.edu.br; henrique.repinaldo@unesp.br; vitorhmarrafon@gmail.com

Resumo

Este trabalho teve como objetivo avaliar mudanças nos valores de precipitação e temperatura médios sobre o estado de São Paulo (Brasil) e em três índices de extremos climáticos (dias secos consecutivos – CDD, extremos chuvosos – R95p e duração de ondas de calor – HWD), entre o período presente e o final do século XXI, a partir de um modelo climático regional. Foram utilizadas três simulações/projeções do *Regional Climate Model* (RegCM4) para o clima presente (1995-2014) e futuro (2080-2100), e a análise foi dividida nas estações de verão (DJF) e inverno (JJA). As simulações consideram o cenário mais pessimista de concentração de gases de efeito estufa na atmosfera do IPCC (RCP8.5). Dados observados do *Climate Prediction Center* (CPC) são utilizados para analisar a destreza das simulações no clima presente da precipitação e da temperatura do ar. No verão, as simulações superestimam a precipitação no litoral, enquanto no inverno a representam mais próxima do observado. Para a temperatura do ar, há subestimativas no litoral sul para ambas as estações do ano. No interior do estado, as temperaturas simuladas no verão são próximas ao observado, já no inverno observa-se superestimativa desta variável. Em relação aos índices climáticos, é observada pouca mudança do CDD para o verão, e um aumento para o inverno, principalmente do interior do estado, enquanto o R95p mostra sinal oposto ao CDD. O HWD apresenta uma diminuição em DJF no interior e um aumento na região litorânea para JJA. O interior de São Paulo é identificado como a região mais suscetível aos dias secos consecutivos e extremos chuvosos, enquanto as ondas de calor apresentam um sinal de aumento mais relevante no sul e faixa leste do estado, durante o inverno.

Palavras-chave: Estado de São Paulo; Extremos climáticos; Mudanças climáticas

Abstract

This study aims to evaluate changes in the average values of precipitation and temperature over the state of São Paulo (Brazil) and in three indexes of climatic extremes (consecutive dry days - CDD, rainy extremes - R95p, and heatwave duration - HWD) between the present period and the end of the 21st century, based on a regional climate model. Three simulations/projections of the Regional Climate Model (RegCM4) were used for the present (1995-2014) and future (2080-2100) climate, and the analysis was divided into summer (DJF) and winter (JJA). The simulations consider the most pessimistic scenario for the concentration of greenhouse gases in the atmosphere of the IPCC (RCP8.5). Observed data from the Climate Prediction Center (CPC) are used to analyze the dexterity of simulations in the present climate for precipitation and air temperature. In the summer, the simulations overestimate the rainfall on the coast, while they represent it closer to the observed in the winter. For air temperature, there are underestimates on the south coast for both seasons. In the interior of the state, the simulated temperatures in summer are close to what was observed, whereas in the winter there is an overestimation of this variable. Regarding the climatic indices, there is little change in the CDD for the summer, and an increase for the winter, mainly in the interior of the state, while R95p shows a sign opposite to the CDD. HWD shows a decrease in DJF in the interior and an increase in the coastal region for JJA. The interior of São Paulo is identified as the region most susceptible to consecutive dry and extreme rainy days, while heatwaves show a more relevant sign of an increase in the south and east of the state during the winter.

Keywords: State of São Paulo; Climate extremes; Climate change

1 Introdução

O estado de São Paulo está localizado no sudeste do Brasil, em uma região de transição entre os regimes atmosféricos tropical e extratropical. Apresenta clima de monção (Ashfaq et al. 2020; Garreaud et al. 2009; Marengo et al. 2012; Vera et al. 2006), com duas estações bem definidas: a chuvosa de outubro a março e a seca de abril a setembro.

Durante o verão (DJF), quando a monção está na sua fase ativa, os ventos em baixos níveis transportam umidade da região Amazônica em direção às regiões sudeste e sul do Brasil, frequentemente através do Jato de Baixos Níveis a leste dos Andes (Marengo et al. 2004; Marengo et al. 2012; Montini, Jones & Carvalho 2019; Santos & Reboita 2018; Zhou & Lau 1998). A convergência de umidade resultante desse processo, associada com a convecção típica da estação de verão, contribui para a formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS; Silva et al. 2019), sistema responsável por elevados totais de precipitação no verão no sudeste do Brasil (Carvalho, Jones & Liebmann. 2002; Llopart et al. 2018; Luiz-Silva et al. 2020), e com potencial de desencadear desastres naturais (Reboita et al. 2017). No inverno, durante a fase inativa do sistema de monção, as chuvas no estado de São Paulo são principalmente provocadas pela passagem de frentes frias e pela passagem de sistemas de baixa pressão em superfície, como cavados baroclínicos e ciclones (Escobar, Reboita & Souza 2019).

O Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC AR5; IPCC 2013*) demonstrou um aumento de quase 1°C na temperatura da superfície terrestre desde a era pré-industrial até o presente. Além disso, as projeções apresentadas pelo IPCC têm mostrado aumento da temperatura, variabilidade na quantidade da precipitação no globo e mudança na frequência e intensidade dos eventos extremos de tempo e clima. Os eventos extremos meteorológicos podem ser definidos como um evento com pequena probabilidade de ocorrência a partir de uma função de densidade de probabilidade, calculada a partir de dados observados e ou simulados em escala temporal diária (Seneviratne et al. 2012). Com o intuito de facilitar a análise dos extremos climáticos o *The Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI; Sillmann et al. 2013) sintetizaram os eventos em forma de índices, os quais levam em consideração principalmente a precipitação e temperatura (máxima, mínima e média), sendo uma ferramenta útil para identificar regiões vulneráveis a extremos climáticos devido principalmente ao aumento dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera.

Analisando dados de estações meteorológicas ao redor do globo para o período de 1901 até 2018, Dunn

et al. (2020) encontraram um aumento na frequência e intensidade de chuvas extremas, diminuição dos dias e noites frias, além do aumento de dias e noites quentes ao redor do globo. Já uma análise da variabilidade espacial de precipitação extrema na região sudeste do Brasil foi realizada por Zilli et al. (2017), através de dados de pluviômetros para o período de 1938 até 2012 utilizando oito índices climáticos de extremo chuvoso. Os autores encontraram uma intensificação nas chuvas extremas, também se tornando mais frequentes, principalmente para o estado de São Paulo. Além de extremos chuvosos, Coelho et al. (2016) identificaram uma das piores secas dos últimos 80 anos na região sudeste em 2014-2015, o que acarretou problemas no setor hídrico e elétrico da região. Climatologicamente, Gozzo et al. (2019) mostraram, a partir de dados de observações e reanálise, que episódios de seca severa se tornaram mais frequentes ao longo do século XX, no centro-oeste do estado.

Para a região metropolitana de São Paulo, Marengo et al. (2020) analisaram a distribuição de eventos de precipitação extrema a partir de dados de duas estações meteorológicas com medidas desde 1930 até 2019. Os autores encontraram um aumento da tendência de extremos chuvosos para o período, principalmente no verão, além do aumento de dias secos consecutivos, fato que indica que as chuvas estão ocorrendo cada vez mais concentradas em episódios fortes. Através de dados de reanálise, os autores também identificaram o deslocamento para sul do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Este deslocamento pode transportar maior quantidade de umidade para a região metropolitana de São Paulo, facilitando a ocorrência de eventos extremos e perdas associadas a deslizamentos e enchentes.

Os trabalhos mencionados anteriormente evidenciam que dados históricos já demonstram alterações do clima devido às mudanças climáticas, e há indicações de que estas mudanças continuarão. Para realizar a análise do clima futuro, o AR5 utiliza diferentes cenários da concentração de gases do efeito estufa, chamados de *Representative Concentration Pathways* (RCP – Moss et al. 2010; Van Vuuren et al. 2011). Sendo considerados diversos fatores como o desenvolvimento de novas tecnologias e diferentes políticas de mitigação de GEE, foram selecionados quatro cenários principais: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5. Cada um apresenta uma concentração diferente para os gases do efeito estufa, desde o mais brando RCP2.6 até o pior cenário o RCP8.5, que estima um aumento das forçantes radiativas para o final do século XXI de 8,5 W/m².

Modelos climáticos globais possuem atualmente resolução espacial da ordem ~100 km (Ambrizzi et al. 2019), o que dificulta a representação de forçantes climáticas de menor escala. Os Modelos Climáticos Regionais (MCRs) apresentam resolução mais refinada, e

são desenvolvidos para melhor representar processos locais e regionais (Giorgi & Mearns 1999). Através da técnica de *downscaling* (Hong & Kanamitsu 2014), é possível refinar e detalhar as saídas dos modelos globais, utilizando MCRs, para melhor identificação dos sinais de mudanças climáticas. Um exemplo do uso desta técnica no estudo de extremos climáticos na América do Sul está em Dereczynski et al. (2020), que encontraram uma boa representação das tendências atuais dos índices de temperatura, com aumento de dias e noites quentes e diminuição de dias e noites frias na região do estado de São Paulo, e um aumento de dias secos e de extremos chuvosos, com a ressalva de que as simulações não representam tão bem as tendências de precipitação observadas, devido à parametrização adotada para esta variável.

O *Regional Climate Model* (RegCM4; Giorgi et al. 2012) é um dos RCMs mais utilizado pela comunidade científica (Ambrizzi et al. 2019). Através de projeções deste modelo nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 para o final do século, em diferentes continentes, Giorgi et al. (2014) encontraram uma tendência do aumento da frequência e intensidade dos índices de quantidades de dias de calor, extremos chuvosos e número de dias secos consecutivos. Isso indica uma maior intensidade das chuvas, porém com menor frequência, além de maiores períodos de secas e de ondas de calor.

Utilizando projeções de modelo regional, Lyra et al. (2018) estudaram o impacto das mudanças climáticas em três regiões metropolitanas do sudeste brasileiro (Rio de Janeiro, São Paulo e Santos). Os resultados indicaram um aumento de temperaturas máximas diárias, de dias e noites quentes, e diminuição de dias e noites frias, com a redução na duração do período mais frio para o final do século no cenário RCP8.5 do IPCC. Também foi observado um clima futuro mais seco. Apesar da diminuição da quantidade total de chuvas Dereczynski, Silva & Marengo (2013) mostram um aumento significativo na frequência de episódios de chuvas fortes na cidade do Rio de Janeiro.

O estado de São Paulo possui a maior densidade demográfica do Brasil, com quase um quarto dos habitantes de todo o país, e o maior Produto Interno Bruto – PIB (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE 2010). Apesar de sua grande importância social e econômica, ainda há poucos estudos de tendências climáticas focados especificamente neste estado. Assim, visando aumentar o entendimento sobre esta questão, o objetivo geral deste trabalho é avaliar mudanças futuras nas condições médias e extremas de temperatura e precipitação sobre São Paulo, através de projeções climáticas utilizando o modelo regional RegCM4 no âmbito do CORDEX-CORE (*Coordinated Output from Regional Evaluations – CORE*; Gutowski et al. 2016). Especificamente, é realizada uma validação da climatologia de temperatura e precipitação do clima

presente neste modelo, análise das mudanças na média destas variáveis e em índices climáticos de ondas de calor e extremos secos e chuvosos para o final do século. Pretende-se contribuir com informações importantes para tomadores de decisões, indicando quais regiões dentro do estado de São Paulo são mais vulneráveis aos eventos extremos de precipitação e temperatura do ar, devido às mudanças climáticas.

2 Dados e Metodologia

A fim de analisar o impacto das mudanças climáticas na precipitação, temperatura do ar e nos eventos extremos relacionados a essas duas variáveis meteorológicas no estado de São Paulo, para o final do século (2080-2100), será utilizado um conjunto de projeções climáticas realizadas com o modelo RegCM4 e também serão utilizados dados de análise para validar as simulações no clima presente (1995-2014).

2.1 Projeções Climáticas e Configuração dos Experimentos

As projeções utilizadas nesse estudo fazem parte do CORDEX-CORE realizadas com o RegCM4. Nas últimas três décadas o RegCM tem sido usado por diversas instituições de pesquisa (Giorgi 2019). São utilizadas três simulações climáticas regionais, com o RegCM4, por três diferentes modelos globais (MCGs) do *Coupled Model Intercomparison Project* fase 5 (CMIP5; Meehl & Bony 2011) para o domínio do *Coordinated Regional Downscaling Experiment* (CORDEX; Giorgi, Jones & Asrar 2009) da América do Sul, como mostra a Figura 1A, a qual inclui também a topografia. Para este estudo, o domínio analisado tem enfoque no estado de São Paulo (Figura 1B).

O RegCM4 é um modelo de área limitada, compressível, de equações primitivas e em coordenada vertical sigma-pressão e inclui diferentes esquemas de parametrizações físicas (Giorgi et al. 2012). Nesse estudo foi realizado um *downscaling* dinâmico de três MCGs do CMIP5 [*Hadley Global Environment Model 2—Earth System* (HadGEM2-ES; Jones et al. 2011), o *Max Planck Institute for Meteorology-Earth system model* (MPI-ESM-MR; Giorgetta et al. 2012) e *Norwegian Earth System Model 1* (NorESM-1M; Bentsen et al. 2013)], utilizando o RegCM4, para o período de 1970 a 2100. O modelo regional foi integrado com resolução horizontal de ~25 km, para o cenário de aumento de concentração de GEE RCP8.5. Este é o cenário mais extremo (pessimista), correspondendo a uma forçante radiativa de 8,5 W.m⁻². De 1970 até 2005, as simulações representam o clima presente, e a partir de 2006 as simulações representam as projeções para o clima futuro, pois este foi o ano em que o cenário climático começa a ser considerado.

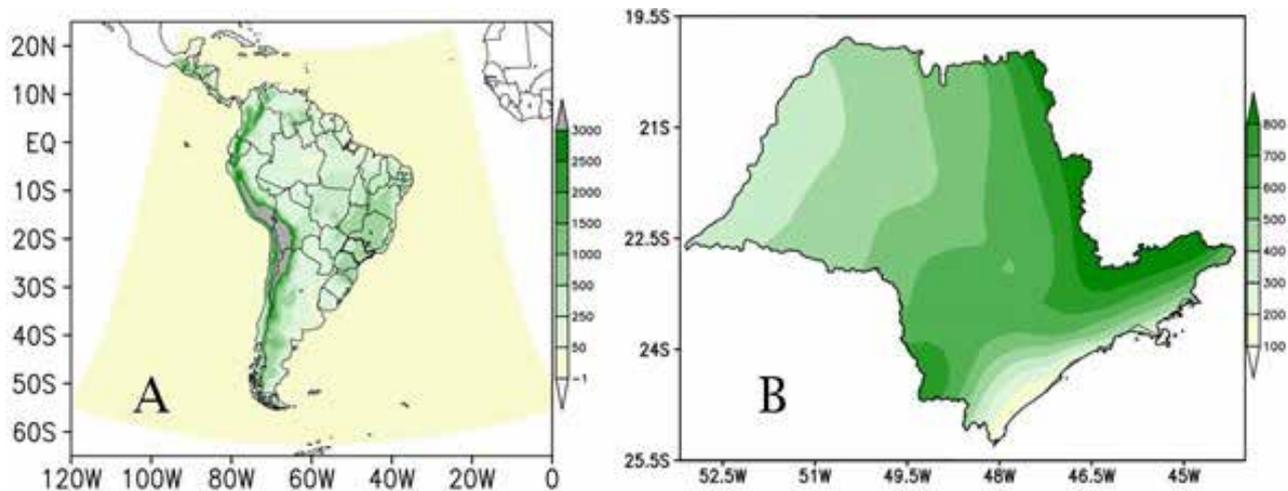


Figura 1 A. Domínio das simulações e Topografia (m) da América do Sul; B. Estado de São Paulo.

As simulações com o RegCM4 utilizam o modelo de superfície *Community Land Model version 4.5* (CML4.5; Oleson et al. 2013) para representar os processos de superfície, e para os processos de convecção foi utilizado o esquema Tiedtke (Tiedtke 1996) sobre o continente e o de Kain-Fritsch (Kain & Fritsch 1990) sobre o oceano. Maiores informações sobre as simulações podem ser obtidas em Llopart et al. (2020) e Reboita et al. (2020).

Para validação da precipitação, temperatura do ar, e dos extremos climáticos (extremos chuvosos, dias consecutivos secos e ondas de calor) para o clima presente (1995-2014), foram utilizados dados do *Climate Prediction Center* (CPC). Esses dados são o resultado da interpolação das medidas de pluviômetros (Chen et al. 2008) e apresentam resolução de 0,5°. A validação será realizada de forma qualitativa, analisando a diferença das simulações em relação ao observado.

2.2 Extremos Climáticos

Para calcular os extremos climáticos de precipitação e temperatura do ar para o clima presente e futuro, são utilizados três índices climáticos sugeridos pelo ETCCDI (http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml) considerados chave para estudo de impacto das mudanças climáticas (Sillmann et al. 2013). Na Tabela 1 são apresentados os índices utilizados, que são calculados com a série histórica em escala temporal diária. Primeiro são separados os períodos DJF e JJA de cada ano, e calculados os índices para cada estação, e então é obtida a média de todos os anos. Os cálculos são realizados para cada simulação/projeção, e o resultado final é a média entre elas.

2.3 Descrição das Análises

2.3.1. Clima Presente

Os dados simulados de precipitação e temperatura do ar para o estado de São Paulo entre 1995-2014, são validados através de comparações com o CPC em dezembro-janeiro-fevereiro (DJF) e junho-julho-agosto (JJA). Nessa etapa é calculado o viés em relação ao conjunto das simulações. Entretanto, também são apresentados os resultados das simulações individuais a fim de identificar as diferenças entre elas. Para verificar se há diferença estaticamente significativa entre as climatologias foi aplicado o teste t-Student com confiança de 95% (Wilks 2006). A fim de viabilizar a comparação dos dados simulados e observados, utilizou-se o método de interpolação bilinear para colocar os dados do CPC em uma grade de ~25 km.

2.3.2 Clima Futuro

O sinal de mudança da precipitação, temperatura do ar e dos índices de eventos extremos, para estado de São Paulo, devido às mudanças climáticas é avaliado através da diferença da climatologia do clima futuro (2080-2100) com a do clima presente (1995-2014), para o verão e para o inverno, utilizando o conjunto das projeções. As climatologias do clima presente e futuro compreendem períodos de 20 anos por seguirem as recomendações do quinto e sexto relatórios do IPCC (AR5 e AR6; IPCC 2014; Llopart et al. 2020; Reboita et al. 2020).

Tabela 1 Descrição dos índices climáticos computados no estudo para o clima presente e futuro.

Sigla	Nome do Índice	Definição do Índice	Unidade
R95p	Extremos chuvosos	Sendo Pr a precipitação diária de um dia úmido, inicialmente são selecionados os dias com $Pr \geq 1$ mm. Então é computado o percentil de 95%, e o índice consiste no percentual de volume de chuva Pr acima do percentil de 95%.	%
CDD	Dias consecutivos secos	Maior número de dias consecutivos com precipitação diária < 1 mm. De acordo com Sillmann et al. (2013), esse índice é um indicador de secas.	dias
HWD	Número de dias de onda de calor	Onde ocorre uma onda de calor quando, em pelo menos 5 dias consecutivos, a temperatura máxima diária excede a média climatológica em pelo menos 5 graus.	dias

Fonte: Adaptado de Sillmann et al. (2013).

3 Resultados

3.1 Climatologia Presente (1995-2014)

A Figura 2 apresenta a climatologia de precipitação total para o período de 1995-2014 em DJF para o CPC (Figura 2A), o conjunto das simulações (ensemble; Figura 2B), e a diferença entre as simulações e o CPC (Figura 2C-F).

Em DJF (Figura 2A), meses principais do período chuvoso na região, são observados valores médios de chuva diária de 6 mm/dia na maior parte do estado, chegando a 9 mm/dia na porção nordeste devido à atuação da ZCAS (Marrafon & Reboita 2020).

A diferença do conjunto das simulações com o observado (Figura 2C) superestima em até 3 mm/dia a precipitação na região litorânea, porém os valores são relativamente próximos para o interior do estado. A diferença é estatisticamente significativa em quase todo domínio. Individualmente, o RegHadGEM (Figura 2D) apresenta a maior diferença em relação ao observado para DJF, estatisticamente significativa em praticamente todo estado, superestimando a precipitação principalmente no litoral em até 3 mm/dia, porém também com valores relativamente altos para o interior. Já o RegMPI (Figura 2E) possui o padrão mais próximo do observado, com valores de quase zero e sem significância estatística em grande parte do interior, mas ainda superestima a precipitação no litoral paulista e na faixa nordeste do estado, e subestima no oeste do estado. As rodadas do RegNorESM (Figura 2F) não superestimam tão intensamente a precipitação para o litoral, porém ainda apresentam valores acima do observado em boa parte da porção sul do estado. Sugerem-se duas hipóteses para estas diferenças nos valores de precipitação na região litorânea. A primeira é a existência de processos de escala local, que não são bem resolvidos na escala espacial adotada no RegCM4; como a região apresenta uma topografia complexa, o terreno acaba sendo em certos locais muito suavizado nas simulações. Dificuldades semelhantes

foram destacadas em estudos anteriores realizados em regiões com topografia complexa (Önol 2012; Bozkurt et al. 2019). Outra possível fonte destas diferenças é uma ligeira subestimativa regional da precipitação pelo CPC, já que algumas climatologias registram médias superiores a 7 mm/dia nessas áreas, durante o verão (Marengo & Alves 2005; Oliveira Silva & Valverde 2017).

A climatologia de precipitação de JJA mostra valores médios de até 2 mm/dia sobre boa parte do estado, e 3 mm/dia na porção sul e litorânea (Figura 3A), associados principalmente ao transporte de umidade do oceano em direção ao continente pela circulação de altas pós-frontais, e por vezes associados a circulações de brisa marítima (Reboita et al. 2010).

Ao comparar o conjunto de simulações com o observado (Figura 3C), nota-se que a diferença entre eles é menor em magnitude em relação ao verão. A precipitação para JJA é superestimada no litoral e porção nordeste do estado em 1 mm/dia e subestimado em 1 mm/dia na região sudoeste. Analisando cada simulação observa-se que o RegMPI possui menor diferença em magnitude com o observado (Figura 3E), do que os outros dois membros. O RegHadGEM superestima a precipitação em quase todo o estado (Figura 3D), com os maiores valores no litoral norte, já o RegNorESM, subestima a precipitação em todo o estado, principalmente a região sudoeste (Figura 3F).

A Figura 4 apresenta a climatologia de temperatura do ar para DJF no estado de São Paulo para o CPC (Figura 4A), o conjunto das simulações (Figura 4B), e a diferença entre as simulações e o CPC (Figura 4C-F).

O verão possui valores de temperatura média variando entre 15 e 28°C, dependendo da região do estado, com os maiores valores no extremo noroeste, diminuindo gradualmente do interior para o litoral, e os menores valores na região da serra, que é a região mais alta do estado (Figura 1).

A diferença entre o conjunto e as observações (Figura 4C) indica que os modelos conseguem representar bem a média da temperatura do ar para DJF, exceto no litoral sul onde as temperaturas são subestimadas em

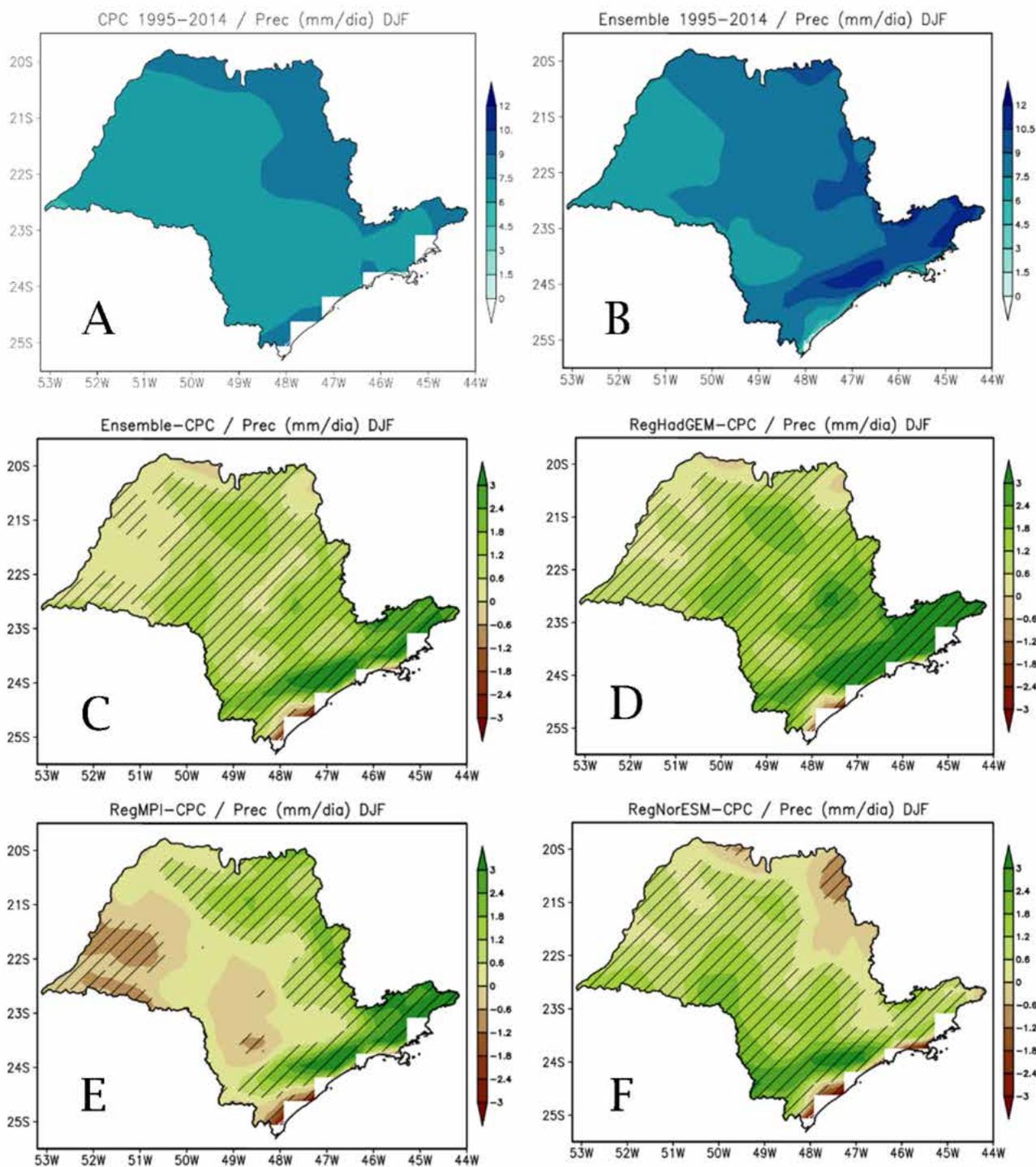


Figura 2 Climatologia da precipitação (mm/dia) para o estado de São Paulo no período de 1995-2014 no verão, para: A. os dados observados do CPC; B. o conjunto das simulações; C. a diferença entre o conjunto e o observado; D. a diferença entre o RegHadGEM e o observado; E. a diferença entre o RegMPI e o observado; F. a diferença entre o RegNorESM e o observado. A região hachurada indica diferença significativa ao nível de confiança de 95%.

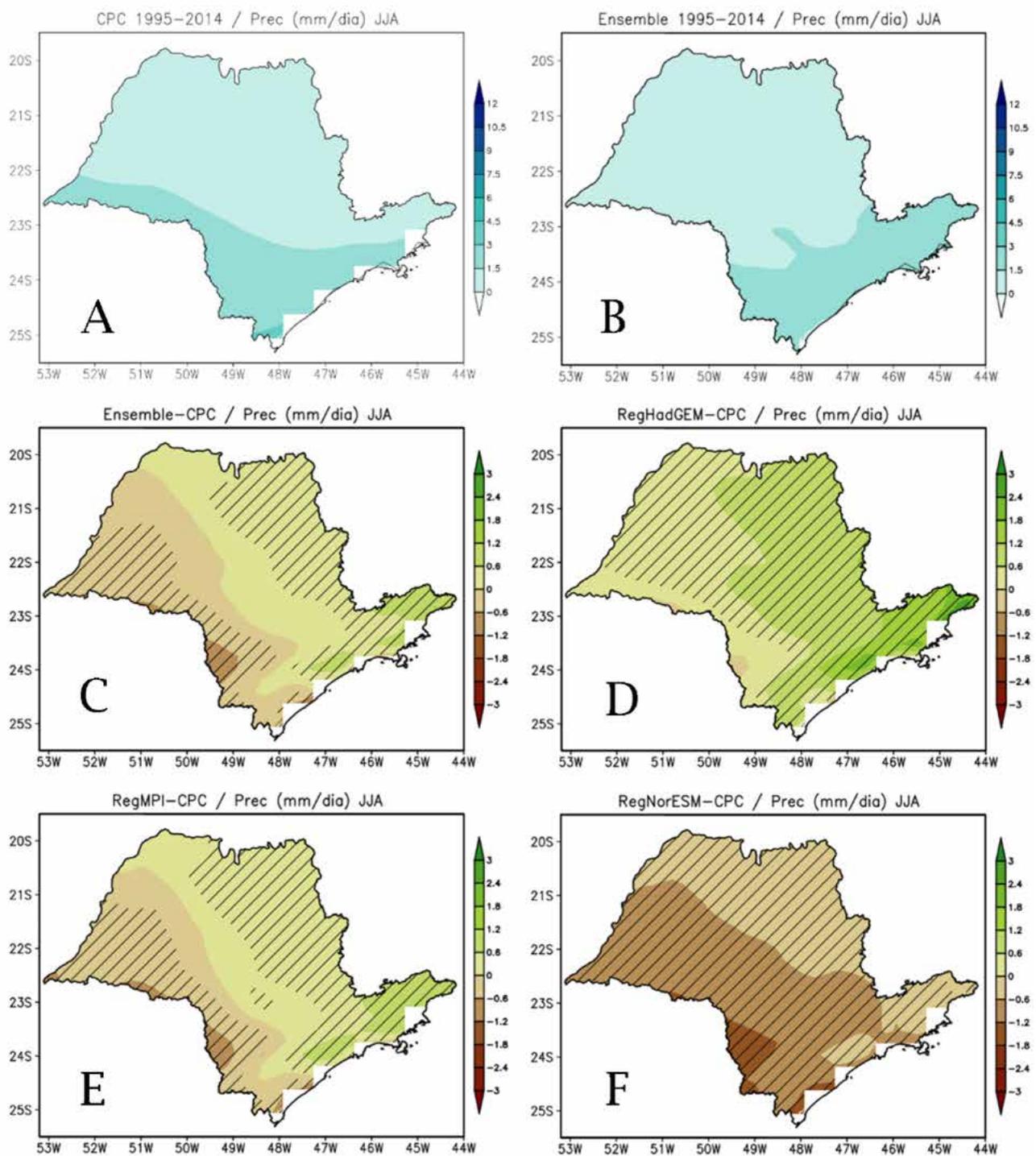


Figura 3 Climatologia da precipitação (mm/dia) para o estado de São Paulo no período de 1995-2014 no inverno, para: A. os dados observados do CPC; B. o conjunto das simulações; C. a diferença entre o conjunto e o observado; D. a diferença entre o RegHadGEM e o observado; E. a diferença entre o RegMPI e o observado; F. a diferença entre o RegNorESM e o observado. A região hachurada indica diferença significativa ao nível de confiança de 95%.

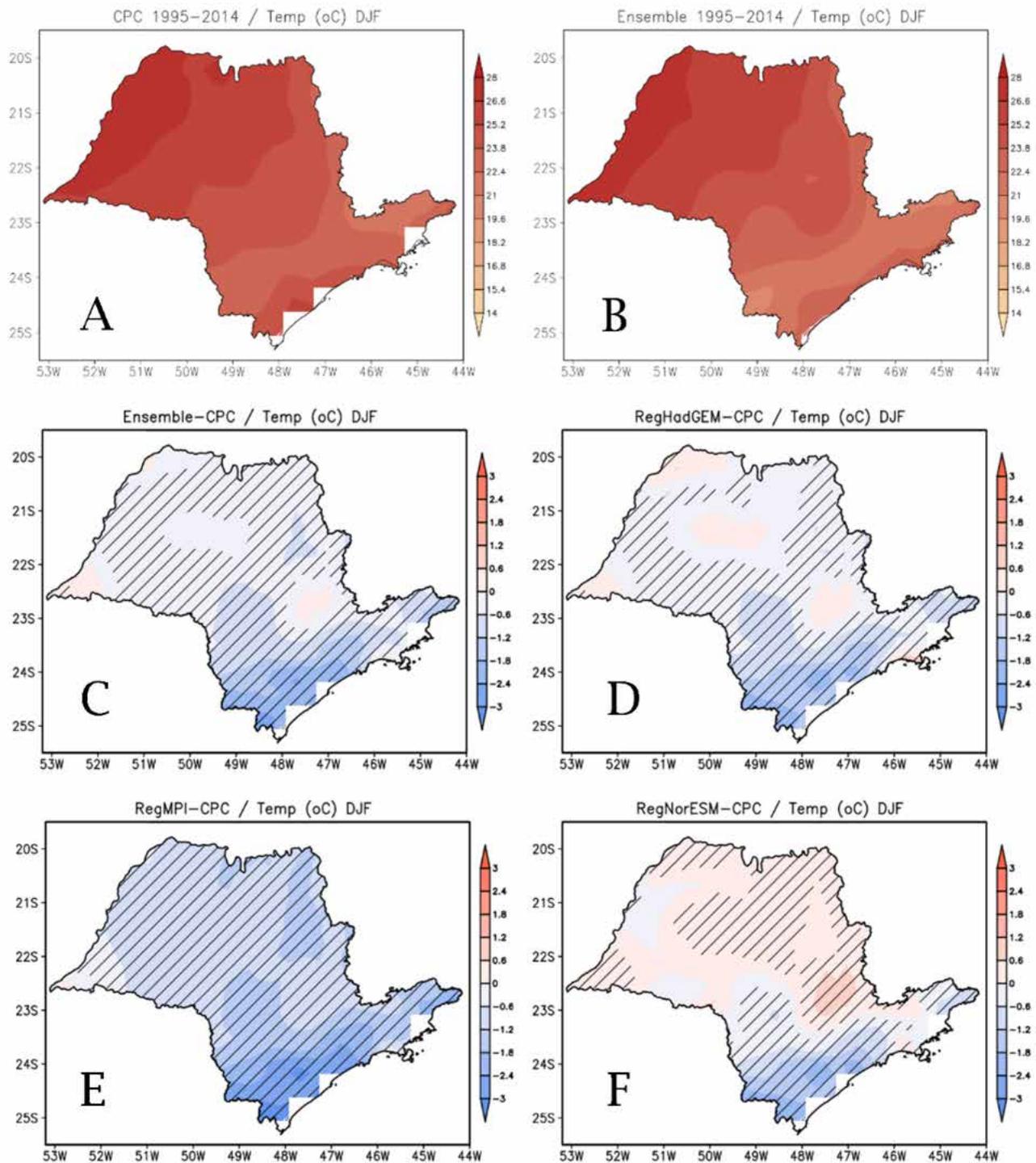


Figura 4 Climatologia da temperatura do ar (°C) para o estado de São Paulo no período de 1995-2014 no verão, para: A. os dados observados do CPC; B. o conjunto das simulações; C. a diferença entre o conjunto e o observado; D. a diferença entre o RegHadGEM e o observado; E. a diferença entre o RegMPI e o observado; F. a diferença entre o RegNorESM e o observado. A região hachurada indica diferença significativa ao nível de confiança de 95%.

até 2°C em relação ao observado. De forma geral, as três simulações subestimam a temperatura na região do litoral sul. Para o interior do estado a RegHadGEM (Figura 4D) possui menores diferenças, e a RegNorESM (Figura 4F) superestima mais a temperatura da região. Já a RegMPI (Figura 4E) é a simulação com maior diferença, subestimando a temperatura em todo o estado, atingindo até menos 3°C na região sul.

Para o inverno (Figura 5A), as temperaturas variam de 14°C a 24°C, com distribuição espacial semelhante à identificada em DJF, porém com menores valores. Analisando a diferença do conjunto com o observado (Figura 5C) nota-se que as simulações não conseguem representar tão bem as temperaturas para JJA, subestimando até 3°C na região sul e superestimando a temperatura na região noroeste. Individualmente o RegHadGEM (Figura 5D) indica valores inferiores de temperatura por todo o estado, o RegMPI (Figura 5E) subestima somente a região sul e litorânea, porém com maior intensidade, chegando até menos 3°C, já o RegNorESM (Figura 5F) apresenta diferenças significativas por todo o estado, subestimando a temperatura na região sul e superestimando até 3°C no interior, enquanto apresenta diferenças próximas de zero na porção central do estado.

3.2 Clima Futuro (2080-2100)

Os resultados da validação das simulações no clima presente tanto para a precipitação como para a temperatura (seção anterior), evidenciam as incertezas associadas à utilização de diferentes modelos globais para dirigir o RegCM4. Essas considerações são um indicativo da necessidade em se trabalhar com um conjunto de simulações climáticas (*ensemble*) para buscar melhorar a qualidade das projeções. Assim, as tendências para o final do século são calculadas como a diferença da média dos conjuntos de precipitação e temperatura do ar entre o futuro e o presente, para o verão e o inverno.

A Figura 6A indica pouca alteração da chuva em DJF para a porção leste do estado, com diminuição estatisticamente não significativa. Na faixa litorânea e no sul de São Paulo, observa-se ligeiro aumento significativo das chuvas. Já para o interior se observa um aumento de precipitação de até 1,5 mm/dia na porção noroeste do estado, com significância na maior parte da região. Durante o verão, a ZCAS é o principal sistema gerador de precipitação no estado de São Paulo, porém sistemas de mesoescala associados a forçantes termodinâmicas também afetam a região (Reboita et al. 2010). Considerando que se observa já no presente uma tendência de deslocamento da ZCAS para sudeste (Cavalcanti & Shimizu 2012; Zilli et al. 2017), a persistência desse deslocamento nas próximas décadas pode justificar o aumento da precipitação média sobre o interior

do estado de São Paulo e sobre o sul/litoral (provavelmente em função das frentes estacionárias associadas à ZCAS) durante o período chuvoso, no futuro.

Para JJA (Figura 6B) observa-se uma diminuição significativa de precipitação em quase todo o estado, principalmente na região nordeste. A passagem de sistemas transientes pelo centro-norte do estado deve ser desfavorecida no período futuro, devido ao deslocamento para o sul do ASAS (Nunez, Solman & Cabré 2009), acarretando menor frequência de ciclones que passam na região (Reboita et al. 2020). Como no inverno, a precipitação no Sudeste ocorre principalmente devido a passagem de frentes frias, a inibição desses sistemas provoca uma diminuição de precipitação no estado de São Paulo. O ligeiro aumento de precipitação no extremo sul do estado, pode estar associado à maior atuação de frentes frias semi-estacionárias (que não conseguem se deslocar para norte, devido à ASAS) nesta região.

Para a temperatura do ar, todo o estado apresentou significância estatística superior a 95%, por isso não é utilizada a marcação hachurada. Em DJF (Figura 7A), é observado um aumento gradual de temperatura do litoral (+2°C) para o interior (+4°C). Para JJA o aumento segue o mesmo padrão espacial e é ainda mais acentuado (Figura 7B), atingindo até +5°C em toda região norte e oeste de São Paulo. Esta tendência concorda com a projeção de menor passagem de frentes frias no inverno para o futuro. Em ambas as estações, a região litorânea mostra um aumento de temperatura mais ameno, associado à maritimidade.

3.2.1 Extremos Climáticos

Os extremos climáticos também serão mostrados a partir da diferença entre os conjuntos do futuro menos o do presente, para o verão e inverno separadamente.

As Figura 8A-B apresentam a diferença da quantidade de dias secos consecutivos por ano. Observa-se que durante o verão há tendência de aumento de dias secos no litoral norte e uma diminuição estatisticamente significativa no noroeste do estado (Figura 8A), sendo condizente com as análises realizadas na Figura 6A. Para JJA, o aumento de dias secos é mais pronunciado no interior do estado (Figura 8B), chegando até a mais 30 dias secos consecutivos para a região norte e oeste. Já no litoral e sul do estado, é observada uma diminuição significativa dos dias secos, o que também está de acordo com as análises da precipitação na Figura 6B.

Este resultado do índice CDD para o período de inverno indica que ao longo do próximo século é provável que as condições secas sobre São Paulo nesta estação sigam a tendência observada ao longo do século XX, com aumento (diminuição) de secas severas no centro-oeste (leste) do estado (Gozzo et al. 2019).

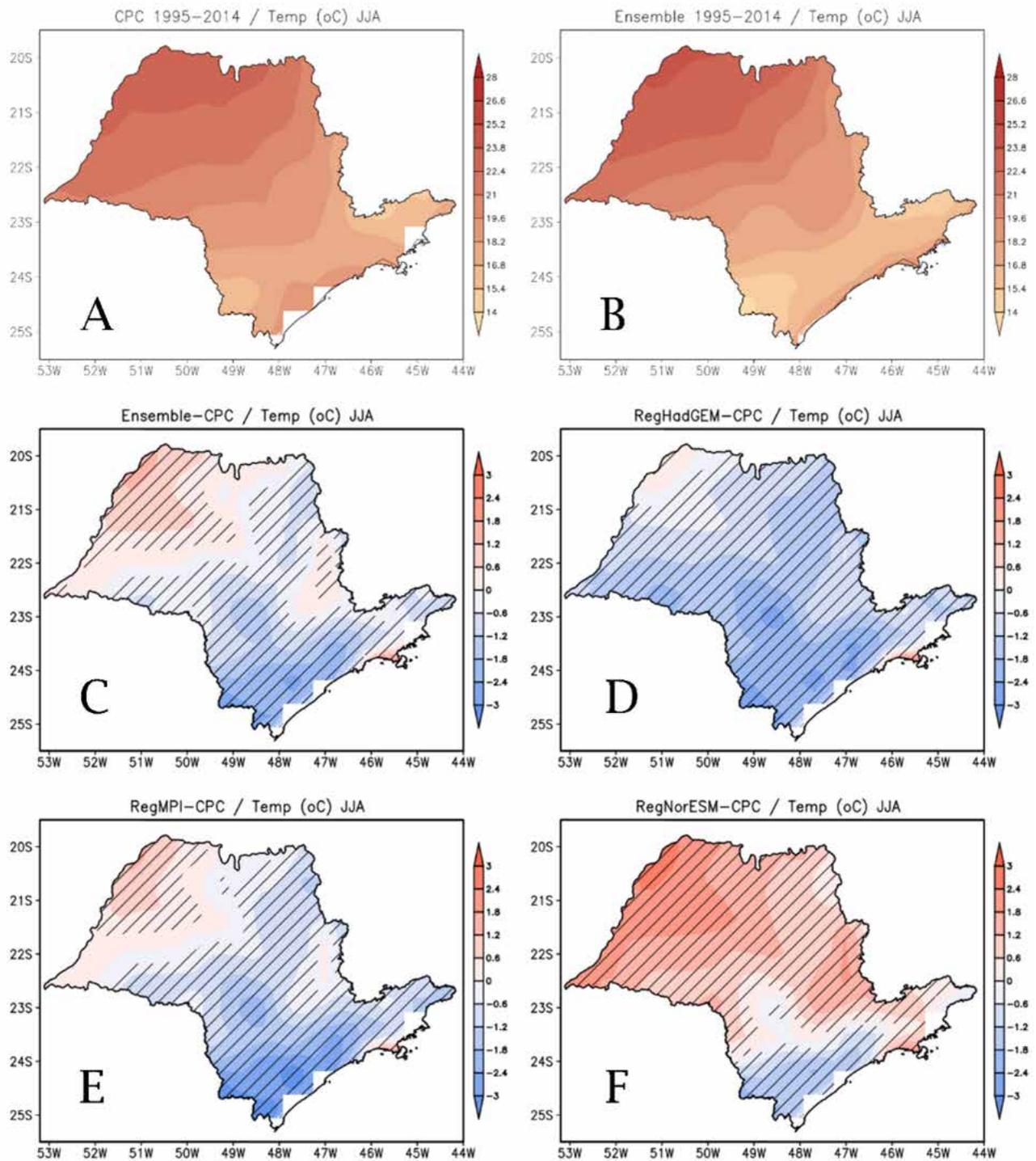


Figura 5 Climatologia da temperatura do ar (°C) para o estado de São Paulo no período de 1995-2014 no inverno, para: A. os dados observados do CPC; B. o conjunto das simulações; C. a diferença entre o conjunto e o observado; D. a diferença entre o RegHadGEM e o observado; E. a diferença entre o RegMPI e o observado; F. a diferença entre o RegNorESM e o observado. A região hachurada indica diferença significativa ao nível de confiança de 95%.

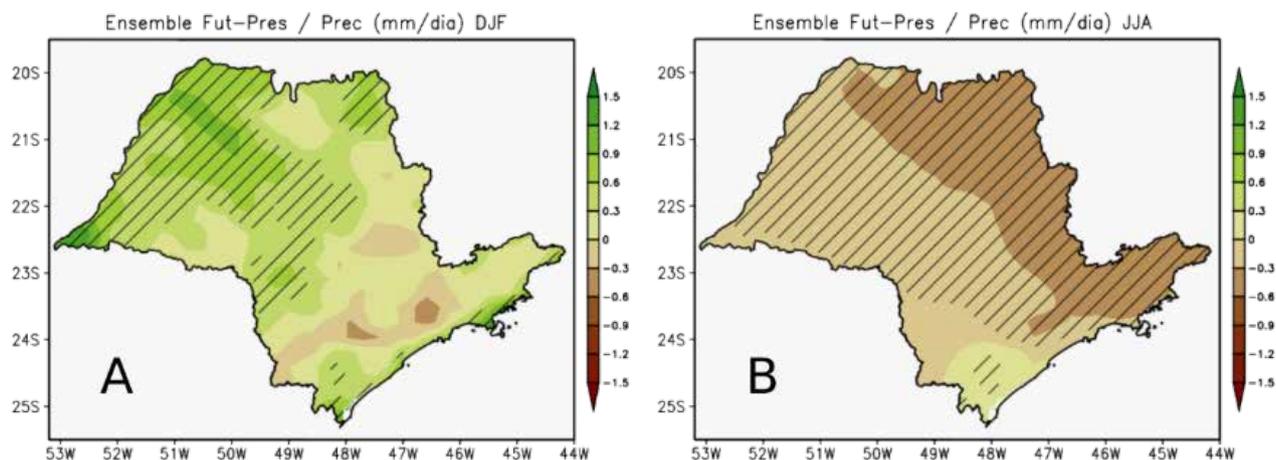


Figura 6 Diferença entre o conjunto do futuro (2080-2100) menos o do presente (1995-2014) para precipitação (mm/dia): A. Verão; B. Inverno. A região hachurada indica diferença significativa ao nível de confiança de 95%.

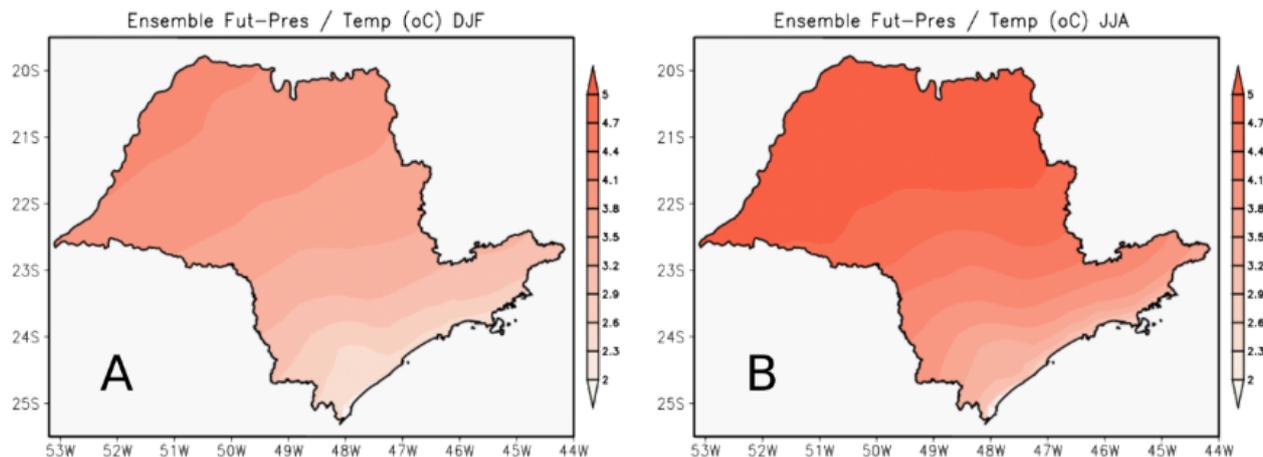


Figura 7 Diferença entre o conjunto do futuro (2080-2100) menos o do presente (1995-2014) para temperatura do ar (°C): A. Verão; B. Inverno. Em todo o estado a diferença é significativa ao nível de confiança de 95%.

A Figura 9A-B, apresenta a diferença do futuro menos o presente da porcentagem de chuvas acima do percentil de 95%. Para o verão, observa-se um aumento significativo em todo o estado (Figura 9A) com o volume das chuvas extremas aumentando até +25% no oeste do estado. As regiões de maior intensidade do R95p coincidem com as regiões de maior aumento médio da precipitação (Figura 6A). Pode-se explicar essa projeção pelo fato de que uma atmosfera mais aquecida consegue reter uma maior quantidade de umidade, proporcionando condições termodinâmicas mais favoráveis para ocorrência de chuvas intensas (Trenberth, Fasullo & Shepherd 2015).

Para JJA, observa-se pequena tendência de aumento de R95p em praticamente todo o estado (Figura 9B), sugerindo que em um cenário com menos ocorrência de

frentes frias, o aumento de temperatura projetado (Figura 7B) pode proporcionar condições mais favoráveis à convecção intensa. Além disso, um possível aumento na convergência de umidade devido ao deslocamento da ASAS para sul também pode colaborar para o ligeiro aumento do índice nesta estação. É importante ressaltar, porém, que em nenhum local do estado a tendência apresentou significância estatística superior a 95%.

Em relação às ondas de calor, a Figura 10A indica que no verão haverá uma diminuição significativa da duração destas ocorrências nas regiões norte e oeste do estado. A projeção da maior quantidade de chuva na região (Figura 6A) pode explicar a diminuição da tendência das temperaturas ultrapassarem o limiar por cinco dias consecutivos.

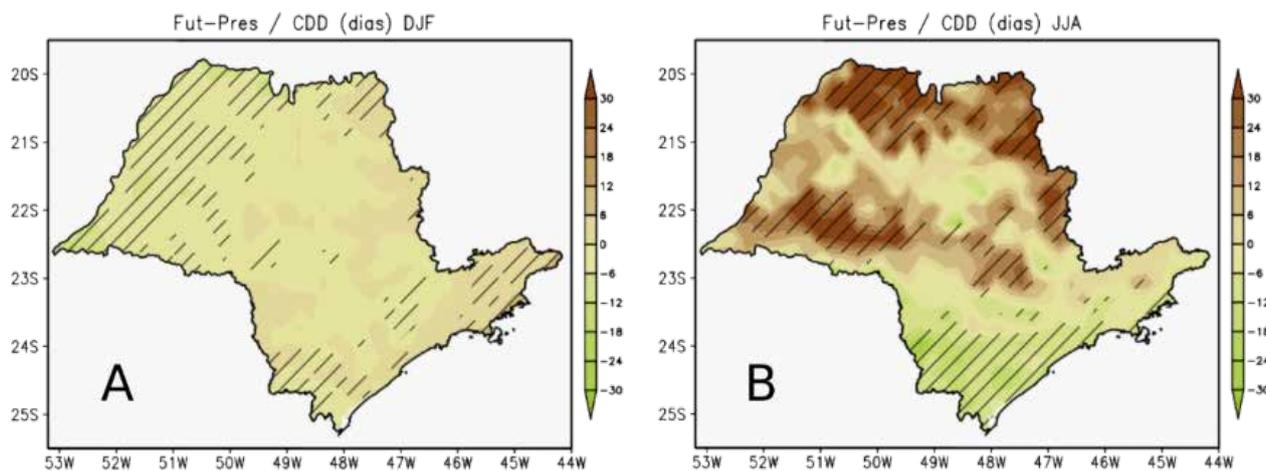


Figura 8 Diferença entre o conjunto do futuro (2080-2100) menos o do presente (1995-2014) para CDD (dias): A. Verão; B. Inverno. A região hachurada indica diferença significativa ao nível de confiança de 95%.

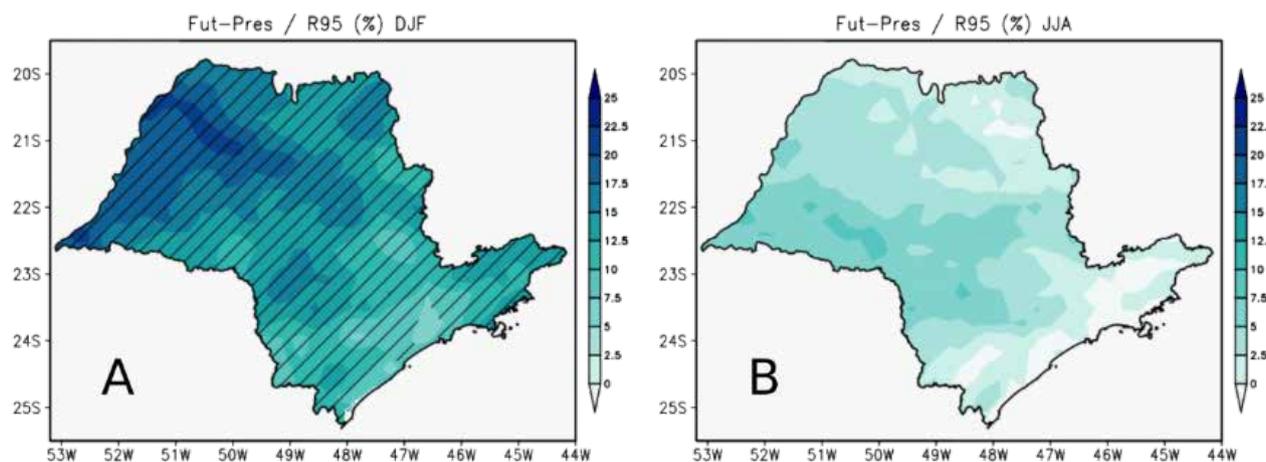


Figura 9 Diferença entre o conjunto do futuro (2080-2100) menos o do presente (1995-2014) para o R95p (%): A. Verão; B. Inverno. A região hachurada indica diferença significativa ao nível de confiança de 95%.

No litoral norte, vale do Paraíba e algumas áreas centrais do estado, há um pequeno porém significativo aumento na duração das ondas de calor. Nestas áreas, isto se deve ao aumento de temperatura média (Figura 7A). Enquanto está associada à maior duração das ondas de calor, o aumento da temperatura média também favorece a concentração da precipitação em episódios convectivos mais severos (Figura 9A), em um cenário onde ocorre aumento das chuvas da região (Figura 6A).

Para JJA, é observado aumento mais significativa da duração das ondas de calor no sul do estado e menos

intensa na região norte (Figura 10B), associada à maior temperatura nas projeções para o inverno (Figura 7B). Já na região central, observa-se diminuição da duração das ondas de calor. No litoral, o limiar de temperatura para caracterizar uma onda de calor é menor, portanto, é mais comum que episódios esporádicos de forte advecção quente ou aquecimento radiativo possam ultrapassá-lo. Para o centro do estado, a diminuição do HWD pode ser uma consequência de que o limiar de temperatura é alto, portanto, a variabilidade de temperatura prevista não é suficiente para ultrapassá-lo.

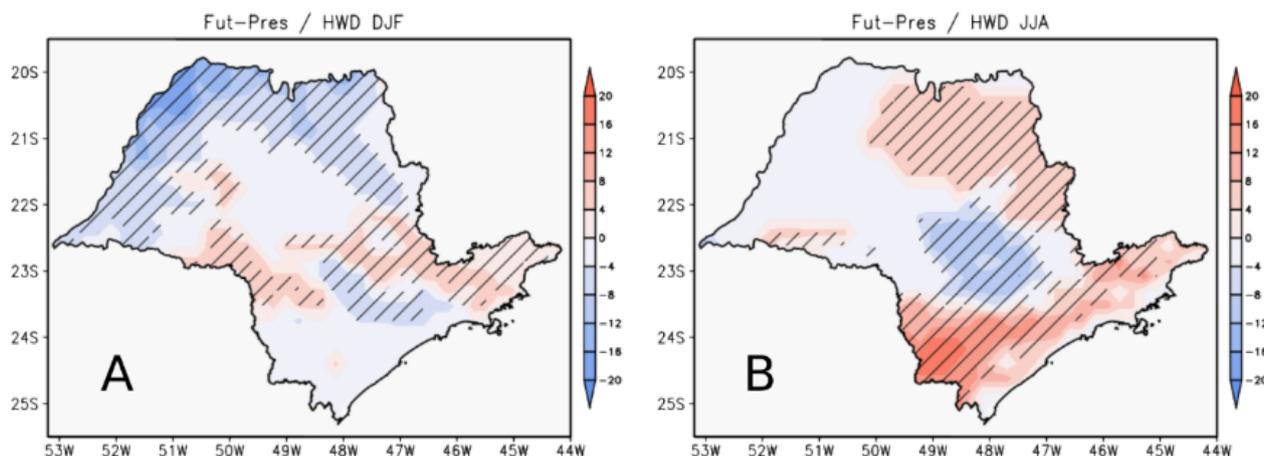


Figura 10 Diferença entre o conjunto do futuro (2080-2100) menos o do presente (1995-2014) para HWD (dias): A. Verão; B. Inverno. A região hachurada indica diferença significativa ao nível de confiança de 95%.

4 Conclusão

Este estudo teve como objetivo analisar a projeção de temperatura e precipitação médias e três índices de extremos climáticos para o estado de São Paulo no final do século utilizando um modelo climático regional. Para isto, foram realizadas três projeções com o modelo climático regional RegCM4, forçado com três diferentes modelos globais, para cenário mais pessimista do AR5 do IPCC (RCP 8.5).

Para a validação do clima presente, comparou-se cada uma das simulações e a média do conjunto com os dados observados do CPC. De uma forma geral, a média do conjunto de simulações representa melhor as observações, tanto para temperatura como precipitação, suavizando os erros associados às diferentes condições de fronteira iniciais e à sensibilidade climática de cada simulação (Feron et al. 2019). Os maiores erros foram observados para a região do leste paulista, com subestimativa da temperatura e superestimativa da precipitação, especialmente no verão.

As projeções para o final do século no verão indicam aumento da precipitação no interior do estado, além do aumento de temperatura para toda a região. No inverno a projeção é de um clima mais seco e mais quente que a climatologia presente. Estes resultados corroboram estudos anteriores (Coppola et al. 2014; Llopart et al. 2020; Llopart, Reboita & da Rocha 2020; Peron, Llopart & Reboita 2016). A análise dos extremos climáticos indica um aumento em geral de suas intensidades, também corroborando outros trabalhos como Giorgi et al. (2014) e Blázquez & Silvina (2020).

Em relação aos índices climáticos, para o verão o CDD projeta uma diminuição de dias secos no interior, já o R95p possui sua maior intensidade na mesma região,

aumentando até 25% de extremos chuvosos no futuro, e o HWD indica uma diminuição da duração de ondas de calor no interior. Esses resultados estão associados a maior precipitação projetada para a região, devido ao deslocamento da ZCAS mais para sul (Cavalcanti & Shimizu 2012; Zilli et al. 2017) e condições termodinâmicas mais favoráveis à convecção intensa para o final do século (Trenberth, Fasullo & Shepherd 2015). Já o padrão de aumento do CDD, R95p e HWD, todos significativos, aponta que as chuvas devem ser mais espaçadas no tempo e concentradas em episódios mais intensos na região do Vale do Paraíba durante esta estação.

O aumento mais significativo no CDD para o final do século foi observado no interior e norte do estado, durante o inverno. Nestas mesmas regiões, R95p mostrou um aumento pequeno e não significativo. Portanto, as chuvas tendem a ocorrer de forma mais espaçada no tempo, porém o volume de chuva médio permanece o mesmo – ou seja, deve ser maior o volume de chuva acumulada por evento. Assim, sugere-se no futuro um aumento das condições termodinâmicas para ocorrência de chuvas extremas não associadas a passagem de sistemas frontais no estado.

Torna-se evidente a partir das análises deste trabalho e de estudos com mais de cem anos, como Arrhenius (1897), que as mudanças climáticas já ocorrem e irão se agravar. Isto tende a afetar especialmente o ciclo hidrológico, intensificando os eventos extremos, com os períodos de secas se estendendo e as chuvas extremas aumentando. Neste cenário, o gerenciamento de água torna-se um desafio cada vez maior, sendo necessário planejar o racionamento de água nos períodos de extrema seca, como já acontece no Brasil (Coelho et al. 2016), e o armazenamento em períodos de cheias.

É importante ressaltar que as projeções utilizadas neste estudo são para o cenário mais pessimista de emissões (RCP8.5), portanto ainda é possível mitigar essas mudanças através de políticas públicas que incentivem o uso de energias renováveis e a preservação da natureza, como o acordo de Paris, que se for cumprido reduzirá significativamente os danos causados às populações mais carentes (Farinosi et al. 2020).

Para pesquisas futuras, sugere-se utilizar outros cenários climáticos como o RCP2.6 e RCP4.5, e avaliar um conjunto maior de simulações climáticas para reduzir as incertezas. Seria importante também realizar os mesmos tipos de análises para outros estados, para se identificar um sinal mais localizado do impacto das mudanças climáticas.

5 Agradecimentos

À Fapesp (Proc. N° 2019/14430-3), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico—Brazil (CNPq, Proc. N° 422042/2018-8), ao Climate Prediction Center (CPC) pelos dados e ao ICTP pelas projeções climáticas fornecidas.

6 Referências

- Ambrizzi, T., Reboita, M.S., da Rocha, R.P. & Llopart, M. 2019, 'The State of The Art and Fundamental Aspects of Regional Climate Modeling in South America', *Annals of The New York Academy of Sciences*, vol. 1436, no. 1, pp. 98-120. <https://doi.org/10.1111/nyas.13932>
- Arrhenius, S. 1897, 'On the Influence of Carbonic Acid in The Air Upon the Temperature of The Ground', *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 41, no. 251, pp. 237-276. <https://doi.org/10.1080/14786449608620846>
- Ashfaq, M., Cavazos, T., Reboita, M.S., Torres-Alavez, J.A., Im, E.S., Olusegun, C.F., Alves, L., Key, K., Adeniyi, M.O., Tall, M., Sylla, M.B., Mehmood, S., Zafar, Q., Das, S., Diallo, I., Coppola, E. & Giorgi, F. 2020, 'Robust late twenty-first century shift in the regional monsoons in RegCM-CORDEX simulations', *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05306-2>
- Bentsen, M., Bethke, I., Debernard, J.B., Iversen, T., Kirkevåg, A., Seland, Ø., Drange, H., Roelandt, C., Seierstad, I.A., Hoose, C. & Kristjansson, J.E. 2013, 'The Norwegian Earth System Model, Noresm1-M—Part 1: Description and Basic Evaluation of The Physical Climate', *Geoscientific Model Development*, vol. 6, no.3, pp. 687-720. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-687-2013>
- Blázquez, J. & Silvina, A.S. 2020, 'Multiscale Precipitation Variability and Extremes Over South America: Analysis of Future Changes from a Set of Cordex Regional Climate Model Simulations', *Climate Dynamics*, vol. 55, no.7, pp. 2089-2106. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05370-8>
- Bozkurt, D., Rojas, M., Boisier, J.P., Rondanelli, R., Garreaud, R. & Gallardo, L. 2019, 'Dynamical downscaling over the complex terrain of southwest South America: present climate conditions and added value analysis', *Climate Dynamics*, vol. 53, no.11, pp. 6745-6767. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04959-y>
- Carvalho, L.M.V., Jones, C. & Liebmann, B. 2002, 'Extreme precipitation events in Southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic Convergence Zone', *Journal of Climate*, vol. 15, no. 17, pp. 2377-2394. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<2377:EPEIS S>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<2377:EPEIS S>2.0.CO;2)
- Cavalcanti, I.F.A. & Shimizu, M.H. 2012, 'Climate Fields over South America and Variability of SACZ and PSA in Hadgem2-ES', *American Journal of Climate Change*, vol. 01, no. 03, pp. 132-144. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2012.13011>
- Chen, M., Shi, W., Xie, P., Silva, V.B., Kousky, V.E., Wayne Higgins, R. & Janowiak, J.E. 2008, 'Assessing Objective Techniques for Gauge-Based Analyses of Global Daily Precipitation', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 113, no. D4, pp. 4110. <https://doi.org/10.1029/2007JD009132>
- Coelho, C.A.S., Oliveira, C.P., Ambrizzi, T., Reboita, M.S., Carpenedo, C.B., Campos, J.L.P.S., Tomaziello, A.C.N., Pampuch, L.A., Custodio, M.S., Dutra, L.M., da Rocha, R.P. & Rehbein, A. 2016, 'The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections', *Climate Dynamics*, vol. 46, no. 11, pp. 3737-3752. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2800-1>
- Coppola, E., Giorgi, F., Raffaele, F., Fuentes-Franco, R., Giuliani, G., Llopart, M., Mangain, A., Mariotti, L., Diro, G.T. & Torma, C. 2014, 'Present and Future Climatologies in the Phase I Crema Experiment', *Climate Change*, vol. 125, no. 1, pp. 23-38. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1137-9>
- Dereczynski, C., Chou, S.C., Lyra, A., Sondermann, M., Regoto, P., Tavares, P., Chagas, D., Gomes, J.L., Rodrigues, D.C. & Skansi, M.M. 2020, 'Downscaling of climate extremes over South America—Part I: Model evaluation in the reference climate', *Weather and Climate Extremes*, vol. 29, pp. 100273. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100273>
- Dereczynski, C., Silva, W.L. & Marengo, J. 2013, 'Detection and Projections of Climate Change in Rio de Janeiro, Brazil', *American Journal of Climate Change*, vol. 2, pp. 25-33. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2013.21003>
- Dunn, R.J., Alexander, L.V., Donat, M.G., Zhang, X., Bador, M., Herold, N., Lippmann, T., Allan, R., Aguilar, E., Barry, A., Brunet, M., Caesar, J., Chagnaud, G., Cheng, V., Cinco, T., Durre, I., de Guzman, R., Htay, T., Wan Ibadullah, W., Bin Ibrahim, M., Khoshkam, M., Kruger, A., Kubota, H., Leng, T., Lim, G., Li-Sha, L., Marengo, J., Mbatha, S., McGree, S., Menne, M., Skansi, M., Ngwenya, S., Nkrumah, F., Oonariya, C., Pabon-Caicedo, J., Panthou, G., Pham, C., Rahimzadeh, F., Ramos, A., Salgado, E., Salinger, J., Sané, Y., Sopaheluwakan, A., Srivastava, A., Sun, Y., Timbal, B., Trachow, N., Trewin, B., van der Schrier, G., Vazquez-Aguirre, J., Vasquez, R., Villarreal, C., Vincent, L., Vischel, T., Vose, R. & Yussuf, M. 2020, 'Development of An Updated Global Land in Situ-Based Data Set of Temperature and

- Precipitation Extremes: Hadex3', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 125, no. 16, pp. e2019JD032263. <https://doi.org/10.1029/2019JD032263>
- Escobar, G.C.J., Reboita, M.S. & Souza, A. 2019, 'Climatology of Surface Baroclinic Zones in The Coast of Brazil', *Atmosfera*, vol. 32, no. 2, pp. 129-141. <https://doi.org/10.20937/atm.2019.32.02.04>
- Farinosi, F., Dosio, A., Calliari, E., Seliger, R., Alfieri, L. & Naumann, G. 2020, 'Will the Paris Agreement Protect us from Hydro-Meteorological Extremes?', *Environmental Research Letters*, vol. 15, no. 10, pp. 104037. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba869>
- Feron, S., Cordero, R.R., Damiani, A., Llanillo, P.J., Jorquera, J., Sepulveda, E., Asencio, V., Laroze, D., Labbe F., Carrasco, J. & Torres, G. 2019, 'Observations and Projections of Heat Waves in South America', *Scientific reports*, vol. 9, no. 1, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44614-4>
- Garreaud, R.D., Vuille, M., Compagnucci, R. & Marengo, J. 2009, 'Present-Day South American Climate', *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 281, no. 3-4, pp. 180-195. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>
- Giorgetta, M., Jungclaus, J., Reick, C., Legutke, S., Brovkin, V., Crueger, T., Esch, M., Fieg, K., Glushak, K., Gayler, V., Haak, H., Hollweg, H., Kinne, S., Kornbluh, L., Matei, D., Mauritsen, T., Mikolajewicz, U., Müller, W., Notz, D., Raddatz, T., Rast, S., Roeckner, E., Salzmann, M., Schmidt, H., Schnur, R., Segschneider, J., Six, K., Stockhause, M., Wegner, J., Widmann, H., Wieners, K., Claussen, M., Marotzke, J. & Stevens, B. 2012, 'CMIP5 simulations of the Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M) based on the MPI-ESM-LR model: the RCP8.5 experiment, served by ESGF', *World Data Center for Climate*. <https://doi.org/10.1594/WDC/CMIP5.MXELr8>
- Giorgi, F. 2019, 'Thirty years of regional climate modeling: where are we and where are we going next?', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 124, no. 11, pp. 5696-5723. <https://doi.org/10.1029/2018JD030094>
- Giorgi, F., Coppola, E., Raffaele, F., Diro, G.T., Fuentes-Franco, R., Giuliani, G., Mamgain A., Llopart, M.P., Mariotti, L. & Torma, C. 2014, 'Changes in Extremes and Hydroclimatic Regimes in the Crema Ensemble Projections', *Climatic Change*, vol. 125, no. 1, pp. 39-51. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1117-0>
- Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M.B., Bi, X., Elguindi, N., Diro, G.T., Nair, V., Giuliani, G., Turuncoglu, U.U., Cozzini, S., Guttler, I., O'Brien, T.A., Tawfik, A.B., Shalaby, A., Zakey, A.S., Steiner, A.L., Stordal, F., Sloan, L.C. & Brankovic, C. 2012, 'Regcm4: Model Description and Preliminary Tests Over Multiple Cordex Domains', *Climate Research*, vol. 52, pp. 7-29. <https://doi.org/10.3354/cr01018>
- Giorgi, F., Jones, C. & Asrar, G.R. 2009, 'Addressing Climate Information Needs at The Regional Level: The CORDEX Framework', *World Meteorological Organization (WMO) Bulletin*, vol. 58, no. 3, pp. 175-183.
- Giorgi, F. & Mearns, L.O. 1999, 'Introduction to special section: Regional climate modeling revisited', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 104, no. D6, pp. 6335-6352. <https://doi.org/10.1029/98JD02072>
- Gozzo, L.F., Palma, D.S., Custodio, M.S. & Machado, J.P. 2019, 'Climatology and Trend of Severe Drought Events in the State of Sao Paulo, Brazil, During the 20th Century', *Atmosphere*, vol. 10, no. 4, pp. 190. <https://doi.org/10.3390/atmos10040190>
- Gutowski, W.J., Giorgi, F., Timbal, B., Frigon, A., Jacob, D., Kang, H.S., Raghavan, K., Lee, B., Lennard, C., Nikulin, G., O'Rourke, E., Rixen, M., Solman, S.A., Stephenson, T. & Tangang, F. 2016, 'WCRP coordinated regional downscaling experiment (CORDEX): a diagnostic MIP for CMIP6' *Geoscientific Model Development*, vol. 9, no. 11, pp. 4087-4095. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-4087-2016>
- Hong, S.Y. & Kanamitsu, M. 2014, 'Dynamical downscaling: Fundamental issues from an NWP point of view and recommendations', *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 50, no. 1, pp. 83-104. <https://doi.org/10.1007/s13143-014-0029-2>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 2010, *Produto Interno Bruto*, acesso em 15 de dezembro de 2020, <<http://censo2010.ibge.gov.br>>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change 2013, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis – Working Group I*, Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Brussels, Belgium.
- Intergovernmental Panel on Climate Change 2014, *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva, Switzerland.
- Jones, C.D., Hughes, J.K., Bellouin, N., Hardiman, S.C., Jones, G.S., Knight, J., Liddicoat, S., O'Connor, F.M., Andres, R.J., Bell, C., Boo, K.-O., Bozzo, A., Butchart, N., Cadule, P., Corbin, K.D., Doutriaux-Boucher, M., Friedlingstein, P., Gornall, J., Gray, L., Halloran, P.R., Hurtt, G., Ingram, W.J., Lamarque, J.-F., Law, R.M., Meinshausen, M., Osprey, S., Palin, E.J., Parsons Chini, L., Raddatz, T., Sanderson, M.G., Sellar, A.A., Schurer, A., Valdes, P., Wood, N., Woodward, S., Yoshioka, M., & Zerroukat, M. 2011, 'The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations', *Geoscientific Model Development*, vol. 04, no. 3, pp. 543-570. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-543-2011>.
- Kain, J.S. & Fritsch, J.M. 1990, 'A One-Dimensional Entraining/Detraining Plume Model and Its Application in Convective Parameterization', *Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 47, no. 23, p. 2784-2802. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1990\)047<2784:AODEPM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047<2784:AODEPM>2.0.CO;2)
- Llopart, M., Domingues, L.M., Torma, C., Giorgi, F., da Rocha, R.P., Ambrizzi, T., Reboita, M.S., Alves, L.M., Coppola, E., Silva, M.L. & Souza, D.O. 2020, 'Assessing Changes in The Atmospheric Water Budget as Drivers for Precipitation Change Over Two Cordex-Core Domains', *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/S00382-020-05539-1>
- Llopart, M., Reboita, M.S. & da Rocha, R.P. 2020, 'Assessment of Multi-Model Climate Projections of Water Resources Over South America Cordex Domain', *Climate Dynamics*, vol. 54, no. 1, pp. 99-116. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04990-z>
- Llopart, M., Reboita, M.S., Coppola, E., Giorgi, F., Da Rocha, R.P. & De Souza, D.O. 2018, 'Land use change over the Amazon Forest and its impact on the local climate', *Water*, vol. 10, no. 2, pp. 149. <https://doi.org/10.3390/w10020149>

- Luiz-Silva, W., Oscar-Júnior, A.C., Cavalcanti, I.F.A. & Treisman, F. 2020, 'An overview of precipitation climatology in Brazil: space-time variability of frequency and intensity associated with atmospheric systems', *Hydrological Sciences Journal*, vol. 66, no. 2, pp. 289-308. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1863969>
- Lyra, A., Tavares, P., Chou, S.C., Sueiro, G., Dereczynski, C., Sondermann, M., Silva, A., Marengo, J. & Giarolla, A. 2018, 'Climate Change Projections Over Three Metropolitan Regions in Southeast Brazil Using the Non-Hydrostatic Eta Regional Climate Model At 5-Km Resolution', *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 132, no. 1, pp. 663-682. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2067-z>
- Marengo, J.A. & Alves, L.M. 2005, 'Tendências hidrológicas da bacia do rio Paraíba do Sul', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 20, no. 2, pp. 215-226.
- Marengo, J.A., Alves, L.M., Ambrizzi, T., Young, A., Barreto, N.J. & Ramos, A.M. 2020, 'Trends in extreme rainfall and hydrogeometeorological disasters in the Metropolitan Area of São Paulo: a review', *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1472, no. 1, pp. 5-20. <https://doi.org/10.1111/nyas.14307>
- Marengo, J.A., Liebmann, B., Grimm, A.M., Misra, V., Silva Dias, P.L., Cavalcanti, I.F.A., Carvalho, L.M.V., Berbery, E.H., Ambrizzi, T., Vera, C., Saulo, C., Noguez-Paugle, J., Zipsper, E., Seth, A. & Alves, L.M. 2012, 'Review recent developments on the South American monsoon system', *International Journal of Climatology*, vol. 32, no. 1, pp. 1-21. <https://doi.org/10.1002/joc.2254>
- Marengo, J.A., Soares, W.R., Saulo, C. & Nicolini, M. 2004, 'Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP-NCAR reanalyses: Characteristics and temporal variability', *Journal of Climate*, vol. 17, no. 12, pp. 2261-2280. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<2261:COTLJE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2261:COTLJE>2.0.CO;2)
- Marrafon, V.H. & Reboita, M.S. 2020, 'Características da Precipitação na América do Sul Reveladas através de Índices Climáticos', *Revista Brasileira De Climatologia*, vol. 26, no. 1, pp. 663-676. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v26i0.72181>
- Meehl, G.A. & Bony, S. 2011, 'Introduction to CMIP5', *Clivar Exchanges*, vol. 16, no. 56, pp. 4- 5.
- Montini, T.L., Jones, C. & Carvalho, L.M. 2019, 'The South American low-level jet: a new climatology, variability, and changes', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 124, no. 3, pp. 1200-1218. <https://doi.org/10.1029/2018JD029634>
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K.; Van Vuuren, D.P.; Carter, T.R.; Emori, S.; Kainuma, M.; Kram, T.; Meehl, G.A.; Mitchell, J.F.B.; Nakicenovic, N.; Riahi, K.; Smith, S.J.; Stouffer, R.J.; Thomson, A.M.; Weyant, J.P. & Wilbanks, T.J. 2010, 'The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment', *Nature*, vol. 463, no. 7282, pp. 747-756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Nunez, M.N.; Solman, S.A. & Cabré, M.F. 2009, 'Regional climate change experiments over southern South America. II: Climate change scenarios in the late twenty-first century', *Climate Dynamics*, vol. 32, no. 7, pp. 1081-1095. <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0449-8>
- Oleson, K.W., Lawrence, D.M., Bonan, G.B., Drewniak, B., Huang, M., Koven, C.D., Levis, S., Li, F., Riley, W.J., Subin, Z.M., Swenson, S.C., Thornton, P.E., Bozbiyik, A., Fisher, R.A., Heald, C.L., Kluzek, E., Lamarque, J.F., Lawrence, P.J., Leung, L.R., Lipscomb, W., Muszala, S., Ricciuto, D.M., Sacks, W.J., Sun, Y., Tang, J., & Yang, Z.L. 2013, *Technical Description of Version 4.5 Of the Community Land Model (CLM)*, NCAR Technical Note no. 503, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado. <https://doi.org/10.5065/D6RR1W7M>
- Oliveira Silva, M.C. & Valverde, M.C. 2017, 'Cenário futuro da disponibilidade hídrica na bacia do Alto Tietê' *Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)*, vol. 43, pp. 114-130. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820170185>
- Önol, B. 2012, 'Effects of coastal topography on climate: high-resolution simulation with a regional climate model', *Climate Research*, 52, pp. 159-174. <https://doi.org/10.3354/cr01077>
- Peron, B., Llopart, M. & Reboita, M. 2016, 'Classificação Climática De Koppen-Geiger através de Simulações e Projeções Climáticas Para Bauru-SP', Artigo apresentado no XIX Congresso Brasileiro de Meteorologia, João Pessoa, 7-11 Novembro.
- Reboita, M.S., Gan, M.A., da Rocha, R.P. & Ambrizzi, T. 2010, 'Regimes De Precipitação na América do Sul: Uma Revisão Bibliográfica', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 25, no. 2, pp. 185-204. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>
- Reboita, M.S., Marietto, D.M.G., Souza, A. & Barbosa, M. 2017, 'Caracterização atmosférica quando da ocorrência de eventos extremos de chuva na região sul de Minas Gerais', *Revista Brasileira de Climatologia*, vol. 21, pp. 20-37. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v21i0.47577>
- Reboita, M.S., Reale, M., da Rocha, R.P., Giorgi, F., Giuliani, G., Coppola, E., Nino, R., Llopart, M., Torres, J.A. & Cavazos, T. 2020, 'Future changes in the wintertime cyclonic activity over the CORDEX-CORE southern hemisphere domains in a multi-model approach', *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05317-z>
- Santos, D.F. & Reboita, M.S. 2018, 'Jatos de baixos níveis a leste dos Andes: comparação entre duas reanálises', *Revista Brasileira de Climatologia*, vol. 22, pp. 423-445. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v22i0.47595>
- Seneviratne, S., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C., Kanae, S., Kossin, J., Reichstein, M. Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C., Zhang, X., Alexander, L.V., Allen, S., Benito, G., Cavazos, T., Clague, J., Conway, D., Della-Marta, P.M., Gerber, M., Gong, S., Goswami, B.N., Hemer, M., Huggel, C., van den Hurk, B., Kharin, V.V., Kitoh, A., Klein Tank, A.M.G., Li, G., Mason, S.J., McGuire, W., van Oldenborgh, G., Orłowsky, B., Smith, S., Thiaw, W., Velegrakis, A., Yiou, P., Zhang, T., Zhou, T. & Zwiers, F.W. 2012, 'Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment' in C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor & P.M. Midgley (eds.), *Managing the Risks of*

- Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 109-230. <https://doi.org/10.7916/d8-6nbt-s431>
- Sillmann, J., Kharin, V.V., Zwiers, F.W., Zhang, X. & Bronaugh, D. 2013, 'Climate Extremes Indices in The CMIP5 Multimodel Ensemble: Part 1. Model Evaluation in The Present Climate', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 118, n. 4, pp. 1716-1733. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50203>
- Silva, P.E., Santos e Silva, C.M., Spyrides, M.H.C. & Andrade, L.D.M.B. 2019, 'Precipitation and air temperature extremes in the Amazon and northeast Brazil', *International Journal of Climatology*, vol. 39, no. 2, pp. 579-595. <https://doi.org/10.1002/joc.5829>
- Tiedtke, M. 1996, 'An Extension of Cloud-Radiation Parameterization in The ECMWF Model: The Representation of Subgrid-Scale Variations of Optical Depth', *Monthly Weather Review*, vol. 124, no. 4, pp. 745-750. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1996\)124<0745:AEOCRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1996)124<0745:AEOCRP>2.0.CO;2)
- Trenberth, K.E., Fasullo, J.T. & Shepherd, T.G. 2015, 'Attribution of Climate Extreme Events', *Nature Climate Change*, vol. 5, no. 8, pp. 725-730. <https://doi.org/10.1038/nclimate2657>
- Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Matsui, T., Hurtt, G., Lamarque, J.F., Meinshausen, M., Smith, S., Grainer, C., Rose, S., Hibbard, K.A., Nakicenovic, N., Krey, V. & Kram, T. 2011, 'The representative concentration pathways: an overview', *Climatic Change*, vol. 109, no. 1, pp. 5-31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Vera, C., Higgins, W., Amador, J., Ambrizzi, T., Garreaud, R., Gochis, D., Gutzler, D., Lettenmaier, D., Marengo, J., Mechoso, C.R. & Noguez-Paele, J. 2006, 'Toward A Unified View of The American Monsoon Systems', *Journal of Climate*, vol. 19, no. 20, pp. 4977-5000. <https://doi.org/10.1175/JCLI3896.1>
- Wilks, D.S. 2006, *Statistical methods in the atmospheric sciences*, Academic Press, San Diego.
- Zhou, J. & Lau, K.M. 1998, 'Does a monsoon climate exist over South America?', *Journal of climate*, vol. 11, no. 5, pp. 1020-1040. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<1020:DA MCEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<1020:DA MCEO>2.0.CO;2)
- Zilli, M.T., Carvalho, L.M., Liebmann, B. & Silva, M.A. 2017, 'A Comprehensive Analysis of Trends in Extreme Precipitation Over Southeastern Coast of Brazil', *International Journal of Climatology*, vol. 37, no. 5, pp. 2269-2279. <https://doi.org/10.1002/joc.4840>

Recebido em: 04/12/2020

Aprovado em: 16/02/2021

Como citar:

Godoy, R.M.P., Gozzo, L.F., Llopart, M., Peron, B.L., Reboita, M.S., Repinaldo, H.F.B. & Marrafon, V.H.A. 2021. 'Projeções Climáticas de Temperatura do Ar e Precipitação para o Estado de São Paulo Utilizando o Modelo Regional RegCM4', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 44: 39850. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_39850