



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Performance dos modelos climáticos do CMIP6 em simular a precipitação em subdomínios da América do Sul no período histórico

Débora Martins de Oliveira¹, João Gabriel Martins Ribeiro², Leandro Fortunato de Faria² e Michelle Simões Reboita³

¹Doutoranda em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Av. BPS, 1303, Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais. deboramartins@unifei.edu.br, ORCID: 0000-0002-9600-7586. ²Mestrando em Meio Ambiente e Recursos Hídricos - UNIFEI, gabrielmr472@unifei.edu.br, ORCID: 0000-0002-9854-8693, fariale8@gmail.com.br, ORCID: 0000-0001-7029-1278. ³Dra. em Meteorologia, Professora e Pesquisadora no Instituto de Recursos Naturais - UNIFEI, reboita@unifei.edu.br, ORCID: 0000-0002-1734-2395.

Artigo recebido em 07/11/2022 e aceito em 18/11/2022

RESUMO

A precipitação é uma variável de grande importância para a compreensão do clima em diferentes escalas espaciais como, por exemplo, a regional e global. Se os modelos climáticos conseguem reproduzir a variabilidade espacial e temporal da precipitação, se tem confiabilidade para o uso deles em estudos do clima futuro. Portanto, este estudo tem como objetivo avaliar a performance de 50 modelos climáticos globais do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) a fim de selecionar aqueles que melhor simulam a climatologia da precipitação sobre dois subdomínios da América do Sul (sul da Amazônia – AMZ e sudeste do Brasil – SDE), no período histórico (1995-2014). Para isso, são realizadas análises estatísticas entre cada modelo e dados considerados como referência (*Global Precipitation Climatology Project Version 1.2* - GPCP e *Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation* - CMAP). Os resultados indicam que o modelo INM-CM5-0 é o que melhor simula a precipitação na AMZ e os modelos MPI-ESM1-2-HR e NESM3 na região SDE. Como estudos com modelos globais necessitam de muitos recursos computacionais, é mais conveniente selecionar aqueles que mostram boa performance para ambas as regiões, assim, são indicados os modelos EC-Earth3-Veg-LR, INM-CM4-8, INM-CM5-0 e MPI-ESM1-2-HR.

Palavras-chave: Modelos de Circulação Geral, CMIP, IPCC, América do Sul.

Performance of CMIP6 climate models in simulating precipitation in subdomains of South America in the historical period

ABSTRACT

Precipitation is a variable of great importance in understanding the climate at different spatial scales, such as regional and global. Whether climate models can reproduce the spatial and temporal variability of precipitation, they are reliable for their use in future climate studies. Therefore, this study aims to evaluate the performance of 50 global climate models from the *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) in order to select those that best simulate the climatology of precipitation over two subdomains of South America in the historical period (1995- 2014): southern Amazon (AMZ) and southeastern Brazil (SDE). In this sense, statistical analyses are performed between each model and data considered as reference (*Global Precipitation Climatology Project Version 1.2*, GPCP and *Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation* - CMAP). The results indicate that the INM-CM5-0 model is the one with best performance in simulating precipitation in AMZ and MPI-ESM1-2-HR and NESM3 models in SDE. As studies with global models need a lot of computational resources, it is more convenient to select those models with good performance in both regions. In this way, EC-Earth3-Veg-LR, INM-CM4-8, INM-CM5-0 and MPI-ESM1-2-HR are the models indicated for both regions.

Keywords: General Circulation Models, CMIP, IPCC South America

Introdução

A precipitação é uma das variáveis mais importantes para a caracterização do clima e para o

estudo de impactos hidrológicos face às mudanças climáticas (Monteiro et al., 2021). A América do Sul, como tem grande parte do seu território em

área tropical, recebe anualmente volumes elevados de precipitação. Além disso, há grande variabilidade temporal e espacial da precipitação (Reboita et al., 2010; Monteiro et al., 2021; Reboita e Ferreira, 2022).

Enquanto a região sul da Amazônia (AMZ) exerce grande influência no clima da América do Sul - em parte, pelo transporte de umidade para os subtropicais pelos jatos de baixos níveis a leste dos Andes -, a região sudeste do Brasil (SDE) é uma das que recebe a contribuição da umidade proveniente da AMZ para a formação de precipitação. Ambas as regiões se situam numa área de clima de monção, caracterizado por dois regimes pluviométricos distintos, isto é, um seco (abril a setembro) e outro chuvoso (outubro a março). No período chuvoso, a convecção local e a Zona de Convergência do Atlântico Sul - ZCAS (Escobar et al., 2018; Silva et al., 2019) destacam-se como principais causadores de precipitação. A ZCAS é uma banda de nebulosidade e precipitação com orientação noroeste-sudeste, que se estende do sul da Amazônia até o sudoeste do oceano Atlântico Sul, passando pelas regiões centro-oeste e sudeste do Brasil; sua duração varia de 3 a 15 dias (Kousky, 1988; Nobile Tomaziello, 2010; Silva et al., 2019; Bartolomei e Reboita, 2022).

Embora a AMZ e SDE são regiões que registram totais elevados de precipitação no período chuvoso, a SDE é a que mais é afetado pelos eventos extremos (chuvas volumosas que causam inundações e deslizamentos de encostas), pois é a região com maior adensamento populacional no Brasil e com muitas pessoas residindo em áreas de risco devido à vulnerabilidade social (Hummell et al., 2016)

Como a AMZ e SDE são regiões importantes em diferentes aspectos (social, ambiental, etc.), os tomadores de decisão devem elaborar estratégias de mitigação frente aos impactos projetados em virtude das mudanças climáticas. Mas de onde é proveniente as informações sobre o clima futuro? Os modelos climáticos são as ferramentas que fornecem as projeções do clima futuro. Esses modelos também envolvem cenários, que são suposições sobre o estado sócio-econômico do planeta no futuro. Como em Ambrizzi et al. (2019) e Reboita e Ambrizzi (2022) há uma revisão sobre modelos climáticos, cenários e projeções, aqui esses tópicos não serão aprofundados. Entretanto, é importante mencionar que há um grupo internacional, chamado de *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP) responsável por criar protocolos para a realização das projeções climáticas

utilizadas nos relatórios do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) e que são disponibilizadas em base de dados de acesso público para os pesquisadores.

Antes de qualquer estudo do clima futuro, deve-se avaliar a performance dos modelos em simular o clima presente (também chamado de histórico), pois se o modelo não é hábil em representar o período histórico, logo não se tem confiabilidade no que ele projeta para o futuro (Wieder et al., 2015; Raju e Kumar, 2020). Outro ponto é o relacionado às incertezas das simulações, que provêm, por exemplo, da estrutura dos modelos e da variabilidade natural do clima. Para reduzir tais incertezas é utilizada a técnica de simulações por conjunto (*ensembles*), ao invés de uma única projeção. Isso significa que são utilizadas várias simulações de um único modelo e/ou simulações produzidas por diferentes modelos. Nota-se, portanto, que a área de estudos do clima futuro é custosa financeiramente, uma vez que necessita de computadores potentes para executar os modelos numéricos e de espaço físico para guardar as simulações. Além disso, demanda de uma equipe de profissionais com experiência na área. Não obstante, os usuários desses dados também necessitam de espaço em disco para armazenarem os dados para seus estudos. Diante disso, para a redução de custos por parte dos usuários de simulações e projeções numéricas, uma estratégia é avaliar os modelos que melhor representam o clima presente no local de interesse e selecioná-los para gerar as avaliações do clima futuro, sem necessitar de todos os modelos disponíveis (Dias e Reboita, 2021).

O sexto relatório de avaliação (AR6) do IPCC, embora apresente avaliações dos modelos do CMIP6 na América do Sul, carece de análises regionalizadas, isto é, focadas em subdomínios. Ademais, uma análise para as regiões AMZ e SDE complementaria o estudo de Dias e Reboita (2021), que avaliaram a performance de 46 modelos do CMIP6 sobre a bacia do Rio São Francisco e sobre o Brasil tropical, encontrando o E3SM-1-0, EC-Earth3, EC-Earth3-AerChem, EC-Earth3-Veg, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-LR e TaiESM1 como os modelos com melhor performance em simular a precipitação sazonal. Uma vez que, uma forma de identificar as melhores projeções futuras para uma região, é obtendo a classificação dos melhores modelos no período histórico. Assim, é possível filtrar apenas os modelos que melhor descrevem o comportamento de determinada região. Portanto, o objetivo deste estudo é realizar uma análise da performance dos modelos do

CMIP6 em simular a precipitação nas regiões AMZ e SDE no período histórico (1995-2014) e assim, encontrar os melhores modelos para este período.

Metodologi

Área de Estudo

Embora a área de estudo seja focada nas regiões AMZ e SDE, na representação dos mapas, toda a América do Sul (entre 90°O e 30°O, 60°S e 15°N) será mostrada, a fim de contribuir para um conhecimento mais amplo da representação espacial dos modelos (Figura 1). Para as análises estatísticas, são extraídas as séries temporais da precipitação média nos subdomínios: AMZ (68°O, 52°O, 15°S e 5°S) e SDE (50°O, 42°O, 22.5°S e 17°S) (Figura 1).

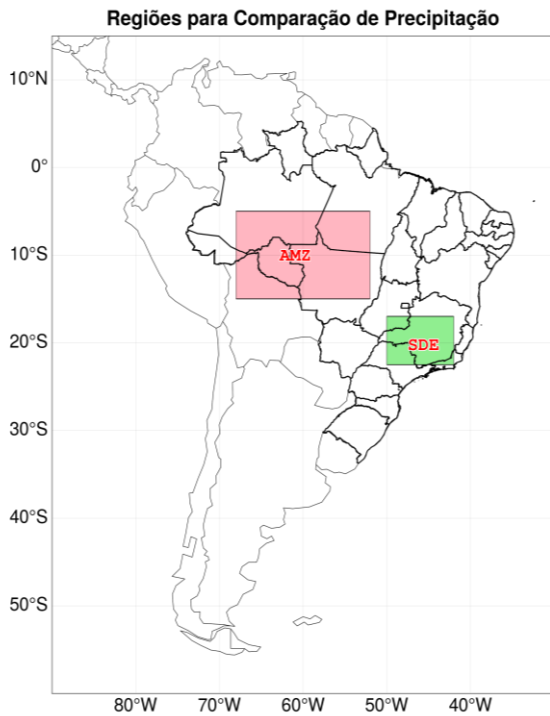


Figura 1. Região de Estudo. O retângulo vermelho representa o sul da Amazônia (AMZ) e o retângulo verde parte da região sudeste do Brasil (SDE).

Dados de Referência

Foram utilizados dados de precipitação mensal (considerados como dados de referência, ou observado), do *Global Precipitation Climatology Project Version 1.2* (GPCP; Adler et al., 2012) e do *Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation* (CMAP; Xie et al., 2007 - <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/>) possuindo 1° e 2,5° de resolução horizontal, respectivamente, para o período de janeiro de 1995 a dezembro de 2014. Estas duas bases de dados foram utilizadas para posterior comparação com os dados dos modelos do CMIP6.

Modelos Climáticos do CMIP6

Foram obtidas as simulações de 50 modelos participantes do CMIP6 (Tabela 1) da variável precipitação já acumulada em valores mensais para o período histórico (de janeiro de 1995 a dezembro de 2014), disponíveis na plataforma *Earth System Grid Federation* (ESGF; <https://esgf-node.llnl.gov/search/>). O período 1995 a 2014 é utilizado como histórico, seguindo a recomendação do IPCC (Ashfaq et al., 2021).

Para comparação dos dados referência com os modelos, todos os conjuntos foram interpolados para uma grade regular de 1° de resolução horizontal com o método de interpolação bi-linear (mesmo um desses conjuntos já estando em resolução de 1° ele foi interpolado para todos os pontos de grade serem coincidentes com os dos demais conjuntos). Como os dados considerados referência também não estão livres de incertezas, para a validação das simulações, utilizou-se a média obtida entre o GPCP e o CMAP (essa média será denominada de ensemble de referência). O cálculo da média dos dados usados para validação é uma prática comum na área de modelagem climática (Llopart et al., 2014; Llopart et al., 2021; Reboita et al., 2021).

Tabela 1. Resolução horizontal (longitude x latitude) e referências dos modelos do CMIP6.

	Modelo	Lat x Lon	Referências		Modelo	Lat x Lon	Referências
a	ACCESS-CM2	192x144	Dix et al. (2019)	z	FIO-ESM-2-0	288x192	Song et al. (2019)
b	ACCESS-ESM1-5	192x145	Ziehn et al. (2019)	aa	GFDL-ESM4	288 x 180	Krasting et al. (2018)
c	AWI-CM-1-1-SR	384x192	Semmler et al. (2018)	bb	GISS-E2-1-G-CC	144 x 90	NASA-GISS (2019)
d	AWI-ESM-1-1-LR	192x96	Danek et al. (2020)	cc	GISS-E2-1-G	144x90	NASA-GISS-2018

e	BCC-CSM2-SR	320x160	Wu et al. (2018)	dd	GISS-E2-1-H	144x90	NASA-GISS (2019)
f	BCC-ESM1	128x64	Zhang et al. (2018)	ee	GISS-E2-2-H	144x91	NASA-GISS (2020)
g	CAMS-CSM1-0	320x160	Rong (2019)	ff	IITM-ESM	192x94	Raghavan e Pânico (2019)
h	CESM2-FV2	144x96	Danabasoglu (2019c)	gg	INM-CM4-8	180x120	Volodin et al. (2019a)
i	CESM2-WACCM-FV2	144x96	Danabasoglu (2019d)	hh	INM-CM5-0	180x120	Volodin et al. (2019b)
j	CESM2-WACCM	288x192	Danabasoglu (2019b)	ii	IPSL-CM5A2-INCA	144 x 143	Boucher et al. (2018)
k	CESM2	288x192	Danabasoglu (2019a)	jj	IPSL-CM6A-LR-INCA	144 x 143	Boucher et al. (2018)
l	CMCC-CM2-HR4	288x192	Scoccimarro et al. (2020)	kk	IPSL-CM6A-LR	144x143	Boucher et al. (2018)
m	CMCC-CM2-SR5	288x192	Lovato e Peano (2020)	ll	KACE-1-0-G	192x144	Byun et al. (2019)
n	CMCC-ESM2	288 x 192	Peano et al. (2020)	mm	KIOST-ESM	192x96	Kim et al. (2019)
o	CanESM5	128x64	Swart et al. (2019)	nn	MCM-UA-1-0	96x80	Stouffer (2019)
p	E3SM-1-0	360x180	Bader et al. (2019a)	oo	MPI-ESM-1-2-HAM	192x96	Neubauer et al. (2019)
q	E3SM-1-1-ECA	360x180	Bader et al. (2020)	pp	MPI-ESM1-2-RH	384x192	Jungclaus et al. (2019)
r	E3SM-1-1	360x180	Bader et al. (2019b)	qq	MPI-ESM1-2-LR	192x96	Wieners et al. (2019)
s	EC-Earth3-AerChem	512x256	EC-Earth-Consortium (2020)	rr	MRI-ESM2-0	320x160	Yukimoto et al. (2019)
t	EC-Earth3-CC	320x160	EC-Earth-Consortium (2020)	ss	NESM3	192x96	Cao e Wang (2019)
u	EC-Earth3-Veg-LR	320x160	EC-Earth-Consortium (2020)	tt	NorCPM1	144x96	Bethke et al. (2019)
v	EC-Earth3-Veg	512x256	EC-Earth-Consortium (2019a)	uu	NorESM2-LM	144x96	Seland et al. (2019)
w	EC-Earth3	512x256	EC-Earth-Consortium (2019b)	vv	NorESM2-MM	288x192	Bentsen et al. (2019)
x	FGOALS-f3-L	288 x 180	Yu (2019)	ww	SAM0-UNICON	288x192	Park e Shin (2019)
y	FGOALS-g3	180x80	Li (2019)	xx	TaiESM1	288x192	Lee e Liang (2020)

Análises Estatísticas

Para cada modelo foi calculada a climatologia sazonal (verão: DJF, outono: MAM, inverno: JJA e primavera: SON) da precipitação por ponto de grade. O mesmo foi realizado para a média do *ensemble* de referência. Por brevidade, apenas o viés relativo (Tabela 1), que é a diferença entre cada modelo e o *ensemble* de referência, será apresentado em mapas.

A partir das séries temporais sazonais da média da precipitação (mm dia⁻¹) na área de cada subdomínio, foram calculadas as medidas estatísticas descritas na Tabela 2. A fim de sintetizar os resultados estatísticos obtidos e

facilitar a identificação dos modelos com melhor performance, foi criado um índice que combinou as estatísticas apresentadas na Tabela 2 (sendo denominado de índice combinado).

Um modelo é considerado com boa performance se, dentro da estação do ano, mostra (i) viés relativo entre $\pm 30\%$; (ii) correlação espacial com maior que 0,3 e (iii) índice de Willmott maior que 0,5. O limiar de $\pm 30\%$ foi usado no viés, pois segue o recomendado por Giorgi e Mearns (1999). Para a correlação, valores acima de 0,29 não são fracos, esses são usados no estudo (Cohen, 1988). As estatísticas apresentadas na tabela 2 foram calculadas para cada modelo e para cada estação do

ano para as regiões de estudo. As análises estatísticas são apresentadas em diagramas *heatmaps*, que indicam os valores estatísticos através de cores, facilitando a visualização da

performance individual de cada modelo, quando um grande número de conjuntos é comparado (Cos et al., 2021; Faye e Akinsanola, 2021; Wang et al., 2021).

Tabela 2. Estatísticas para comparação entre a precipitação *ensemble* de referência e modelos do CMIP6.

Estatística	Descrição	Equação
Viés Relativo ($Viés_{rel}$)	Representa a variação entre os valores simulados e os dados de referência em porcentagem, podendo indicar valores de superestimativas (valores positivos) ou subestimativas (valores negativos) da precipitação simulada. Essa medida é mais representativa do que o viés absoluto, pois padroniza os valores em uma mesma escala em porcentagem.	$Viés_{rel} = \frac{(M - O)}{O} \times 100$ onde: M: Precipitação dos Modelos do CMIP6 O: <i>Ensemble</i> da Precipitação Observada
Correlação de Pearson (r)	Uma vez tendo as climatologias sazonais da precipitação (média do período de 1995 a 2014) em pontos de grade de cada modelo e do <i>ensemble</i> de referência, os valores dos pontos de grade foram transformados numa série temporal para o cálculo da correlação espacial. Essa correlação indicará se o modelo consegue reproduzir o padrão espacial mostrado no <i>ensemble</i> de referência. A correlação varia entre -1 e +1, ou seja, quanto mais próximo de +1, melhor correlacionado está o valor de precipitação modelado em relação ao <i>ensemble</i> de referência.	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O)(M_i - M)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - M)^2 \sum_{i=1}^n (O_i - O)^2}}$ onde: O_i e M_i representam os valores de precipitação do <i>ensemble</i> de referência e modelados, respectivamente, e n representa o número de pontos de grade inseridos dentro de cada região (AMZ e SDE)
Índice de Willmott (d)	Mostra o quanto os valores de precipitação modelados concordam com os dados de referência, ou seja, mostra a precisão dos modelos em relação ao observado. Pode variar de 0 (discordância entre valores observados e os modelos) a 1 (modelos que mais se aproximam dos valores de referência) (Willmott, 1981).	$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - O + O_i - O)^2}$

Resultados e discussões

Padrão Espacial do Viés

Por motivos de brevidade, aqui só será apresentado o viés relativo entre cada modelo e o *ensemble* de referência para DJF (Figura 2), já que essa é a estação mais chuvosa na maior parte da América do Sul. Os modelos tiveram maior viés nos setores tropicais, como, por exemplo, na região de atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Isso se deve ao fato de que no verão grande parte da chuva é decorrente da atividade

convectiva, o que é parametrizado pelos modelos, podendo levar a grandes incertezas que se refletem no viés. Para a AMZ, uma grande parte dos modelos, como por exemplo FGOALS-f3-L, FGOALS-g3, IITM-ESM e KIOST-ESM, subestima a precipitação em 40%. Já para a SDE, 80% dos modelos superestimam a precipitação em 50%. Numa análise geral, o modelo com melhor desempenho na AS é o SAM0-UNICON, que mostra um padrão espacial do viés relativo da precipitação diária mais uniforme.

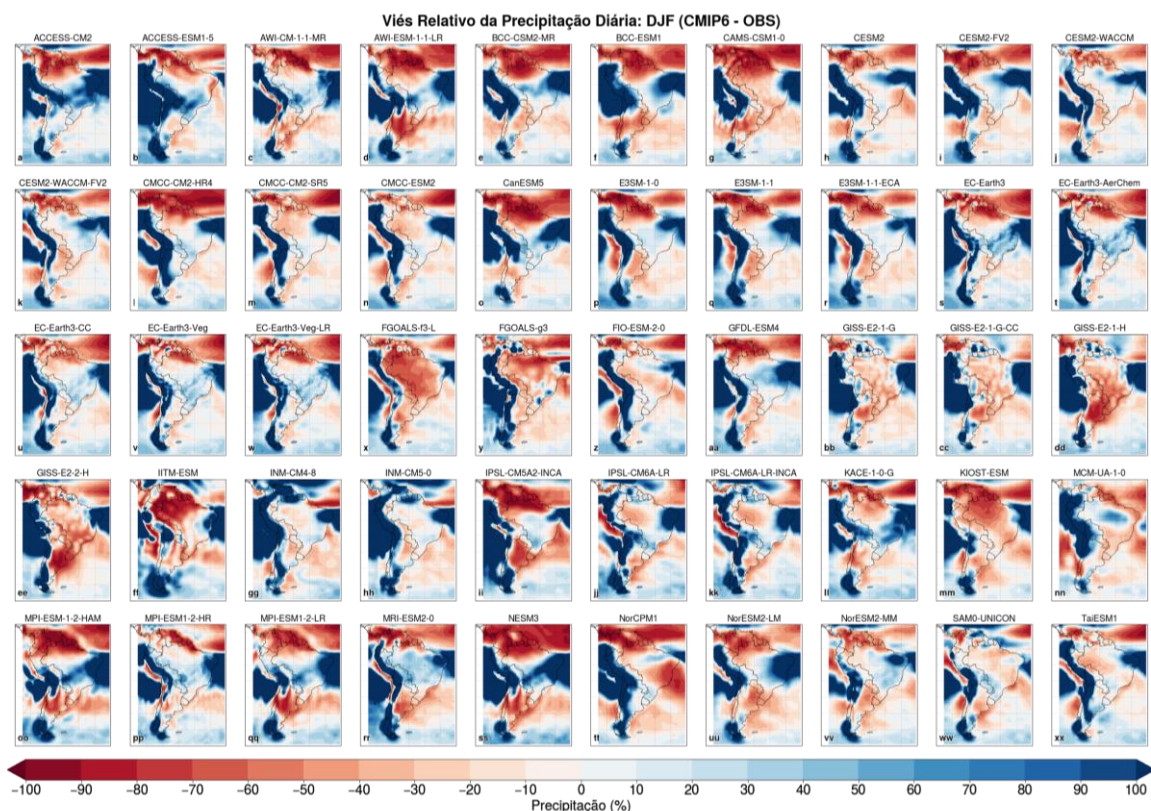


Figura 2. Viés relativo (%) da precipitação em DJF (Modelos - *ensemble* de referência).

Subdomínios

A Figura 3 apresenta o viés relativo de cada modelo para a AMZ e SDE, por estação do ano. Em relação à AMZ, para DJF há modelos com viés de até 5%, apresentando um bom desempenho, que são BCC-CSM2-MR, BCC-ESM1, CESM2-WACCM, CESM2, E3SM-1-0, E3SM-1-1, EC-Earth3-CC, EC-Earth3-Veg, EC-Earth3, NESM3, NorESM2-LM e NorESM2-MM. Em contrapartida, alguns modelos subestimaram a precipitação em mais de 50%, como o FGOALS-f3-L, FGOALS-g3, GISS-E2-1-H, IITM-ESM e KIOST-ESM, não representando bem a precipitação na AMZ no verão. Para MAM, a melhor representação da precipitação foi com KACE-1-0-G, MPI-ESM1-2-LR e NorESM2-MM, com valores muito próximos ao *ensemble* de referência. Em JJA, 85% dos modelos subestimaram a precipitação na região sul da AMZ; os modelos EC-Earth3 e suas variações apresentaram o melhor desempenho. KACE-1-0-G mostrou a pior performance, já que superestima a precipitação em mais de 70%. SON mostrou poucos modelos superestimando a precipitação (apenas 20%), o melhor resultado foi apresentado pelo INM-CM5-0, com viés de 1%.

Analisando as quatro estações do ano de forma conjunta, os modelos com melhor desempenho para a precipitação na região AMZ

são os modelos EC-Earth3 e suas variações, com ênfase para o EC-Earth3-AerChem que para todas as estações apresentou uma relação menor que 10% de erro entre os valores do *ensemble* de referência. A análise conjunta do *heatmap* de todas as estações do ano, mostraram baixa performance, subestimando muito a precipitação para todas as estações, como o FGOALS-f3-L, FGOALS-g3, GISS-E2-1-G, GISS-E2-1-H e GISS-E2-2-H.

Em relação ao viés relativo para a região SDE, em DJF, estação chuvosa, vários modelos apresentaram bom desempenho, com viés de até $\pm 10\%$ em relação aos dados de referência. Destacam-se os modelos AWI-ESM-1-1-LR, CESM2-WACCM-FV2, CMCC-CM2-HR4, CMCC-CM2-SR5, CMCC-ESM2, E3SM-1-0, E3SM-1-1, FGOALS-g3, IPSL-CM6A-LR-INCA, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR e MPI-ESM1-2-LR, com magnitude de viés relativo de até 3%. Em MAM, os modelos E3SM-1-0, E3SM-1-1, EC-Earth3-AerChem, EC-Earth3-Veg-LR e INM-CM5-0 apresentaram viés relativo próximo de 0, mostrando que a simulação está bem próxima aos dados de referência.

Para JJA, estação seca, é importante mencionar que os volumes de precipitação são muito baixos comparados aos de DJF, portanto, um pequeno viés já é indicativo de um grande erro percentual. Diante disso, mostra-se que mais de 80% dos modelos subestimaram a precipitação em

mais de 30%. No entanto, os modelos ACCESS-CM2, IITM-ESM superestimaram muito a precipitação. FGOALSg3 e KACE-1-0-G mostraram a melhor performance para a estação seca da SDE, como observado no estudo de Dias e Reboita (2021). No geral, em SON a representação melhora, com vários modelos apresentando viés relativo de até 10%.

Considerando todas as estações do ano, na região SDE, os modelos ACCESS-CM2 e KACE-1-0-G indicam altos percentuais de

superestimativa, enquanto GISS-E2-1-H, GISS-E2-2-H e KIOST-ESM indicaram os percentuais mais altos de subestimativa. Nenhum modelo teve bom desempenho em todas as estações, como o E3SM-1-0 que se destaca para DJF e MAM, ratificado pela literatura, como nos resultados encontrados nos estudos de Dias e Reboita (2021), contudo, este modelo não possui tão boa performance para JJA e SON. Já o FGOALS-g3 se aproximou mais dos dados de referência quando analisado em todo o período

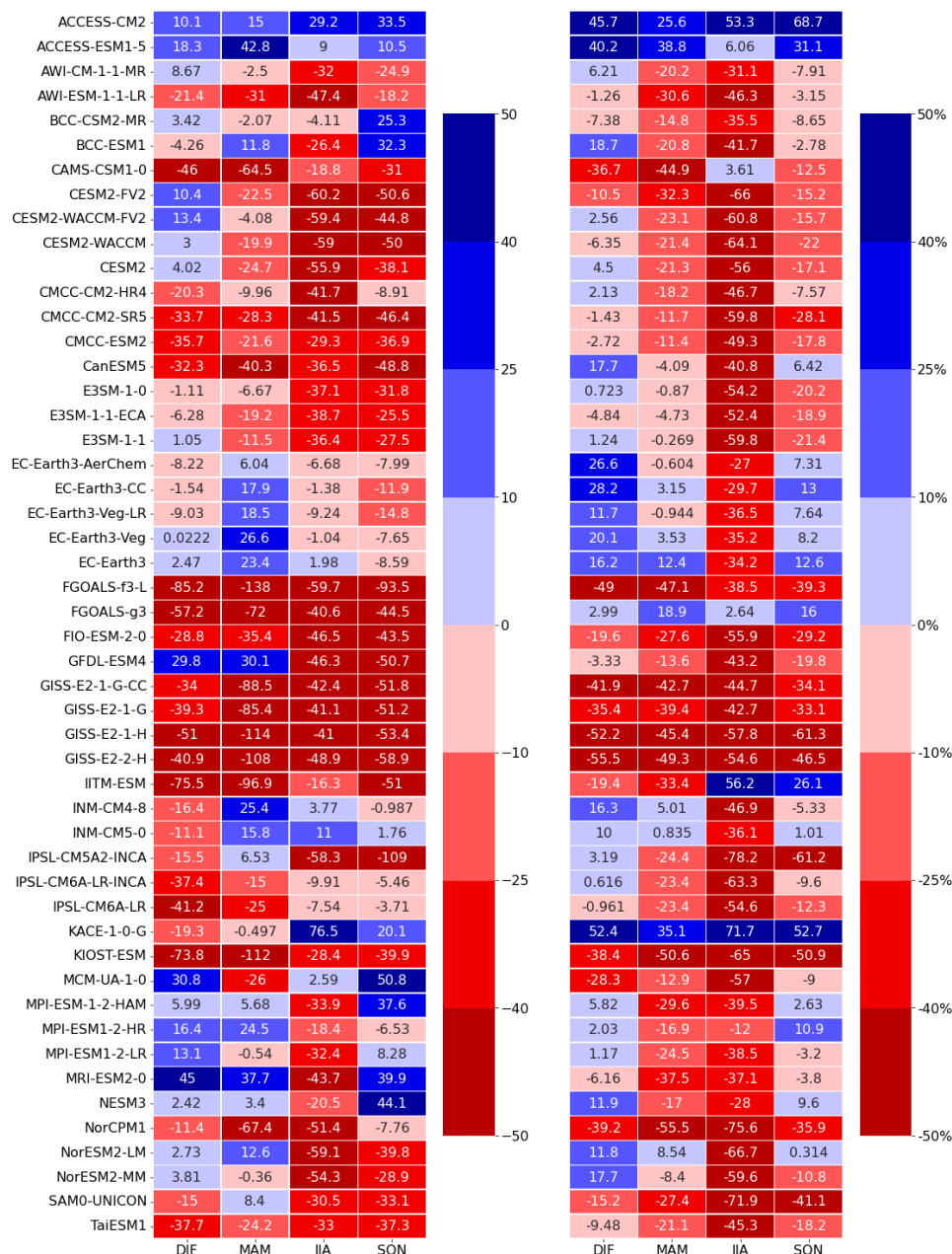


Figura 3. Viés relativo (%) da precipitação para as regiões AMZ (lado esquerdo) e SDE (lado direito).

A correlação espacial entre cada modelo e o *ensemble* de referência para a AMZ e SDE é mostrada na Figura 4. Na AMZ, em DJF a maioria

dos modelos apresenta correlação inferior a 0,4. O CESM2 mostra a melhor correlação para essa estação, 0,67 e o CESM2-WACCM, 0,61. Em

MAM e JJA praticamente todos os modelos apresentam correlação positiva. Para MAM, 7 modelos têm correlação acima de 0,9, enquanto para JJA, foram 16 modelos. Esse resultado aponta uma boa performance dos modelos para representar o padrão espacial da precipitação dentro do subdomínio nessa época do ano. Em SON, a correlação entre os modelos e o *ensemble* de referência não é tão alta quanto nas estações MAM e JJA, assim como em DJF, poucos apresentam valores acima de 0,4. O MRI-ESM2-0 mostra a maior correlação encontrada para essa estação (0,59). Considerando o período todo, os modelos CESM2-WACCM, CESM2, INM-CM4-8, INM-CM5-0, MRI-ESM2-0 e NorESM2-MM apresentaram os maiores índices de correlação entre a precipitação modelada e observada na região sul da AMZ.

Na região SDE, em DJF, 15 modelos têm correlação maior que 0,8. Se destacam INM-CM4-8, INM-CM5-0, KACE-1-0-G com correlação de 0,9 entre dados modelados e o *ensemble* de referência. Em MAM, o desempenho da maioria dos modelos não foi satisfatório, com índices de correlação menores que 0,5.

Nessa estação do ano, a melhor performance foi do modelo NorCPM1 devido à correlação de 0,83. BCC-ESM1 e NorESM2-LM indicaram alta correlação negativa (-0,73) para MAM, o que não é um bom resultado. Em JJA, os modelos EC-Earth3 e suas variações ganham destaque pela boa performance, ACCESS-CM2, CAMS-CSM1-0, IITM-ESM e MPI-ESM1-2-HR, também apresentam índices de correlação maiores que 0,9. Para SON nenhum modelo teve correlação maior que 0,8; as melhores simulações foram as dos modelos CanESM5 e IITM-ESM (0,75).

Para a região SDE, os modelos que se destacaram foram AWI-CM-1-1-MR, KACE-1-0-G e MPI-ESM1-2-HR que apresentam correlação mais alta e positiva para todo o período; porém para simulação em MAM a correlação não é tão satisfatória.

O índice de Willmott é apresentado na Figura 5 para a AMZ e SDE. Valores mais

próximos de 1 indicam bom desempenho do modelo em simular a precipitação. Para a AMZ, em DJF os modelos não apresentaram bons resultados segundo o índice de Willmott, pois a maioria dos modelos mostram valores abaixo de 0,5; NorESM2-MM, com índice de 0,69, foi o melhor modelo para essa estação. Em MAM, os modelos NorESM2-MM e SAM0-UNICON obtiveram valores de 0,96 e 0,97, respectivamente. Além disso, 28 modelos obtiveram valores acima de 0,7, mostrando que as simulações foram eficientes nessa época do ano. Em JJA os modelos EC-Earth3 e suas variações tiveram bons resultados, todos com valores acima de 0,9. Além deles, ACCESS-ESM1-5, BCC-CSM2-SR, IPSL-CM6A-LR-INCA e IPSL-CM6A-LR também se mostraram eficientes para a simulação na região AMZ neste período. Em SON as simulações apresentam valores baixos quanto em DJF, os modelos INM-CM4-8 e INM-CM5-0 foram os únicos com índice de Willmott acima de 0,7.

Fica evidente que, o desempenho dos modelos é diferente entre as regiões analisadas, pois na SDE os melhores valores do índice de Willmott foram obtidos em DJF, enquanto para MAM os valores não foram tão satisfatórios; situação inversa ao que ocorre na região AMZ. Em DJF os modelos E3SM-1-1 e GFDL-ESM4 mostram boa concordância com o *ensemble* de referência, com índice de Willmott de 0,9; além disso, a maioria dos modelos apresentam valores acima de 0,5. Em MAM nenhum modelo apresentou boa concordância entre os valores modelados e referência, uma vez que mostram valores abaixo de 0,42. Para JJA, os modelos EC-Earth3 e suas variações foram mais eficientes, apontando índice de Willmott acima de 0,77; além deles, ACCESS-ESM1-5, CAMS-CSM1-0 e MPI-ESM1-2-HR mostraram bons resultados, com índices acima de 0,9. Em SON a maioria dos modelos também não representaram bem a precipitação, apenas o CanESM5 apresenta índice acima de 0,7. Para a região SDE, nenhum modelo apontou boa concordância para todas as estações, segundo o índice de Willmott

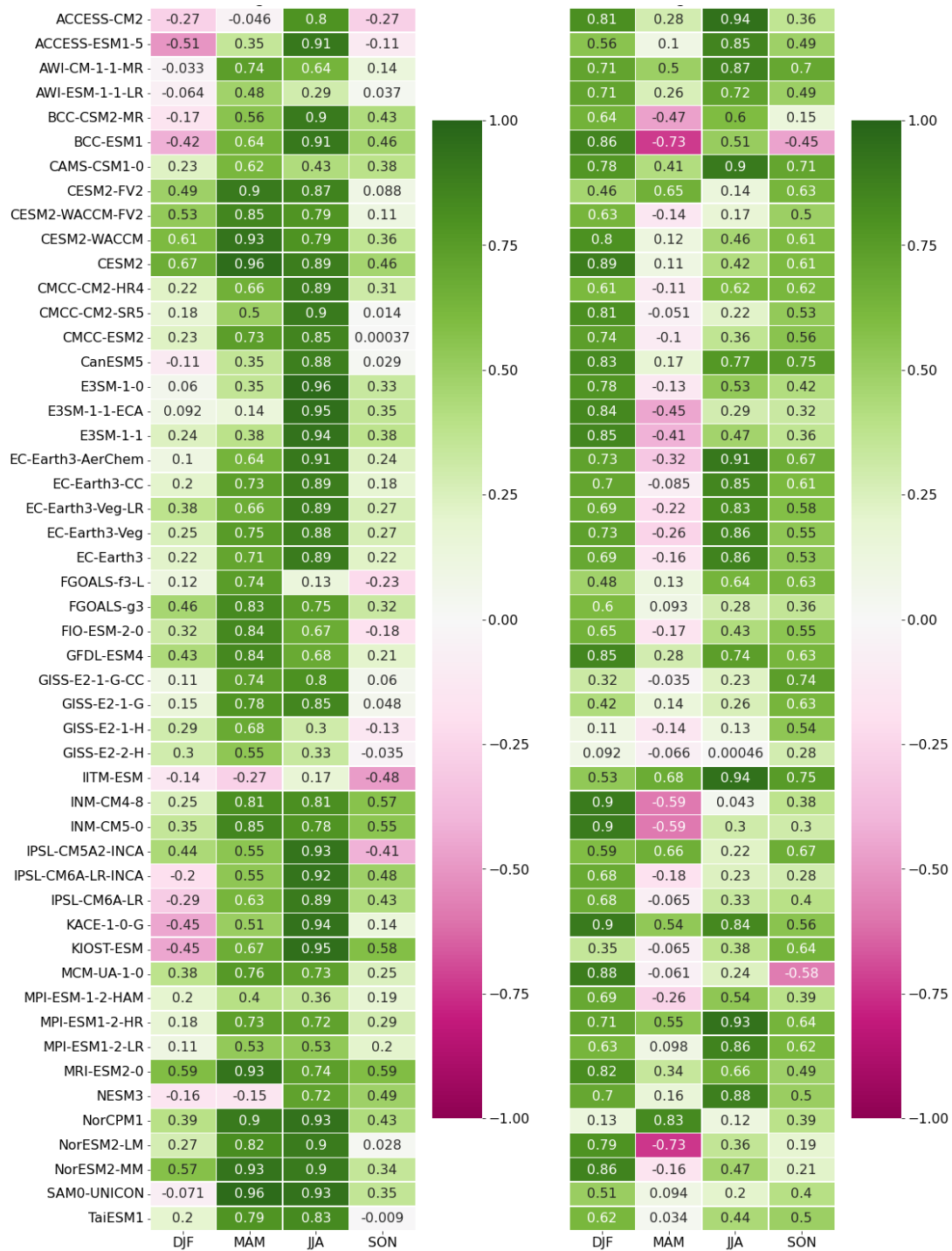


Figura 4. Correlação espacial (adimensional) para as regiões AMZ (lado esquerdo) e SDE (lado direito).

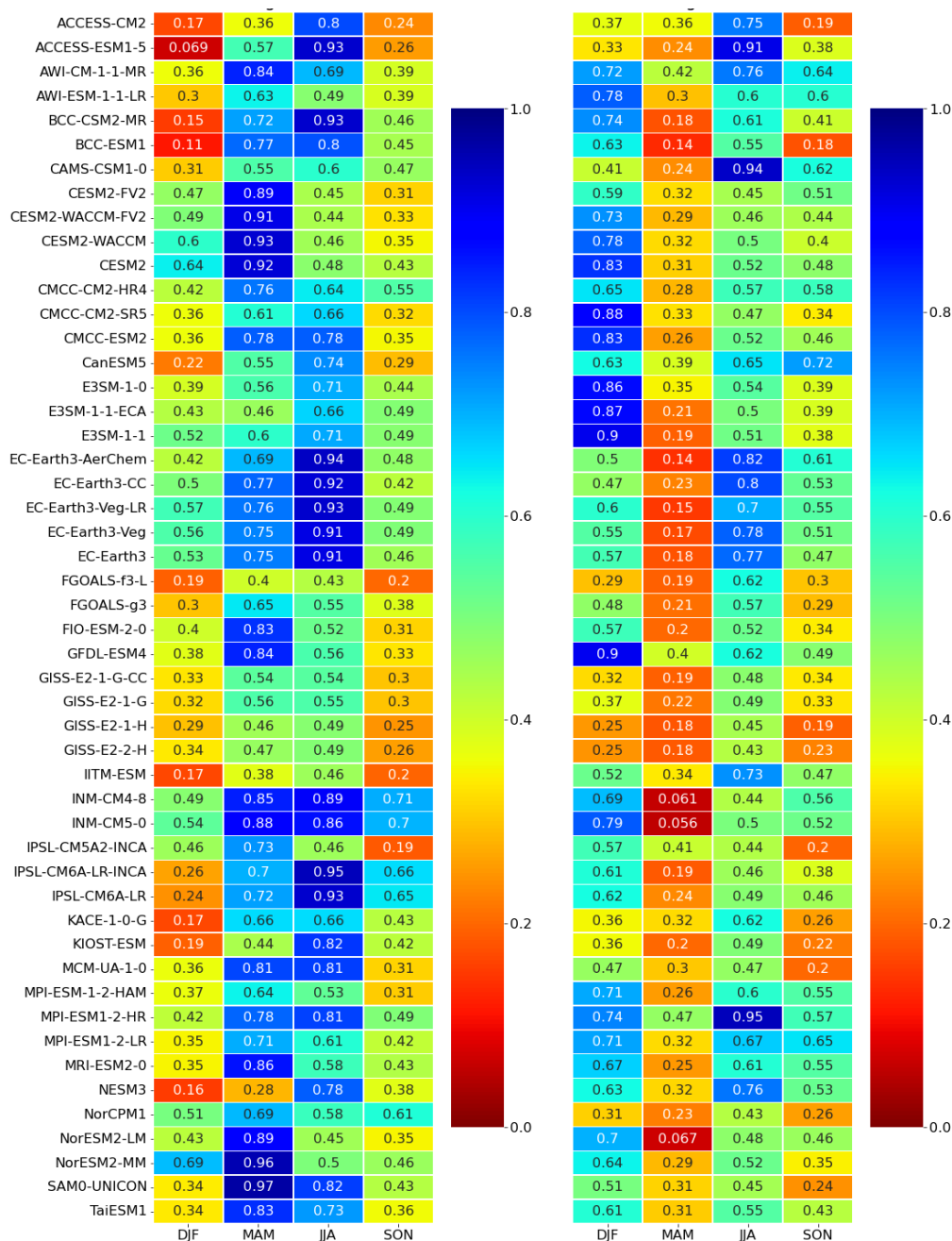


Figura 5. Índice de Willmott (adimensional) para as regiões AMZ (lado esquerdo) e SDE (lado direito)

Uma vez que diferentes medidas estatísticas foram calculadas para cada um dos 50 modelos, é necessário sintetizar as informações para realmente identificar os modelos com melhor performance. Para isso, foi avaliado o índice combinado: se numa dada estação do ano o modelo apresenta viés relativo absoluto menor do que 30%, correlação superior a 0,3 e índice de Willmott superior a 0,5 (Figura 6), é considerado com boa performance em reproduzir a climatologia sazonal.

Na AMZ, em DJF seis modelos apresentaram bons resultados, já MAM foi a estação que mais modelos mostraram bom desempenho, com mais de 60% deles

representando bem a climatologia da precipitação. Em JJA os modelos EC-Earth3 e suas variações tiveram bons resultados, além dos modelos ACCESS-CM2, ACCESS-ESM1-5, BCC-CSM2-MR, BCC-ESM1, CAMS-CSM1-0, CMCC-ESM2, INM-CM4-8, INM-CM5-0, IPSL-CM6A-LR-INCA, IPSL-CM6A-LR, KIOST-ESM, MCM-UA-1-0, MPI-ESM1-2-HR e NESM3. Em SON, seis modelos também mostraram boas performances.

O modelo INM-CM5-0 se destacou por simular todas as estações do ano com bom desempenho, sendo assim o melhor modelo para a região sul da AMZ. Além disso, os modelos EC-

Earth3-Veg-LR, INM-CM5-0, IPSL-CM6A-LR-INCA e IPSL-CM6A-LR simularam bem três das quatro estações do subdomínio da AMZ, também sendo considerados adequados para a região.

A região SDE mostra um contraste da performance dos modelos em simular as estações do ano, enquanto 70% deles mostrou bom desempenho em simular DJF, nenhum deles apresentou boa performance em MAM e apenas seis modelos obtiveram bons resultados em JJA.

Em SON os resultados foram um pouco melhores, com 34% dos modelos simulando a precipitação satisfatoriamente.

Os modelos MPI-ESM1-2-HR e NESM3 se destacaram nas três estações do ano da região SDE. A resposta só não foi positiva em MAM, estação em que nenhum modelo conseguiu bom desempenho. Portanto, eles podem ser considerados os melhores modelos para a região sudeste.

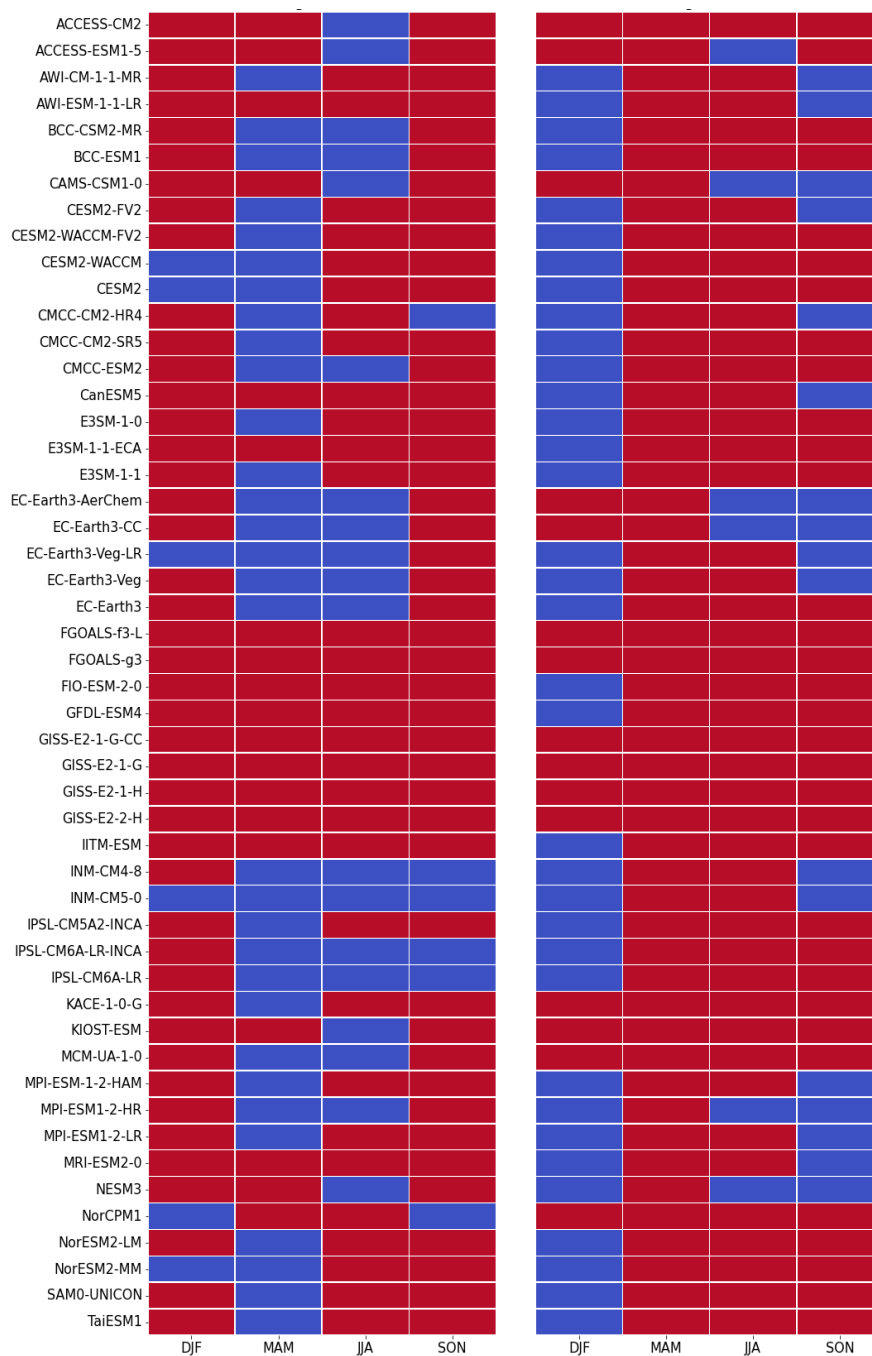


Figura 6. Índice combinado (vide metodologia para maiores detalhes) para as regiões AMZ (lado esquerdo) e SDE (lado direito). A cor azul indica os melhores modelos de acordo com o índice combinado

Conclusões

Este trabalho analisou a performance de 50 modelos do CMIP6 em simular a precipitação nas regiões sul da Amazônia e sudeste do Brasil, no período de 1995 a 2014. Considerando a análise do padrão espacial do viés no verão, sobre toda a América do Sul, nota-se que o modelo SAM0-UNICON apresenta melhor performance com um padrão espacial do viés relativo da precipitação diária mais uniforme

Para os subdomínios, a análise sazonal com base no índice que integra três medidas estatísticas (viés, correlação espacial e índice de concordância de Willmott) indicou para a AMZ a melhor performance do modelo INM-CM5-0 que foi o único que se adequou ao índice combinado em todas as estações do ano. Na SDE, os modelos MPI-ESM1-2-HR e NESM3, apresentaram a melhor performance, porém se adequando ao índice combinado em três estações do ano, nenhum modelo conseguiu performar de acordo com o índice combinado o ano todo.

Já numa análise mais ampla, considerando ambos os subdomínios, pode-se indicar a utilização dos modelos EC-Earth3-Veg-LR, INM-CM4-8, INM-CM5-0 e MPI-ESM1-2-HR para representar concomitantemente às duas regiões, pois simularam bem pelo menos três estações em uma região e duas em outra.

O estudo de Dias e Reboita (2021), encontraram 7 modelos com melhor performance para simular o clima da AS, porém somente os modelos E3SM-1-0 e KACE-1-0G tiveram os mesmos resultados para este estudo, sendo os modelos que mais se aproximaram do observado.

De modo geral, as estatísticas calculadas apontam que os modelos possuem desempenho mais satisfatório, ou seja, mais aproximado dos dados de referência na simulação da precipitação na AMZ durante MAM e JJA; os resultados não foram tão eficientes para simular DJF, quando a maioria dos modelos subestimam a precipitação.

Para as simulações na SDE, os modelos apresentaram melhores desempenhos nas simulações para a estação chuvosa (DJF), enquanto para MAM e JJA foi encontrada maior dificuldade em simular a precipitação em sua maioria.

Esse estudo serve como indicativo para que os tomadores de decisão possam ter maior confiabilidade dos modelos do CMIP6 que melhor representam as particularidades dos subdomínios analisados. Em resumo, para estudos sobre a precipitação nas regiões utilizadas neste estudo, recomenda-se os modelos SAM0-UNICON, INM-CM5-0, E3SM-1-0 e KACE-1-0G. Para trabalhos futuros, sugere-se a aplicação de outras formas de combinação estatística para a identificação dos melhores modelos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CMIP e aos demais centros que disponibilizaram os dados para o estudo e à FAPEMIG, CNPq, CAPES e Energisa (P&D Aneel) pelo auxílio financeiro.

Referências

- Adler, R.F., Gu, G., Huffman, G., 2012. Estimating Climatological Bias Errors for the Global Precipitation Climatology Project (GPCP). *Journal of Applied Meteorology and Climatology* [online] 51, 84-99. doi: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-052.1>
- Aguiar, D.G., 2017. Análise da variação sazonal da precipitação e temperatura em Manaus (AM) r. Manaus: [s.n.]. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. Disponível: <https://bdtd.inpa.gov.br/handle/tede/2374>. Acesso: 10 jan. 2022.
- Ambrizzi, T., Reboita, M.S., Da Rocha, R. 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* [online] 1436, 98-120. doi: <http://dx.doi.org/10.1111/nyas.13932>.
- Ashfaq, M., Cavazos, T. Reboita, M.S., Torres-Alves, J.A., Im, E., Olusegun, C.F., Alves, L., Key, K., Adeniyi, M.O, Tall, M., Sylla, M.B., Mehemood, S., Zafar, Q., Das, S., Diallo, I., Coppola, E., Giorgi, F., 2021. Robust late twenty-first century shift in the regional monsoons in RegCM-CORDEX simulations. *Climate Dynamics* [online] 57, 1463–1488. doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05306-2>.
- Bader, D.C., Leung, R., Taylor, M., Mccoy, R.B., 2019a. E3SM-Project E3SM1.0 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190913. Earth System Grid Federation

- [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4497>.
- Bader, D.C., Leung, R., Taylor, M., Mccoy, R.B., 2019b. E3SM-Project E3SM1.1 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20191211. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.11485>.
- Bader, D.C., Leung, R., Taylor, M., Mccoy, R.B., 2020. E3SM-Project E3SM1.1ECA model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20200623. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.11486>.
- Bartolomei, F., Reboita, M.S., 2022. A causa das chuvas do final de janeiro de 2022. Conexão Itajubá. Disponível: <http://www.exelisvis.com/portals0/pdfs/envi/ClassificationTutorial.pdf>. Acesso: 13 set. 2013.
- Bentsen, M., Oliviè, D.J.L., Seland, Ø., Toniazzi, T., Gjermundsen, A., Graff, L.S., Debernard, J.B., Gupta, A.K., He, Y., Kirkevåg, A., Schwinger, J., Tjiputra, J., Aas, K.S., Bethke, I., Fan, Y., Griesfeller, J., Grini, A., Guo, C., Ilicak, M., Karset, I.H.H., Landgren, O.A., Liakka, J., Moseid, K.O., Nummelin, A., Spensberger, C., Tang, H., Zhang, Z., Heinze, C., Iversen, T., Schulz, M., 2019. NCC NorESM2-MM model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20191108. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.8040>.
- Bethke, I., Wang, Y., Counillon, F., Kimmritz, M., Fransner, F., Samuelson, A., Langehaug, H., R., Chiu, P.G., Bentsen, M., Guo, C., Tjiputra, J., Kirkevåg, A., Oliviè, D.J.L., Seland, Ø., Fan, Y., Lawrence, P., Eldevik, T., Keenlyside, N., 2019. NCC NorCPM1 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20200724. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.10894>.
- Bombardi, R.J., Carvalho, L.M.V., 2009. IPCC global coupled model simulations of the South America monsoon system. Climate Dynamics [online] 33. doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0488-1>.
- Boucher, O., Denvil, S., Levavasseur, G., Cozic, A., Caubel, A., Foujols, M., Meurdesoif, Y., Cadule, P., Devilliers, M., Ghattas, J., Lebas, N., Lurton, T., Mellul, L., Musat, I., Mignot, J., Cheruy, F., 2018. IPSL IPSL-CM6A-LR model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20180803. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5195>.
- Byun, Y., Lim, Y., Sung, H.M., Kim, J., Sun, M., Kim, B., 2019. NIMS-KMA KACE1.0-G model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190910. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.8378>.
- Cao, J., Wang, B., 2019. NUIST NESMv3 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190630. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.8769>.
- Cohen, J., 1998. Statistical power analysis for the behavioral sciences, 2 ed. Lawrence Erlbaum Associates. Hillsdale, NJ. doi: <https://doi.org/10.4324/9780203771587>.
- Cos, J., Doblas-Reyes, F.J., Jury, M., 2021. Mediterranean climate change projections: an update from CMIP5 and CMIP6. EGU General Assembly [online] 19–30. Disponível: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021EGUGA..2312803C/abstract>. Acesso: 12 jan. 2021.
- Da Franca, R.R., Mendonça, F.A., 2016. A pluviosidade na Amazônia meridional: variabilidade e teleconexões extra-regionais. Confins 29 [online]. doi: <https://doi.org/10.4000/confins.11580>.
- Danabasoglu, G., 2019a. NCAR CESM2 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190401. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.7627>.
- Danabasoglu, G., 2019b. NCAR CESM2-WACCM model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190415. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.10071>.
- Danabasoglu, G., 2019c. NCAR CESM2-FV2 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20191120. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.11297>.
- Danabasoglu, G., 2019d. NCAR CESM2-WACCM-FV2 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20191120. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.11298>.
- Danek, C., Shi, X., Stepanek, C., Yang, H., Barbi, D., Hegewald, J., Lohmann, G., 2020. AWI AWI-ESM1.1LR model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20200212. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.9328>.
- Dias, C.G., Reboita, M.S., 2021. Assessment of CMIP6 Simulations over Tropical South America. Revista Brasileira de Geografia Física [online] 14, 3, 1282-1295. Disponível:

- <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1282-1295>. Acesso: 15 dez. 2021.
- Dix, M., Bi, D., Dobrohotoff, P., Fiedler, R., Harman, I., Law, R., Mackallah, C., Marsland, S., O'farrell, S., Rashid, J., Srbinovsky, J., Sullivan, A., Trenham, C., Vohralik, P., Watterson, I., Williams, G., Woodhouse, M., Bodman, R., Dias, F.N., Domingues, C., Hannah, N., Heerdegen, A., Savita, A., Wales, S., Allen, C., Druken, K., Evans, B., Richards, C., Ridzwan, S.M., Roberts, D., Smillie, J., Snow, K., Ward, M., Yang, R., 2019. CSIRO-ARCCSS ACCESS-CM2 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20191108. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4271>.
- EC-EARTH CONSORTIUM (EC-Earth), 2019a. EC-Earth-Consortium EC-Earth3-Veg model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20200225. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4706>.
- EC-EARTH CONSORTIUM (EC-Earth), 2019b. EC-Earth-Consortium EC-Earth3 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20200310. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4700>.
- EC-EARTH CONSORTIUM (EC-Earth), 2020a. EC-Earth-Consortium EC-Earth3-Veg-LR model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20200217. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4707>.
- EC-EARTH CONSORTIUM (EC-Earth), 2020b. EC-Earth-Consortium EC-Earth3-AerChem model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20200624. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4701>.
- Escobar, G.C.J., Matoso, V., 2018. Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS): Definição prática segundo uma visão operacional. In: XX Congresso Brasileiro de Meteorologia, Maceió. Anais do XX Congresso Brasileiro de Meteorologia. Disponível: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3SGMU> DP. Acesso: 26 jan 2022.
- Faye, A., Akinsanola, A.A., 2021. Evaluation of extreme precipitation indices over West Africa in CMIP6 models. Climate Dynamics [online]. doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05942-2>.
- Ferreira, G.W.S., Reboita, M.S., 2022. A New Look into the South America Precipitation Regimes: Observation and Forecast. Atmosphere [online] 13, 6, 873. doi: <https://doi.org/10.3390/atmos13060873>.
- Giorgi, F., Mearns, L., 1999. O. Introduction to special section: regional climate modeling revisited. Journal of Geophysical Research [online] 104-D6, 6335-6352. doi: <https://doi.org/10.1029/98JD02072>.
- Hinkle, D.E., Wiersma W., Jurs, S.G., 2003. Applied Statistics for the Behavioral Sciences, 5 ed. Houghton Mifflin, Boston
- Huffman, G.J., Adler, R.F., Arkin, P., Chang, A., Ferraro, R., Gruber, A., Janowiak, J., Mcnab, A., Rudolf, B., Schneider, U., 2019. The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Combined Precipitation Dataset. Bulletin of the American Meteorological Society [online] 78, 5-20. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0005:TGPCPG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0005:TGPCPG>2.0.CO;2).
- Huffman, G.J., Adler, R.F., Morrissey, M.M., Bolvin, D.T., Curtis, S., Joyce, R., Mcgavock, B., Susskind, S., 2001. Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations. Journal of hydrometeorology [online] 2, 1, 36-50. doi: [https://doi.org/10.1175/1525541\(2001\)002<0036:GPAODD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525541(2001)002<0036:GPAODD>2.0.CO;2).
- Hummell, B.M.L., Cutter, S.L., Emrich, C.T., 2016. Social vulnerability to natural hazards in Brazil. International Journal of Disaster Risk Science [online] 7, 2, 111-122. doi: <https://doi.org/10.1007/s13753-016-0090-9>.
- Jungclaus, J., Bittner, M., Wieners, K., Wachsmann, F., Schupfner, M., Legutke, S., Giorgetta, M., Reick, C., Gayler, V., Haak, H., De Vrese, P., Raddatz, T., Esch, M., Mauritsen, T., Von Storch, J., Behrens, J., Brovkin, V., Claussen, M., Crueger, T., Fast, I., Fiedler, S., Hagemann, S., Hohenegger, C., Jahns, T., Kloster, S., Kinne, S., Lasslop, G., Kornblueh, L., Marotzke, J., Matei, D., Meraner, K., Mikolajewicz, U., Modali, K., Müller, W., Nabel, J., Notz, D., Peters-Von Gehlen, K., Pincus, R., Pohlmann, H., Pongratz, J., Rast, S., Schmidt, H., Schnur, R., Schulzweida, U., Six, K., Stevens, B., Voigt, A., Roeckner, E., 2019. MPI-M MPI-ESM1.2-HR model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190710. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6594>.
- Kim, Y., Noh, Y., Kim, D., Lee, M., Lee, H.J., Kim, S.Y., Kim, D., 2019. Kiost Kiost-Esm model output prepared for CMIP6 CMIP. Version 20191203[1]. Earth System Grid

- Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1922>.
- Kousky, V.E., 1988. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. *Revista Brasileira de Meteorologia* 3, 217-231.
- Krasting, J.P., John, J.G., Blanton, C., Mchugh, C., Nikonov, S., Radhakrishnan, A., Rand, K., Zadeh, N.T., Balaji, V., Durachta, J., Dupuis, C., Menzel, R., Robinson, T., Underwood, S., Vahlenkamp, H., Dunne, K.A., Gauthier, P.G., Ginoux, P., Griffies, S.M., Hallberg, R., Harrison, M., Hurlin, W., Malyshev, S., Naik, V., Paulot, F., Paynter, D.J., Ploshay, J., Reichl, B.G., Schwarzkopf, D.M., Seman, C.J., Silvers, L., Wyman, B., Zeng, Y., Adcroft, A., Dunne, J.P., Dussin, R., Guo, H., He, J., Held, I.M., Horowitz, L.W., Lin, P., Milly, P.C.D., Shevliakova, E., Stock, C., Winton, M., Wittenberg, A.T., Xie, Y., Zhao, M., 2019. NOAA-GFDL GFDL-ESM4 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190726. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.8597>.
- Lee, W., Liang, H., 2020. AS-RCEC TaiESM1.0 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20200623. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.9755>.
- Li, L., 2019. CAS FGOALS-g3 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190818. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3356>.
- Llopart, M., Coppola, E., Giorgi, F., Da Rocha, R.P., Cuadra, S.V., 2014. Climate change impact on precipitation for the Amazon and La Plata basins. *Climatic Change* [online] 125, 111–125. doi: <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1140-1>
- 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 [online] 54, 99–116. doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04990-z>.
- Lovato, T., Peano, D., 2020. CMCC CMCC-CM2-SR5 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20200616. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3825>.
- Marengo, J.A., Alves, L.M., 2005. Tendências hidrológicas da bacia do rio Paraíba do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia* 20, 2, 215-226.
- Monteiro, A.F.M., Yamamoto, A.L.C., Silva, P.N., Reboita, M.S., 2021. Conhecer a complexidade do sistema climático para entender as mudanças climáticas. *Terræ Didática* [online] 17, 1-12. doi: [10.20396/td.v17i0.8663763](https://doi.org/10.20396/td.v17i0.8663763).
- NASA. National Aeronautics and Space Administration, 2018. Goddard Institute for Space Studies. NASA-GISS GISS-E2.1G model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20180827. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.7127>.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration, 2019. Goddard Institute for Space Studies. NASA-GISS GISS-E2.1H model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190403. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.7128>.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration, 2020. Goddard Institute for Space Studies (NASA/GISS). NASA-GISS GISS-E2-1-G-CC model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20200826[1]. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.11762>.
- Neubauer, D., Ferrachat, S., Siegenthaler-Le D. C., Stoll, J., Folini, D.S., Tegen, I., Wieners, K., Mauritsen, T., Stemmler, I., Barthel, S., Bey, I., Daskalakis, N., Heinold, B., Kokkola, H., Partridge, D., Rast, S., Schmidt, H., Schutgens, N., Stanelle, T., Stier, P., Watson-Parris, D., Lohmann, U., 2019. HAMMOZ-Consortium MPI-ESM1.2-HAM model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190627. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5016>.
- Nobre, C.A., Marengo, J.A., Artaxo, P., 2009a. Understanding the Climate of Amazonia: Progress From LBA. In: KELLER, M.; BUSTAMANTE, M.; GASH, J.; SILVA DIAS, P. (Orgs.). Amazonia and Global Change. Geophysical Monograph Ser, vol. 186. Washington, D.C.: American Geophysical Union Books. pp. 145-147. Disponível: https://www.academia.edu/37829954/Understanding_the_Climate_of_Amazonia_Progress_from_LBA?auto=citations&from=cover_page. Acesso: 10 jan. 2021.
- Nobre, C.A., Obregón, G.O., Marengo, J.A., Fu, R., Poveda, G., 2009b. Characteristics of Amazonian Climate: Main Features. In: KELLER, M.; BUSTAMANTE, M.; GASH, J.; SILVA DIAS, P. (Orgs.). Amazonia and Global Change. Geophysical Monograph Ser, vol. 186. Washington, D.C.: American Geophysical

- Union Books, pp. 149-162. Disponível: https://www.academia.edu/11616073/Characteristics_of_Amazonian_climate_Main_features?auto=citations&from=cover_page. Acesso: 10 jan. 2021.
- Park, S., Shin, J., 2019. SNU SAM0-UNICON model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190323. Earth System Grid Federation [online]. doi:<https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.7789>.
- Peano, D., Lovato, T., Materia, S., 2020. CMCC CMCC-ESM2 modelo de saída preparado para CMIP6 LS3MIP land-hist. Versão 20200715[1]. Earth System Grid Federation [online]. doi:<https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.13204>.
- Raju, K.S., Kumar, D.N., 2020. Review of approaches for selection and ensembling of GCMs. Journal of Water and Climate Change [online] 11, 3, 577-599. doi:<https://doi.org/10.2166/wcc.2020.128>.
- Raghavan, K., Panickal, S., 2019. CCCR-IITM IITM-ESM model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20191226. Earth System Grid Federation [online]. doi:<https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3708>.
- 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 [online] 25, 185-204. doi: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>.
- Reboita, M.S., Ambrizzi, T., 2022. Climate system in a nutshell: An overview for understanding Climate change. International Journal Of Development Research [online] 12, 53365-53378. doi:<https://doi.org/10.37118/ijdr.23731.01.2022>.
- Reboita, M.S., Teodoro, T.A., Ferreira, G.W.S., Souza, C.A., 2022. Ciclo de Vida do Sistema de Monção da América do Sul: Clima Presente e Futuro. Revista Brasileira De Geografia Física [online] 15, 343-358. doi:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.1.p343-358>.
- Reboita, M.S., Kuki, C.A.C., Marrafon, V.H., De Souza, C.A., Ferreira, G.W.S., Teodoro, T.A., Lima, J.W.M., 2021. South America climate change revealed through climate indices projected by GCMs and Eta-RCM ensembles. Climate Dynamics [online] 58, 459-485. doi:<https://doi.org/10.1007/s00382-021-05918-2>.
- Rong, X., 2019. CAMS CAMS_CSM1.0 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190708. Earth System Grid Federation [online]. doi:<https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.9754>.
- Scoccimarro, E., Bellucci, A., Peano, D. CMCC CMCC-CM2-HR4 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20200904. Earth System Grid Federation [online]. doi:<https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3823>.
- Seland, Ø., Bentsen, M., Olivieri, D.J.L., Toniazzo, T., Gjermundsen, A., Graff, L.S., Debernard, J.B., Gupta, A.K., He, Y., Kirkevåg, A., Schwinger, J., Tjiputra, J., Aas, K.S., Bethke, I., Fan, Y., Griesfeller, J., Grini, A., Guo, C., Ilıcak, M., Karset, I.H.H., Landgren, O.A., Liakka, J., Moseid, K.O., Nummelin, A., Spensberger, C., Tang, H., Zhang, Z., Heinze, C., Iversen, T., Schulz, M., 2019. NCC NorESM2-LM model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190815. Earth System Grid Federation [online]. doi:<https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.8036>.
- Semmler, T., Danilov, S., Rackow, T., Sidorenko, D., Barbi, D., Hegewald, J., Sein, D., Wang, Q., Jung, T., 2018. AWI AWI-CM1.1MR model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20200511. Earth System Grid Federation [online]. doi:<https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.2686>.
- Silva, J.P.R., Reboita, M.S.; Escobar, G.C.J., 2019. Caracterização da Zona de Convergência do Atlântico Sul em campos atmosféricos recentes. Revista Brasileira de Climatologia [online] 25. doi:<http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v25i0.64101>
- Song, Z., Qiao, F., Bao, Y., Shu, Q., Song, Y., Yang, X., 2019. FIO-QLNM FIO-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20191209. Earth System Grid Federation [online]. doi:<https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.9199>.
- Souza, E.B., Marcio, N.G.L., Da Rocha, E.J.P., Souza, J.R.S., Cunha, A.C., Silva, R.R., Ferreira, D.B.S., Santos, D.M., Carmo, A.M.C., Sousa, J.R.A., Guimarães, P.L., Mota, M.A.S., Makino, M., Senna, R. C., Sousa, A.M.L., Mota, G.V., Kuhn, P.A.F., Souza, P.F.S., Vitorino, M.I., 2009. Precipitação sazonal sobre a Amazônia oriental no período chuvoso: Observações e simulações regionais com o RegCM3. Revista Brasileira de Meteorologia [online] 24, 2, 111-124. doi:<https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000200001>.
- Stouffer, R., 2019. UA MCM-UA-1-0 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20191017. Earth System Grid Federation [online]. doi:<https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.9754>.

- Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.8888>.
- Swart, N.C., Cole, J.N.S., Kharin, V.V., Lazare, M., Scinocca, J.F.; Gillett, N.P., Anstey, J., Arora, V., Christian, J.R., Jiao, Y., Lee, W.G., Majaess, F., Saenko, O.A., Seiler, C., Seinen, C., Shao, A., Solheim, L., Von Salzen, K., Yang, D., Winter, B., Sigmond, M., 2019. CCCma CanESM5 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190429. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3610>.
- Teodoro, T.A., Reboita, M.S., Llopart, M., Da Rocha, R.P., 2021. ASHFAQ, Moetasim. Climate Change Impacts on the South American Monsoon System and Its Surface–Atmosphere Processes Through RegCM4 CORDEX-CORE Projections. Earth System Environ. [online] 5, 825–847. doi: <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00265-y>.
- Tomaziello, A.C.N., 2010. Influências da temperatura da superfície do mar e da umidade do solo na precipitação associada à Zona de Convergência do Atlântico Sul. Tese (Doutorado). São Paulo, Universidade de São Paulo.
- Volodin, E., Mortikov, E., Gritsun, A., Lykossov, V., Galin, V., Diansky, N., Gusev, A., Kostykin, S., Iakovlev, N., Shestakova, A., Emelina, S., 2019a. INM INM-CM4-8 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190530. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5069>.
- Volodin, E., Mortikov, E., Gritsun, A., Lykossov, V., Galin, V., Diansky, N., Gusev, A., Kostykin, S., Iakovlev, N., Shestakova, A., Emelina, S., 2019b. INM INM-CM5-0 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190610. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.5070>.
- Wang, D., Liu, J., Shao, W., Mei, C., Su, X., Wang, H., 2021. Comparison of CMIP5 and CMIP6 Multi-Model Ensemble for Precipitation Downscaling Results and Observational Data: The Case of Hanjiang River Basin. Atmosphere [online] 12, 867. doi: <https://doi.org/10.3390/atmos12070867>.
- Wieder, W.R., Cleveland, C.C., Lawrance, D.M., Bonan, G.B., 2015. Effects of model structural uncertainty on carbon cycle projections: biological nitrogen fixation as a case study. Environmental Research Letters [online] 10, 4. doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/4/044016>.
- Wieners, K., Giorgetta, M., Jungclaus, J., Reick, C., Esch, M., Bittner, M., Legutke, S., Schupfner, M., Wachsmann, F., Gayler, V., Haak, H., De Vrese, P., Raddatz, T., Mauritsen, T., Von Storch, J., Behrens, J., Brovkin, V., Claussen, M., Crueger, T., Fast, I., Fiedler, S., Hagemann, S., Hohenegger, C., Jahns, T., Kloster, S., Kinne, S., Lasslop, G., Kornblueh, L., Marotzke, J., Matei, D., Meraner, K., Mikolajewicz, U., Modali, K., Müller, W., Nabel, J., Notz, D., Peters-Von Gehlen, K., Pincus, R., Pohlmann, H., Pongratz, J., Rast, S., Schmidt, H., Schnur, R., Schulzweida, U., Six, K., Stevens, B., Voigt, A., Roeckner, E., 2019. MPI-M MPI-ESM1.2-LR model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190710. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6595>.
- Wu, T., Chu, M., Dong, M., Fang, Y., Jie, W., Li, J., Li, W., Liu, Q., Shi, X., Xin, X., Yan, J., Zhang, F., Zhang, J., Zhang, L., Zhang, Y., 2018. BCC BCC-CSM2MR model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20181126. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.2948>.
- Xie, P., Arkin, P.A., Janowiak, J.E., 2007. CMAP: The CPC Merged Analysis of Precipitation. In: Levizzani V., Bauer P., Turk F.J. (eds) Measuring Precipitation From Space. Advances In Global Change Research. Springer [online] 28, 319-328. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5835-6_25.
- Yu, Y., 2019. CAS FGOALS-f3-L model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190927. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.3355>.
- Yukimoto, S., Koshiro, T., Kawai, H., Oshima, N., Yoshida, K., Urakawa, S., Tsujino, H., Deushi, M., Tanaka, T., Hosaka, M., Yoshimura, H., Shindo, E., Mizuta, R., Ishii, M., Obata, A., Adachi, Y., 2019. MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20190222. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6842>.
- Xie, P., Arkin, P.A., Janowiak, J.E., 2007. CMAP: The CPC merged analysis of precipitation. In: Measuring precipitation from space. Springer [online] 319-328. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5835-6_25.
- Zhang, J., Wu, T., Shi, T., Zhang, F., Li, J., Chu, M., Liu, Q., Yan, J., Ma, Q., Wei, M., 2018. BCC BCC- ESM1 model output prepared for

- CMIP6 CMIP historical. Version 20181214. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.2949>.
- Ziehn, T.; Chamberlain, M., Lenton, A., Law, R., Bodman, R., Dix, M., Wang, Y., Dobrohotoff, P., Srbinovsky, J., Stevens, L., Vohralik, P., Mackallah, C., Sullivan, A., O'farrell, S., Druken, K., 2019. CSIRO ACCESS-ESM1.5 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. Version 20191115. Earth System Grid Federation [online]. doi: <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.4272>.