



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

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



Ciclo de vida do sistema de monção da América do Sul: clima presente e futuro

Michelle Simões Reboita¹, Thales Alves Teodoro², Glauber Willian de Souza Ferreira³, Christie Andre de Souza⁴

¹ Dr^a. Pesquisadora, Professora do Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS 1303, bairro Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais. (35) 3629-1703. (35) 9102-5193. reboita@unifei.edu.br ² Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS 1303, bairro Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais. thales.teo@hotmail.com ³ Mestrando em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS 1303, bairro Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais. glauber_ferreira@unifei.edu.br ⁴ Graduando em Ciências Atmosféricas, Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS 1303, bairro Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais. christie@unifei.edu.br

Artigo recebido em 11/09/2021 e aceito em 22/11/2021

RESUMO

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), responsável por compilar o conhecimento produzido sobre as mudanças do clima da Terra, conta com o apoio de grupos internacionais de pesquisa que executam projeções climáticas com modelos climáticos globais (MCGs) e regionais (MCRs). Com relação aos MCRs, o *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* (CORDEX) é o responsável pela criação de protocolos para padronização das simulações, execução dessas e disponibilização em banco de dados de acesso público. Para gerar informações para o sexto relatório de avaliação (AR6) do IPCC, que foi publicado recentemente (09 de agosto de 2021), o *Regional Climate Model* (RegCM4) do Centro de Física Teórica (ICTP) da Itália foi um dos modelos executados pelo CORDEX. Essas projeções são a base para o desenvolvimento do presente estudo cujo objetivo é identificar o início, fim e duração da estação chuvosa na América do Sul no clima presente (1995-2014) e futuro (2080-2099) considerando o cenário RCP8.5. Para tanto, são considerados dois *ensembles*: um com as projeções dos modelos globais que dirigiram o RegCM4 e outro com as projeções desse modelo regional. Entre os resultados estão a projeção de condições mais secas na região da Zona de Convergência do Atlântico Sul durante a primavera e sobre a Amazônia no verão. No sul da Amazônia, o ciclo de vida da monção no *ensemble* dos MCGs (RegCM4) é projetado iniciar entre as pântadas 59-60 (58-61) e decair nas pântadas 22-26 (23-27). A mesma análise indica para a região Sudeste que a monção pode iniciar as pântadas 56-60 (57-65) e decair entre as pântadas 15-20 (15-20) pelo *ensemble* dos MCGs (RegCM4). Com esse estudo foi possível mostrar que tanto os MCGs quanto RegCM4 projetam alterações importantes no ciclo de vida da monção da América do Sul.

Palavras-chaves: IPCC, mudanças climáticas, cenários, América do Sul, precipitação, estação chuvosa

Life cycle of the South American monsoon system: present and future climate

ABSTRACT

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), responsible for compiling the knowledge produced about observed and projected changes in the Earth's climate, has the support of international research groups that carry out climate projections with global climate models (GCMs) and regional climate models (RCMs). With regard to RCMs, the Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) is responsible for creating protocols for standardizing simulations, executing them and making them available in a publicly accessible database. To generate information for the IPCC's sixth assessment report (AR6), which was published recently (August 9, 2021), the Regional Climate Model (RegCM4) of the International Centre for Theoretical Physics (ICTP) of Italy was one of the models executed by CORDEX. These projections are the basis for the development of this study whose objective is to identify the onset, end and duration of the rainy season in South America in the present (1995-2014) and future (2080-2099) climate considering the RCP8.5 scenario. For that, two ensembles are considered: one with the projections of the global models that drove RegCM4 and the other with the projections of this regional model. Among the results are the projection of drier conditions in the South Atlantic Convergence Zone region during spring and over the Amazon in summer. In southern Amazon, the monsoon lifecycle in the GCMs (RegCM4) ensemble is projected to begin between pentads 59-60 (58-61) and decay between pentads 22-26 (23-27). The same analysis indicates for the Southeast Brazil a monsoon onset between pentads 56-60 (57-65) and a demise between pentads 15-20 (15-20) by the ensemble of GCMs (RegCM4). These results indicate a shorter lifecycle of the wet phase of the monsoon in the future climate compared to the historical one. This study showed that both GCMs and RegCM4 project important changes in the lifecycle of the South American monsoon.

Keywords: IPCC, climate change, scenarios, South America, precipitation, rainy season

Introdução

As primeiras definições para uma região de monção foram baseadas na reversão sazonal da direção do vento. Ramage (1971) apresentou um conjunto de critérios para a identificação de regiões de monção no mundo, que incluía: a mudança na direção dos ventos em baixos níveis da atmosfera em pelo menos 120° entre os meses de janeiro e julho, a persistência dos ventos nessa direção em pelo menos 40% dos dias durante esses meses e a intensidade do vento superior a 3 m s⁻¹ em pelo menos um desses meses. A mudança na direção do vento aparece como o mecanismo responsável pelo transporte da umidade do oceano para o continente, implicando em maiores totais de precipitação sobre a massa terrestre durante os meses de verão. Por esta razão, o regime da monção pode ser comparado a um sistema de brisa marítima/terrestre de grande escala.

Ramage (1971) identificou a Índia, a África e o Leste Asiático como regiões de monção. No entanto, outras regiões tropicais, como a América do Sul (AS) e do Norte, com mais de 50% do total da precipitação anual ocorrendo no verão, não foram incluídas na classificação (Gan et al., 2004; Carvalho e Cavalcanti, 2016). Devido a esse fato, foram desenvolvidas definições para a existência de uma região de monção baseadas no volume da precipitação ocorrido na estação chuvosa em relação ao período seco (Wang e Ding, 2008; Wang et al., 2012; 2020).

No caso da AS, não há uma clara reversão sazonal dos ventos entre os meses de janeiro e julho (Zhou e Lau, 1998), porém o ciclo anual da precipitação em grande parte desse continente é uma resposta à atuação do Sistema de Monção da América do Sul (SMAS) (Rao e Hada, 1990; Cunningham e Cavalcanti, 2006; Reboita et al., 2010; Marengo et al., 2012; Llopart et al., 2014; Pascale et al., 2019; Geen et al., 2020; Grimm et al., 2020; Wang et al., 2020; Teodoro et al., 2021), com o estabelecimento de duas estações bem definidas: o período chuvoso de novembro a março e o período seco de maio a setembro. Esses dois períodos são caracterizados por diferentes sistemas de circulação em altos e baixos níveis da atmosfera.

A fase úmida do SMAS começa a surgir a partir da primavera quando ocorre uma intensificação da energia solar recebida no Hemisfério Sul (HS) e, como consequência, a convecção se torna mais forte; além disso, os ventos alísios se intensificam e transportam mais

umidade do Atlântico Tropical Norte para a Bacia Amazônica (Marengo et al., 2001; Durán-Quesada et al., 2012; Pascale et al., 2019). Devido ao aquecimento da superfície e à grande atividade convectiva, em altos níveis da atmosfera forma-se uma área de alta pressão sobre o continente, conhecida como Alta da Bolívia (AB; Zhou e Lau, 1998). Corrente abaixo da AB, desenvolve-se um cavado entre o nordeste do Brasil e o oceano Atlântico que é chamado de cavado nas cercanias do Nordeste do Brasil (Ferreira et al., 2019).

Em baixos níveis da atmosfera, há a formação de dois centros de baixa pressão que se posicionam a leste da cordilheira dos Andes (Baixa do Chaco - BCH e Baixa do Noroeste Argentino - BNOA), influenciando as condições de tempo principalmente no centro-norte da Argentina, sul da Bolívia e Paraguai (Escobar, 2019). Essas baixas são importantes para a configuração do jato de baixos níveis (JBN) a leste dos Andes, pois produzem um gradiente horizontal de pressão com a região amazônica (Seluchi e Saulo, 2012). Já o JBN é responsável por transportar umidade da Bacia Amazônica para a região sudeste da AS (que inclui norte da Argentina, Paraguai, Uruguai e sul do Brasil) e sudeste do Brasil.

O sistema mais importante para manutenção das chuvas sobre a AS durante a fase úmida da monção é a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A ZCAS corresponde a uma faixa de nuvens que se estende da Amazônia ao sudeste do Brasil e atinge o oceano Atlântico Sul, sendo a sua formação relacionada à combinação da convecção continental e do transporte de umidade pelo JBN e pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) para áreas do sudeste do Brasil (Kousky, 1988; Carvalho et al., 2004; Silva et al., 2019). Nos períodos sem ou com atividade fraca da ocorrência de ZCAS, em geral, o JBN está transportando umidade para o sudeste da AS, influenciando a precipitação na Bacia do Prata (LPB, Pascale et al., 2019; Llopart et al., 2020a). Porém, quando o JBN está direcionado para o sudeste do Brasil, contribui para ativar a ZCAS (Silva et al., 2019). Mais detalhes sobre os sistemas atmosféricos associados com o SMAS podem ser encontrados em Zhou e Lau (1998), Gan et al. (2004), Grimm (2004), Vera et al. (2006), Reboita et al. (2010), Marengo et al. (2012), Carvalho e Cavalcanti (2016), Silva et al. (2019), Correa et al. (2020), Geen et al. (2020) e Sena e Magnusdóttir (2020).

Uma vez que a qualidade da estação chuvosa é importante para várias atividades econômicas, diversos estudos têm investigado as possíveis mudanças no ciclo de vida da monção no globo em cenários de aquecimento global e usando diferentes metodologias (Seth et al., 2013; Lee e Wang, 2014; Hasson et al., 2016; Raj et al., 2018; Shawki et al., 2018; Ibrahima et al., 2019; Geen et al., 2020; Moon e Ha, 2020; Wang et al., 2020; Ali et al., 2021). Para a AS, existem os estudos de Bombardi e Carvalho (2008), Marengo et al. (2012), Llopart et al. (2014; 2020a,b), Reboita et al. (2014) e Sena e Magnusdottir (2020), por exemplo. Em geral, são apresentadas as projeções do volume de precipitação e a área de abrangência da monção em diferentes cenários do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) e os períodos de início, fim e duração da estação chuvosa (monção de verão ou fase úmida), o que é chamado de ciclo de vida da monção. Considerando os estudos com Modelos Climáticos Globais (MCGs), um exemplo é o de Jones e Carvalho (2013) que analisaram seis projeções de MCGs do CMIP5 com o cenário RCP8.5. Foi projetado no período de 2045-2050 um decréscimo de 14 dias no início do SMAS e um aumento de 17 dias no final desse sistema. Entretanto, há falta de concordância espacial entre as projeções no período de 2070-2100. Em termos de Modelos Climáticos Regionais (MCRs), Reboita et al. (2014) projetaram o ciclo de vida do SMAS por meio do RegCM3 aninhado em dois MCGs (HadCM3 e ECHAM5) considerando o cenário A1B do IPCC. Na região entre a Amazônia e o centro-oeste do país, no período de 2010-2040, foi obtido um atraso de uma pântada no começo da estação chuvosa, enquanto no período 2070-2100, os autores obtiveram uma redução de ~2 pântadas na duração da estação chuvosa. Alves (2016) verificou as datas de início e fim do SMAS em dois setores (norte e sul) da Amazônia projetadas a partir do *downscaling* dinâmico do modelo regional HadRM3P aninhado a um subconjunto de quatro simulações do modelo do *MetOffice Hadley Centre* (MOHC) - HadCM3 obtidos pelo método *Perturbed Physics Ensembles* (PPEs) no cenário de emissões A1B. Não há indicativo de mudança na data de fim do SMAS, porém o início da estação chuvosa é projetado atrasar no sul da Amazônia em cerca de 5 pântadas, o que implica em prolongamento da estação seca em relação ao clima presente. Já no setor norte, há uma tendência de atraso (pântada 69 no período de 2071-2100), mas que se encontra dentro de uma faixa compreendida entre a média e $\pm$ um desvio padrão, o que não

implica em mudança acentuada em relação ao presente.

Os trabalhos descritos mostram que há muitas incertezas na projeção do ciclo de vida do SMAS, sendo necessários mais estudos sobre esse tema. Nesse contexto, o objetivo do estudo é apresentar as projeções do ciclo de vida do SMAS (início, fim e duração) obtidas com dois *ensembles*: um composto por três simulações do RegCM4 e outro com os três modelos climáticos globais utilizados como condições iniciais e de fronteira no RegCM4. Os períodos estudados são 1995-2014 (considerado clima presente) e 2080-2099 (clima futuro) e o cenário utilizado é o *Representative Concentration Pathway 8.5* (RCP8.5).

Metodologia

Projeções Climáticas

São utilizadas três projeções climáticas do RegCM4 (Giorgi et al., 2012) dirigidas por três MCGs do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5; Meehl e Bony, 2011): MPI-ESM-MR, HadGEM2-ES e NorESM. O RegCM4 faz parte do projeto *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* (CORDEX) - *Coordinated Output for Regional Evaluations* (CORE; Gutowski et al., 2016), foi integrado com 25 km de resolução horizontal no domínio da AS que segue a especificação do CORDEX (Giorgi et al., 2009). Detalhes das projeções podem ser encontrados em Reboita et al. (2020).

Todas as análises para o ciclo de vida da monção são realizadas para dois períodos: clima presente (1995-2014) e clima futuro (2080-2099) sob o cenário RCP8.5 do IPCC. Esses períodos seguem a recomendação do IPCC para seu sexto relatório (Reboita et al., 2020). Para reduzir as incertezas associadas aos modelos, as análises se concentram em *ensembles*, de forma que há dois conjuntos de dados (*ensemble* das projeções dos MCGs e *ensemble* do RegCM4). Esses foram calculados após a interpolação bilinear de cada modelo para a grade regular de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Este procedimento segue He et al. (2017), Reboita et al. (2019) e Llopart et al. (2020a).

Ciclo de Vida do Sistema de Monção da América do Sul

O ciclo de vida do SMSA, que é definido mediante a data de início e fim da estação chuvosa, bem como sua duração, é determinado no clima presente e cenário futuro com o método de Liebmann e Marengo (2001) adaptado por Bombardi e Carvalho (2008). Esse método também já foi utilizado por Silva e Reboita (2013) e Reboita

et al. (2018). Para a identificação da data de início e fim do SMAS, só é necessária a informação da precipitação em pântadas e o método inicia com cálculo das anomalias acumuladas (S):

$$S_{p\acute{e}ntada} = \sum_{n=p\acute{e}ntada_1}^{p\acute{e}ntada} (R_n - \bar{R}) \quad (1)$$

onde:

R_n é a precipitação da pântada n (cada ano é composto por 73 pântadas e quando o ano é bissexto, o dia 29 de fevereiro é incluído na pântada número 12; uma tabela com as pântadas e datas correspondentes é apresentada em Kousky, 1988); $\bar{R}$ é a média climatológica de todas as pântadas em estudo.

A primeira pântada apresentada na somatória (pântada₁) foi escolhida como a primeira pântada do ano (total da precipitação no período de 1 a 5 de janeiro) que, por sua vez, está dentro da estação chuvosa da região em estudo. Depois de realizado o somatório das anomalias de precipitação ($R_n - \bar{R}$) a cada interação, é obtida a série temporal S que é suavizada com uma média móvel de 3 pontos aplicada 50 vezes. A etapa seguinte consiste no cálculo da primeira derivada de $S=dS/dt$ para a identificação do início e fim da estação chuvosa de cada ano em estudo. A **Figura 1**, adaptada de Silva e Reboita (2013), exemplifica a metodologia.

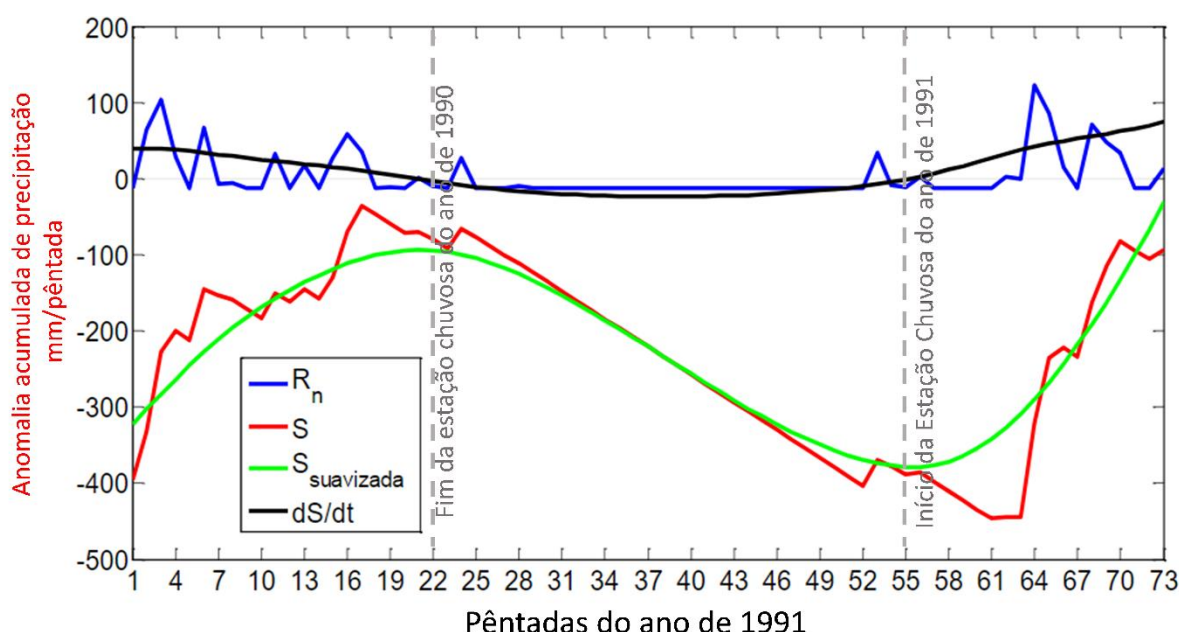


Figura 1. Exemplo do método para identificação do início e fim da estação chuvosa (adaptado de Silva e Reboita, 2013). A precipitação em pântadas (mm) medida numa data estação meteorológica no ano de 1991 é indicada com a linha azul. A linha vermelha corresponde à anomalia acumulada de precipitação (S) e a linha verde é a curva S suavizada. A linha preta indica a derivada da curva S suavizada. A taxa de variação de S (dS/dt) é utilizada para determinar o início ($dS/dt > 0$) e o fim ($dS/dt < 0$) da estação chuvosa. No exemplo, a estação chuvosa do ano de 1990 tem fim na pântada 22, da pântada 23 a 54 ocorre a estação seca do ano de 1991 e, a partir da pântada 55, inicia a estação chuvosa do ano de 1991, que terá término no ano de 1992.

Validação

A primeira parte dos resultados irá apresentar a climatologia da precipitação e da circulação atmosférica simulada pelo *ensemble* do RegCM4 no período histórico. Para validar a climatologia de precipitação são utilizados dados do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP), que têm resolução espacial de 1° (Adler et al., 2003), e cobrem o continente e o oceano. Já para validar o ciclo de vida do SMAS, é utilizada a

análise de chuva do *Climate Prediction Center* (CPC, Chen et al., 2008) por possuir melhor resolução horizontal ($0,5^\circ$) do que o GPCP. Entretanto, o CPC só possui dados sobre o continente. Para a validação da circulação atmosférica em 850 e 200 hPa do *ensemble* do RegCM4 é utilizada a reanálise ERA5 (Hersbach e Dee, 2016) do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), com resolução horizontal de $0,25^\circ$.

Na etapa de avaliação das climatologias, também é apresentada a diferença entre futuro e período histórico das variáveis precipitação e intensidade e direção do vento em 200 e 850 hPa do *ensemble* do RegCM4 considerando os cenários RCP2.6 e RCP8.5. Já na análise do ciclo de vida do SMAS, são apresentados resultados para o *ensemble* com os MCGs e RegCM4. Como a análise climatológica mostrará que há poucas mudanças projetadas no cenário RCP2.6 em termos de precipitação e circulação atmosférica, o estudo da monção focará apenas no cenário RCP8.5.

Ressalta-se que a metodologia para análise do ciclo de vida do SMAS é aplicada para cada projeção do RegCM4 e de cada modelo global e, somente após isso, é calculada a média das informações obtidas, o que é chamado de *ensemble*. Assim, na seção Resultados são apresentados mapas com os valores médios do RegCM4 e dos MCGs.

Resultados

Climatologias: Período Histórico e Futuro

O *ensemble* do RegCM4 é hábil em reproduzir a variabilidade sazonal da precipitação na AS comparado ao GPCP, mas com diferenças no volume de chuva (**Figura 2a-n**). Por exemplo, no verão (**Figura 2a-b**) o modelo subestima a precipitação na região da ZCAS, principalmente na Amazônia, e desloca o máximo observado nessa região para o centro-oeste do Brasil. Em todas as estações do ano, o modelo subestima a precipitação no sudeste da AS, no setor subtropical do oceano Atlântico e superestima na região da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) tanto no Atlântico quanto no Pacífico. Esses desvios seguem os relatados em estudos com versões prévias do RegCM (e.g., Llopart et al., 2020a). Embora o *ensemble* tenha diferenças em relação ao GPCP, isso não afeta as análises das projeções climáticas, pois para essas é computada a diferença entre o período futuro e histórico do modelo com o objetivo de obter o sinal de mudança na variável.

Considerando os cenários climáticos, no RCP2.6 o RegCM4 projeta um fraco aumento da precipitação sobre o sudeste da AS e região central do Brasil, no verão e outono, e condições ligeiramente mais secas na região da ZCAS, na primavera, em comparação ao período histórico (**Figura 2c,g,k,o**). Por outro lado, o modelo projeta um ligeiro aumento da chuva sobre os oceanos ao longo de todo o ano. Essas mudanças projetadas não apresentam significância estatística ao nível de 95% de confiança. Já no RCP8.5, há mudanças estatisticamente significativas sobre a maior parte

do continente (**Figura 2d,h,l,p**), com redução da precipitação na Amazônia, principalmente no verão, e ao longo de toda a região da ZCAS, na primavera. Condições mais úmidas são projetadas no sudeste da AS ao longo do ano e no centro-oeste e sudeste do Brasil no verão. Enquanto o sinal de déficit de precipitação na Amazônia e norte da AS e de aumento no sudeste da AS é uma informação convergente em vários modelos climáticos globais e regionais (Amazouir et al. 2021; Dias e Reboita, 2021), no sudeste do Brasil a situação é diferente. Essa é uma das regiões de maior incerteza nas projeções climáticas. Por exemplo, enquanto o modelo Eta no verão projeta redução das chuvas (Reboita et al., 2021), o RegCM4 indica aumento.

As mudanças projetadas na precipitação estão fortemente relacionadas com as mudanças na circulação atmosférica. Porém, antes de abordá-las é importante descrever a habilidade do *ensemble* do RegCM4 em simular a circulação em 850 e 200 hPa no período histórico (**Figuras 3 e 4**). De forma breve, em 850 hPa, embora o RegCM4 simule os principais padrões da circulação atmosférica, como o JBN a leste dos Andes e os anticiclones subtropicais sobre os oceanos, há subestimativa na intensidade desses sistemas. Com relação ao JBN, a subestimativa é bem evidente no verão e inverno (**Figura 3b,j**). Em 200 hPa a intensidade do jato subtropical e polar também é subestimada pelo modelo e o centro da AB aparece deslocado para sudoeste comparado à reanálise (**Figura 4a,b**).

A **Figura 2** mostra que os maiores impactos na precipitação sazonal da AS são projetados no cenário RCP8.5. Numa análise geral, duas questões surgem: (1) o que causa o déficit de precipitação na região Amazônica e norte da AS ao longo do ano e na região da ZCAS na primavera e (2) o que causa o aumento da precipitação no sudeste da AS que inclui o sul do Brasil?

A resposta da questão (1) está relacionada com a circulação em 850 hPa (**Figura 3**). Grande parte da umidade sobre a Amazônia é transportada do Atlântico Tropical Norte pelos ventos alísios de nordeste. No cenário RCP8.5 há um enfraquecimento desses ventos, que passam a transportar menos umidade para o continente. Com relação à umidade, Llopart et al. (2020b) recentemente mostraram que a convergência do fluxo de umidade nas projeções do RegCM4 (as mesmas utilizadas nesse estudo) enfraquece sobre a Amazônia no período de verão, o que está diretamente relacionado com o enfraquecimento dos alísios. Isso também pode ser uma causa para o enfraquecimento do JBN a leste dos Andes, principalmente no verão (**Figura 3d**). O enfraquecimento do JBN também pode explicar o

déficit de chuva na região da ZCAS na primavera. Além disso, tanto na primavera quanto no verão, o ASAS é projetado ser mais fraco, o que é desfavorável para o transporte de umidade do Atlântico para o sudeste do Brasil. Por outro lado,

a circulação ciclônica anômala entre a costa sul-sudeste do Brasil no verão (**Figura 3d**) pode ser um mecanismo de transporte de umidade do oceano para a região sudeste, o que explicaria a projeção de aumento de precipitação em tal local.

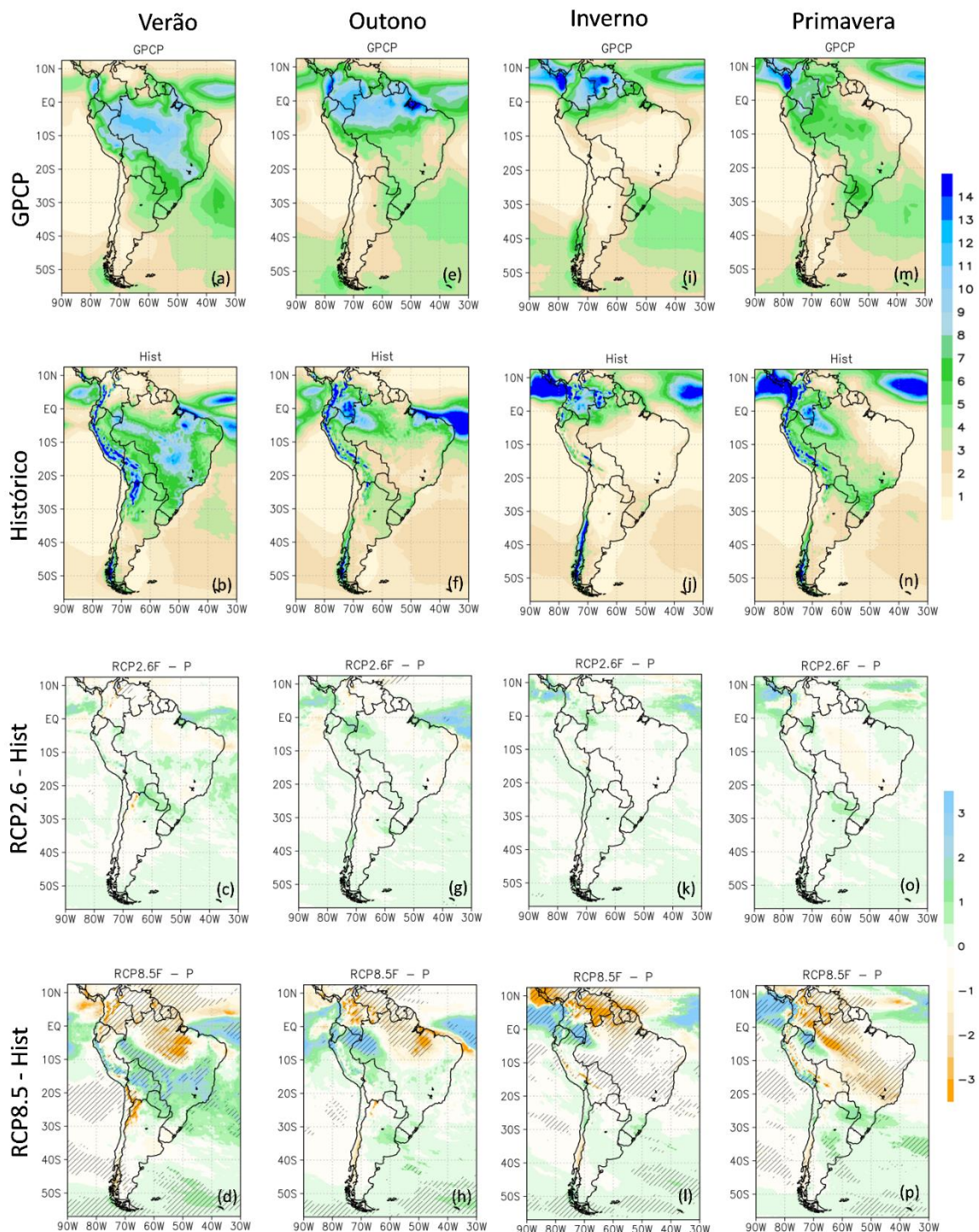


Figura 2. Precipitação sazonal (mm/dia) registrada no (a,e,i,m) GPCP e no (b,f,j,n) *ensemble* do RegCM4 no período de 1995 a 2014 e diferença dos cenários (c,g,k,o) RCP2.6 e (d,h,l,p) RCP8.5 no período de 2080 a 2099 em relação ao período histórico. Diferenças estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95% são destacadas em hachurado.

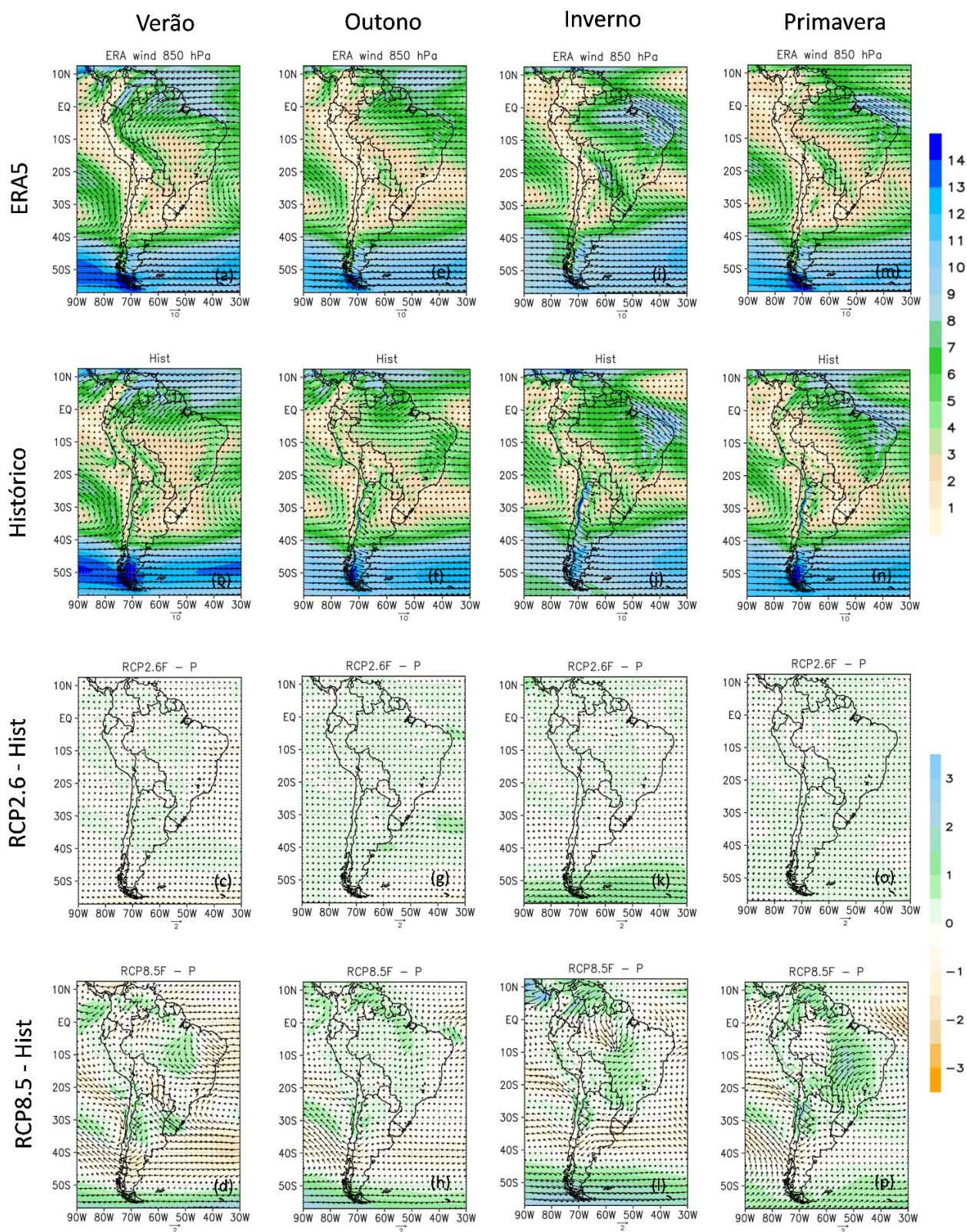


Figura 3. Intensidade (m/s; cores) e direção (setas) do sazonal vento em 850 hPa registradas na (a,e,i,m) ERA5 e no (b,f,j,n) ensemble do RegCM4 no período de 1995 a 2014 e diferença dos cenários (c,g,k,o) RCP2.6 e (d,h,l,p) RCP8.5 no período de 2080 a 2099 em relação ao período histórico.

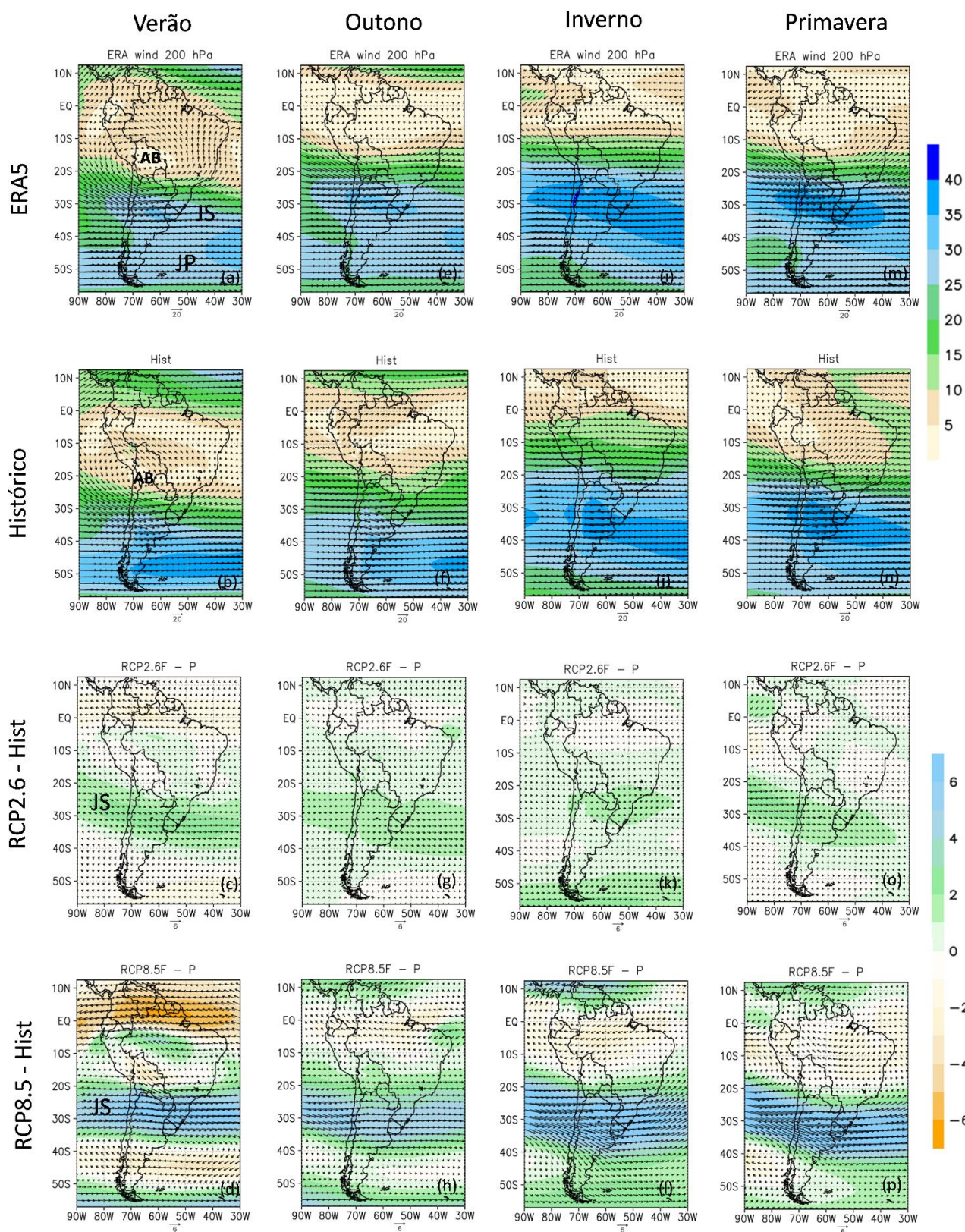


Figura 4. Similar à Figura 3, mas para a intensidade e direção do vento em 200 hPa. As iniciais AB, JP e JS indicam, respectivamente, Alta da Bolívia, Jato Polar e Jato Subtropical.

Para a questão (2), a resposta em parte está associada com a circulação anticiclônica anômala entre o oceano Atlântico e a Argentina, Uruguai e sul do Brasil (**Figura 3d,h,l,p**). Esse sinal vem sendo observado em projeções climáticas desde o CMIP3 (Seth et al., 2013). Porém, a resposta a questão (2) também pode ter a contribuição de processos físicos locais de acoplamento superfície-atmosfera (Llopart et al., 2020b). Sugere-se, ainda, que com o fortalecimento do jato subtropical (centro a cerca de 30°S) no cenário RCP8.5 ocorra de forma mais frequente e/ou intensa a divergência de massa sobre o sudeste da AS contribuindo para os movimentos ascendentes na atmosfera que são essenciais para a formação de nuvens precipitantes (**Figura 4d,h,l,p**). Glazer et al. (2021) analisaram a ocorrência de dias severos ($CAPE \geq 100 \text{ J/kg}$ e cisalhamento vertical do vento entre 6 km e a superfície $\geq 15 \text{ m/s}$) nas projeções do RegCM4 e mostraram um aumento na frequência desses eventos sobre o sudeste da AS no clima futuro. Embora o nível vertical analisado por esses autores seja mais baixo do que o de 200 hPa, o estudo ajuda a suportar a hipótese da influência dos ventos mais intensos em altos níveis para a organização das nuvens.

No cenário RCP8.5 é projetado deslocamento do jato polar para latitudes mais altas, o que é indicado pelo enfraquecimento do escoamento a cerca de 45°S e aumento em latitudes maiores do que 50°S (**Figura 4d,h,l,p**). Isso está relacionado com o deslocamento dos *storm tracks* em direção ao polo sul em cenários de mudanças climáticas. Entretanto, mesmo com o deslocamento dos *storm tracks*, a costa leste da AS continua sendo uma região ciclogênica no clima futuro e a precipitação associada a esses sistemas também influencia a precipitação no sudeste da AS como mostrado em Reboita et al. (2020).

Ciclo de Vida do Sistema de Monção da América do Sul

O SMAS se configura principalmente na região da ZCAS, que é indicada com uma elipse vermelha na **Figura 5**. Essa figura mostra a média,

em pântadas, do início, do fim e da duração da estação chuvosa no período de 1995 a 2014 na análise do CPC e a diferença em relação aos *ensembles* dos MCGs e do RegCM4. O início da estação chuvosa (**Figura 5a**) ocorre entre as pântadas 56 e 60 (3 a 27 de outubro) ao longo da ZCAS, portanto, há uma variabilidade espacial ao longo da região. No sul do Estado do Amazonas, Rondônia e oeste do Mato Grosso, assim como em Bombardi e Carvalho (2008), que utilizaram dados do GPCP, o início do SMAS começa por volta da pântada 60. Ainda no sul da Amazônia, o início do período chuvoso é próximo ao obtido por Alves (2016), pântada 59 (18 a 22 de outubro). Como destaca esse autor, as pequenas diferenças observadas entre os estudos podem ser atribuídas à metodologia aplicada e área utilizada na análise. Nas regiões centro-oeste e sudeste, o início da estação chuvosa tende a ocorrer entre as pântadas 57 e 58. Esses valores estão de acordo, por exemplo, com os obtidos no Estado de Minas Gerais por Silva e Reboita (2013). Entre o sul da Amazônia, oeste do Mato Grosso, São Paulo e sul de Minas Gerais, os modelos tendem a antecipar o início do SMAS em 2 a 4 pântadas, enquanto entre Goiás, Tocantins e norte de Minas Gerais, eles tendem a atrasar o início da estação chuvosa (**Figura 5a,b,c**).

É interessante destacar que em termos da climatologia sazonal da precipitação na AS (**Figura 2**), o que se observa é uma progressão dos volumes de precipitação do sul da Amazônia para as regiões centro-oeste e sudeste do Brasil da primavera para o verão. Entretanto, quando se utilizam técnicas para a identificação da estação chuvosa, há uma tendência de essa iniciar no sul da Amazônia ligeiramente após ao centro-oeste e sudeste do país (**Figura 5a,b,c**). Fato que pode estar associado com as características locais dessas regiões. Por exemplo, a Amazônia é bastante chuvosa ao longo do ano, mas a sequência de dias com precipitação mais volumosa pode ocorrer de forma tardia comparada às outras regiões mencionadas.

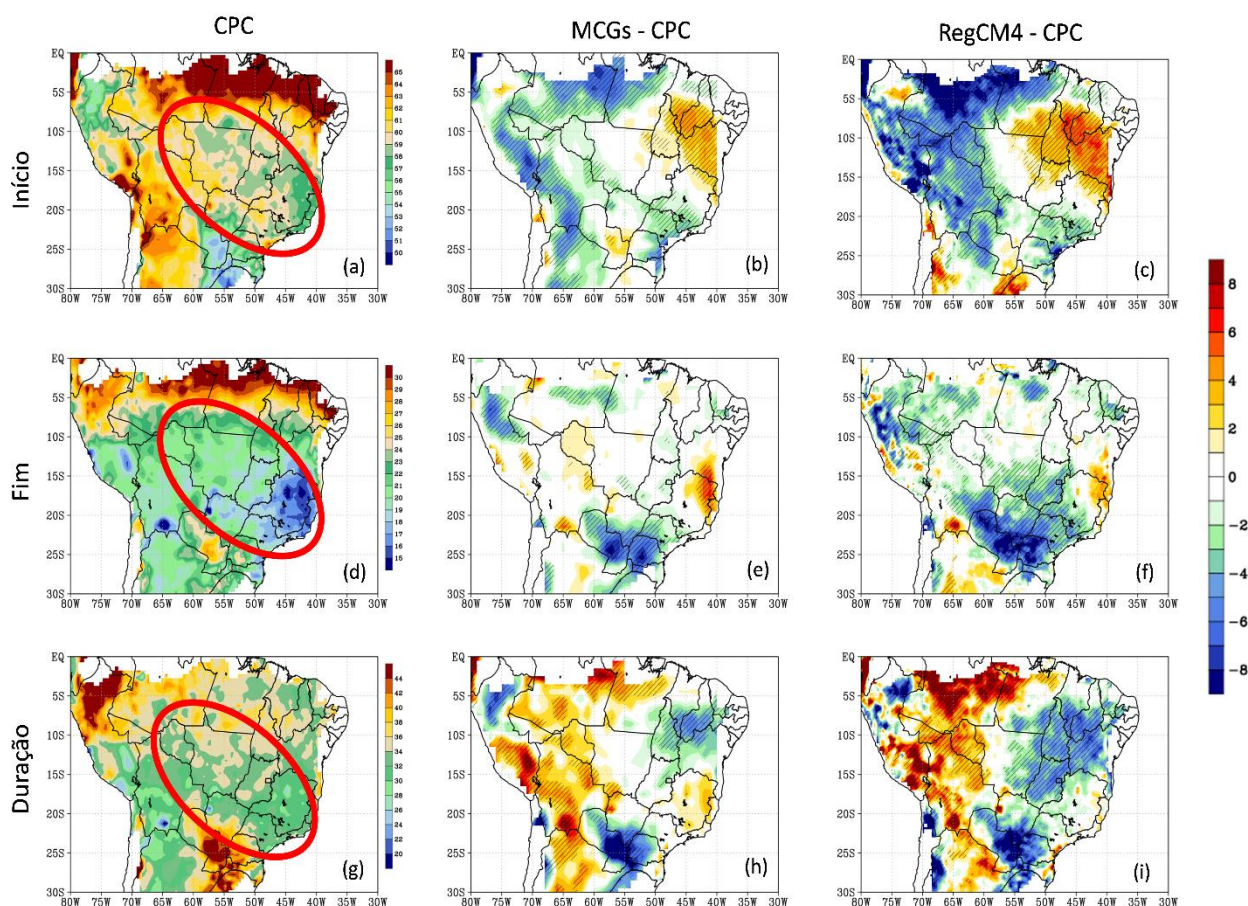


Figura 5. Ciclo de vida do SMAS (escala em pântadas) no período de 1995 a 2014 obtido com a análise do CPC e com os *ensembles* dos MCGs e RegCM4. A coluna da esquerda mostra a média obtida com o CPC enquanto a coluna central ilustra a diferença entre o *ensemble* dos MCGs e o CPC e a terceira coluna apresenta a diferença do *ensemble* do RegCM4 e o CPC. As diferenças estatisticamente significativas ao nível de 95% são indicadas com linhas hachuradas. Nos painéis a,d,g, a região de atuação da ZCAS é indicada com a linha vermelha.

O fim da estação chuvosa é registrado primeiro sobre a região sudeste do Brasil (**Figura 5d**) entre as pântadas 15 e 17 (12 a 26 de março), enquanto no centro-oeste do país e sul da Amazônia, ele tende a ocorrer entre as pântadas 20 e 23 (5 a 25 de abril). Novamente, os resultados para o sul da Amazônia são concordantes com os de Alves (2016), que indica a pântada 23. A diferença entre os *ensembles* e o CPC para o fim da estação chuvosa é similar àquela registrada no início dessa, pois os modelos tendem a adiantar o fim da estação chuvosa sobre o sudeste do Brasil (**Figura 5d,e,f**). Como no sudeste do Brasil os *ensembles* adiantam o início e o fim da estação chuvosa, isso praticamente não afeta muito a duração do SMAS em comparação ao CPC, diferenças maiores são obtidas sobre Goiás e Tocantins, com a duração da estação chuvosa

sendo subestimada em até 7 pântadas pelo RegCM4 (**Figura 5g,h-i**). Considerando o CPC, a duração da estação chuvosa é de 36 pântadas (180 dias) no sul da Amazônia e de 34 (170) na região sudeste do Brasil (**Figura 5g**). Embora ocorram diferenças no período histórico entre os *ensembles* e o CPC, essas não afetam o estudo das projeções climáticas, uma vez que os períodos futuro e histórico são comparados entre as simulações e não com o dado observado.

O início da estação chuvosa, ao longo da região da ZCAS, é projetado atrasar em cerca de duas pântadas no *ensemble* do MCGs e em até 5 pântadas no *ensemble* do RegCM4 (**Figura 5e-f**). Esses resultados são concordantes com os de Alves (2016) para o cenário A1B do IPCC, uma vez que verificou atraso no início da estação chuvosa no sul da Amazônia de cerca de 5 pântadas. Enquanto o

ensemble dos MCGs não projetasinal de mudanças no término da estação chuvosa na região da ZCAS e arredores (**Figura 7e**), o *ensemble* do RegCM4 indica que em parte da Amazônia e no sudeste do Brasil, o término será atrasado em aproximadamente 3 pântadas (**Figura 7**). Como não há sinal projetado pelos MCGs e no RegCM o atraso é menor do que o atraso no início da estação chuvosa, isso indica que no futuro, o SMAS pode ser menos duradouro. Isso é mostrado na **Figura 8**

com a redução de 2 a 4 pântadas nos MCGs e em até 6 pântadas no RegCM4. Além disso, essas diferenças entre os períodos futuro e histórico possuem significância estatística ao nível de 95% de confiança. A redução da duração da estação chuvosa também foi projetada em estudos prévios como os de Reboita et al. (2014) – que, considerando o cenário A1B, obtiveram decréscimo de ~2 pântadas na estação chuvosa – e Alves (2016).

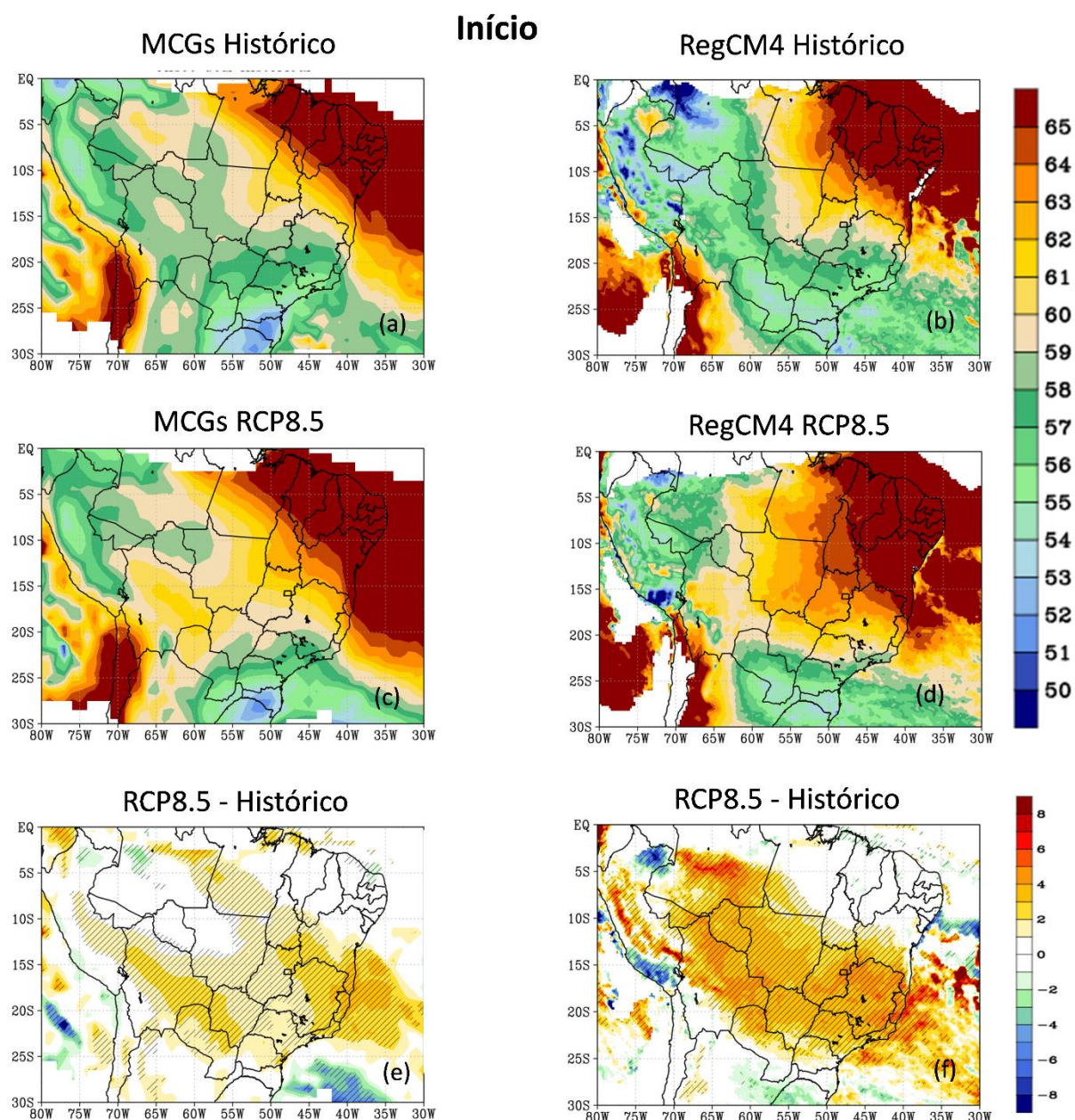


Figura 6. Início do ciclo de vida do SMAS (escala em pântadas) no (a-b) período histórico (1995 a 2014) e (c-d) futuro (2080-2099) considerando o cenário RCP8.5. A coluna esquerda mostra o *ensemble* dos MCGs e a da direita do RegCM4. Em (e-f) é apresentada a diferença entre o período futuro e histórico. As diferenças estatisticamente significativas ao nível de 95% são indicadas com linhas hachuradas.

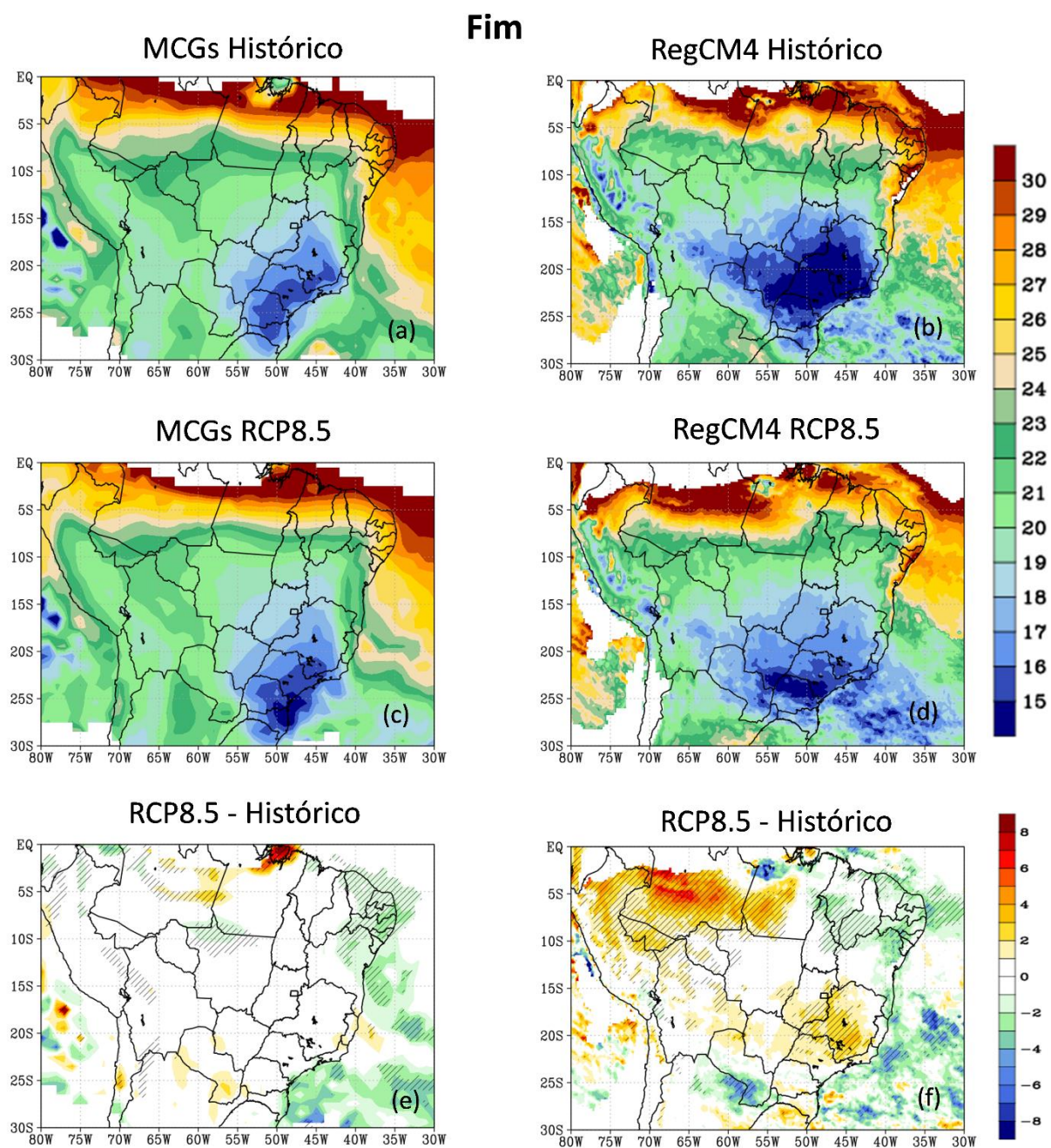


Figura 7. Similar à Figura 6, mas para o fim do ciclo de vida do SMAS.

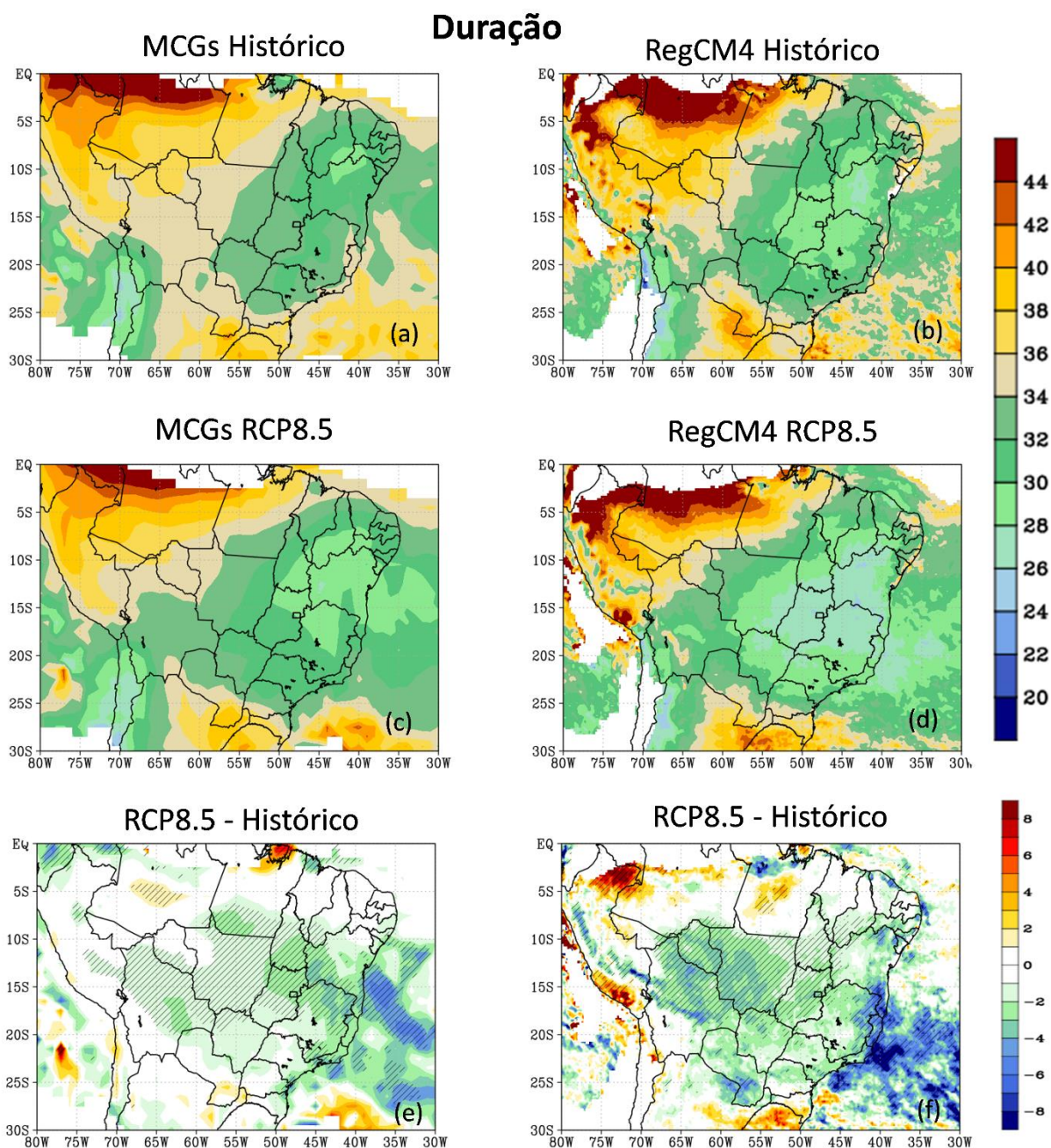


Figura 8. Similar à Figura 6, mas para a duração do ciclo de vida do SMAS.

Conclusões

Este estudo teve como objetivo identificar as características do ciclo de vida do SMAS no clima presente (1995-2014) e em projeções (2080-2099) obtidas com três modelos climáticos globais e de um modelo climático regional considerando o cenário RCP8.5. Uma região de monção é aquela que ao longo do ano apresenta um período seco e outro úmido. Considerando a AS, a região de monção é bem configurada ao longo da ZCAS, que

se estende do sul da Amazônia ao sudeste do Brasil. Como essa é uma área extensa, logo o ciclo de vida do SMAS apresentará variabilidade temporal ao longo da região. Numa análise geral, é projetada redução do período úmido ao longo da ZCAS de 2 a 4 pântadas nos MCGs e em até 6 pântadas no RegCM4 no cenário RCP8.5. Se a análise for focada em setores, os MCGs projetam atraso em torno de 2 pântadas no início da estação chuvosa na maior parte da região Sudeste, enquanto o

RegCM4 estima atraso de até 4 pântadas em áreas como no norte de Minas Gerais. Para o sul da Amazônia, o RegCM4 também projeta atraso de até 5 pântadas no início da estação chuvosa, em regiões como o sudeste do Amazonas e sudoeste do Pará. Considerando o fim da estação chuvosa, os MCGs não apresentam sinal de mudanças no período de término, enquanto o RegCM4 projeta atraso de até 3 pântadas em setores do sudeste do Brasil e sul da Amazônia, indicando menor duração do período monçônico na maior parte da região central brasileira.

Esse estudo é de extrema relevância para o planejamento de atividades que demandam da contribuição da estação chuvosa, como a agricultura.

Agradecimentos: os autores agradecem ao ICTP pela disponibilização das projeções do RegCM4, ao CMIP5 pelas projeções dos modelos globais e ao CNPq, FAPEMIG e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil – Código de Financiamento 001) pelo auxílio financeiro.

Referências

- Adler, R.F., Huffman, G. J., Chang, A.; Ferraro, R., Xie, P.P., Janowiak, J., Rudolf, B., Shneider, U., Curtis, S., Bolvin, D., Gruber, A., Susskind, J., Arkin, P., Nelkin, E., 2003. The Version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979–Present). *Journal of Hydrometeorology* 4, 1147-1167
- Ali, S., Reboita, M.S., Kian, I.R., 2021. 21st century precipitation and monsoonal shift over Pakistan and Upper Indus Basin (UIB) using high-resolution projections. *Science of The Total Environment* 797
- Almazroui, M., Ashfaq, M., Islam, M.Z., Rashid, I.U., Kamil, S., Abid, M.A., O'Brien, E., Ismail, M., Reboita, M.S., Sörensson, A.A., Arias, P.A., Alves, L.M., Tippett, M.K., Saeed, S., Haarsma, R., Doblas-Reye, F.J., Saeed, F., Kucharski, F., Nadeem, I., Silva-Vidal, Y., Rivera, J.A., Ehsan, M.A., Martínez-Castro, D., Muñoz, A.G., Ali, M.A., Coppola, E., Sylla, M.B., 2021. Assessment of CMIP6 Performance and Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America. *Earth System Environment* 5, 155-183
- Alves, L. M., 2016. Análise estatística da sazonalidade e tendências das estações chuvosas e seca na Amazônia: Clima presente e projeções futuras. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- Recuperado em 09, setembro, 2021, de <http://mtcm21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtcm21b/2016/03.03.12.52/doc/publicacao.pdf>
- Bombardi, R.J., Carvalho, L.M.V., 2008. IPCC Global Coupled Model Simulations of the South America Monsoon System. *Climate Dynamics* 33, 893-916
- Carvalho, L.M.V.; Jones, C.; Liebmann, B., 2004. The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. *Journal of Climate* 17, 88–108
- Carvalho, L.M.V., Cavalcanti, I.F.A., 2016. The South American Monsoon System (SAMS). In: Carvalho, L.M.W., Jones, C. *The Monsoons and Climate Change* (pp. 121-148). Sydney: Springer Climate
- Chen, M., Shi, W., Xie, P., Silva, V., Kousky, V.E., Higgins, W.R., Janowiak, J., 2008. Assessing objective techniques for gauge-based analysis of global daily precipitation. *Journal of Geophysical Research* 113, 1-13
- Correa, I., Arias, P.A., Rojas, M., 2020. Evaluation of multiple indices of the South American monsoon. *International Journal of Climatology* 41, 2801-2819
- Cunningham, C.A.C., Cavalcanti, I.F.A., 2006. Intraseasonal modes of variability affecting the South Atlantic Convergence Zone. *International Journal of Climatology* 26, 1165-1180
- Dias, C. G.; Reboita, M.S., 2021. Assessment of CMIP6 Simulations over Tropical South America. *Revista Brasileira de Geografia Física* 14, 1282-1295
- Durán-Quesada, A.M., Reboita, M.S., Gimeno, I., 2012. Precipitation in tropical America and the associated sources of moisture: a short review. *Hydrological Sciences Journal* 57, 1-13
- Escobar, G.C.J., 2019. Classificação sinótica durante a estação chuvosa do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, 42, 421-43
- Ferreira, G.W.S., Reboita, M.S., da Rocha, R.P., 2019. Vórtices ciclônicos de altos níveis nas cercanias do Nordeste do Brasil: climatologia e análise da vorticidade potencial isentrópica. *Anuário do Instituto de Geociências* 42, 568-585
- Gan, M.A., Kousky, V., Ropelewski, C.F., 2004. The South America Monsoon Rainfall over West-Central Brazil. *Journal of Climate* 17, 47-66
- Geen, R., Bordoni, S., Battisti, D., Hui, K., 2020. The Dynamics of the Global Monsoon: Connecting 2 Theory and Observations. *Earth and Space Science Open Archive (ESSOAr)* 1, 1-50
- Giorgi, F., Jones, C., Asrar, G., 2009. Addressing climate information needs at the regional level:

- the CORDEX framework. WMO Bulletin 58, 175-183
- 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. Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research* 52, 7-29
- Grimm, A.M., 2004. How do La Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil? *Climate Dynamics* 22, 123-138
- Grimm, A.M., Dominguez, F., Cavalcanti, I.F.A., Cavazos, T., Gan, M.A., Silva Dias, P.L., Fu, R., Castro, C., Hu, H.; Barreiro, M., 2020. South and North American monsoons: characteristics, life cycle, variability, modelling and prediction. In: Chang CP, Ha K-J, Johnson RH, Kim F, Lau GNC, Wang B (eds.), *The Multi-Scale Global Monsoon System*, World Scientific Series on Asia-Pacific Weather and Climate, Vol. 11, World Scientific Publishing Company, Singapore, 500 pp., Chapter 5, p. 49-66. 2020. ISBN: 978-981-121-659-6
- 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., Stephenson, T., Tangang, F., 2016. WCRP Coordinated Regional Downscaling EXperiment (CORDEX): a diagnostic MIP for CMIP6. *Geoscience Model Development* 9, 4087-4095
- Hasson, S.U., Pascale, S., Lucarini, V., Böhner, J., 2016. Seasonal cycle of precipitation over major river basins in South and Southeast Asia: A review of the CMIP5 climate models data for present climate and future climate projections. *Atmospheric Research* 180, 42-63
- Hersbach, H., Dee, D., 2016. ERA5 reanalysis is in production. Recuperado em 09 setembro, 2021, de <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/147/news/era5-reanalysis-production>
- Ibrahima, D., Camara, M., Diedhiou, A., 2019. Investigating West African Monsoon Features in Warm Years Using the Regional Climate Model RegCM44. *Atmosphere* 10, 2-16
- Jones, C., Carvalho, L.M., 2013. Climate change in the South American monsoon system: present climate and CMIP5 projections. *Journal of Climate* 26, 6600-6678
- Kousky, V.E., 1988. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. *Revista Brasileira de Meteorologia* 3, 217-231
- Lee, J.Y., Wang, B., 2014. Future change of global monsoon in the CMIP5. *Climate Dynamics* 42, 101-119
- Liebmann, B., Marengo, J.A., 2001. *Journal of Climate* 14, 4308-4318
- 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* 125, 11-125
- Llopart, M., Reboita, M.S., da Rocha, R.P., 2020a. Assessment of multi-model climate projections of water resources over South America CORDEX domain. *Climate Dynamics* 54, 99-116
- Llopart, M., Domingues, L.M., Torma, C., da Rocha, R.P., Ambrizzi, T., Reboita, M.S., Alves, L.M., Coppola, E., da Silva, M.L., de Souza, D.O., 2020b. Assessing changes in the atmospheric water budget as drivers for precipitation change over two CORDEX-CORE domains. *Climate Dynamics* 57, 1615-1628
- Marengo, J.A., Liebmann, B., Kousky, V., Filizola, N.P., Wainer, I.C., 2001. On the onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon basin. *Journal of Climate* 14, 833-852
- Marengo, J.A., Liebmann, B., Grimm, A.M., Misra, V., Dias, P.L.S., Cavalcanti, I.F.A., Carvalho, L.M.V., Berbery, E.H., Ambrizzi, T., Vera, C.S., Saulo, A.C., Nogues-Paegle, J., Zipser, E., Seth, A., Alves, L.M., 2012. Recent developments on the South American monsoon system. *International Journal of Climatology* 32, 1-21
- Meehl, G. A., Bony, S., 2011. Introduction to CMIP5. *Clivar Exchanges* 16, 4-5
- Moon, S., Ha, K-J., 2020. Future changes in monsoon duration and precipitation using CMIP6. *Climate and Atmospheric Science* 3, 45
- Pascale, S., Carvalho, L.M.V., Adams, D.K., Castro, C.L., Cavalcanti, I.F.A., 2019. Current and Future Variations of the Monsoons of the Americas in a Warming Climate. *Current Climate Change Reports* 5, 125-144
- Raj, J., Bangalath, H.K., Stenchikov, G., 2018. West African Monsoon: current state and future projections in a high-resolution AGCM. *Climate Dynamics* 52, 6441-646
- Ramage, C. S., 1971. *Monsoon Meteorology*. New York: Academic Press
- Rao, V.B., Hada, K., 1990. Characteristics of rainfall over Brazil: annual variation and connections with the southern oscillation. *Theoretical and Applied Climatology* 42, 81-91
- 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* 25, 185-204

- Reboita, M.S., da Rocha, R.P., Dias, C.G., Ynoue, R.Y., 2014. Climate projections for South America: RegCM43 driven by HadCM3 and ECHAM5. *Advances in Meteorology* 2014, 1-17
- Reboita M.S., da Rocha, R.P., de Souza, M.R., Llopart, M. 2018. Extratropical cyclones over the southwestern South Atlantic Ocean: HadGEM2-ES and RegCM4 projections. *International Journal Climatology* 38, 2866–2879
- Reboita, M.S., Ambrizzi, T., Silva, B.A., Pinheiro, R.F., da Rocha, R.P., 2019. The South Atlantic Subtropical Anticyclone: Present and Future Climate. *Frontiers in Earth Science* 7, 1-15
- Reboita, M.S., Reale, M., da Rocha, R.P., Giorgi, F., Giuliani, G., Coppola, e., Nino, R.B.L., 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. 2020. *Climate Dynamics* 57, 1533-1549
- 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.
- Seluchi, M.E., Saulo, A.C., 2012 Baixa do Noroeste Argentino e baixa do Chaco: características, diferenças e semelhanças. *Revista Brasileira de Meteorologia* 27, 49-60
- Sena, A.C.T., Magnusdottir, G., 2020. Projected End-of-Century Changes in the South American Monsoon in the CESM Large Ensemble. *Journal of Climate* 33, 7859-7874
- Seth, A., Rauscher, S.A., Biasutti, M., Giannini, A., Camargo, S. J., 2013. CMIP5 Projected Changes in the Annual Cycle of Precipitation in Monsoon Regions. *Journal of Climate* 26, 7328-7351.
- Shawki, D., Voulgarakis, A., Chakraborty, A., Kasoar, M., Srinivasan, J., 2018. The South Asian Monsoon response to remote aerosols: global and regional mechanisms. *Journal of Geophysical Research* 123, 585-601
- Silva, E.D., Reboita, M.S., 2013. Estudo da Precipitação no Estado de Minas Gerais - MG. *Revista Brasileira de Climatologia* 13, 120-136
- Silva, J.P., Reboita, M.S., Escobar, G.C.J., 2019. Caracterização da Zona de Convergência do Atlântico Sul em campos atmosféricos. *Revista Brasileira de Climatologia* 25, 355-377
- Teodoro, T.A., Reboita, M.S., Llopart, M., da Rocha, R.P., Ashfaq, M., 2021. Climate Change Impacts on the South American Monsoon System and Its Surface–Atmosphere Processes Through RegCM4 CORDEX-CORE Projections. *Earth Systems and Environment*; <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00265-y>
- Vera, C., Higgins, W., Ambrizzi, T., Amador, J., Garreaud, R., Gochis, D., Gutzler, D., Lettenmaier, D., Marengo, J., Mechoso, C.R., Nogues-Paegle, J., Dias, P.L.S.; Zhang, C., 2006. Toward a Unified View of the American Monsoon Systems. *Journal of Climate* 19, 4977-5000
- Wang, B., Ding, Q., 2008. Global monsoon: dominant mode of annual variation in the tropics. *Dynamics of Atmospheres and Oceans* 44, 165-183
- Wang, B., Liu, J., Kim, H.J., Webster, P.J., Yim, S-Y., 2012. Recent change of the global monsoon precipitation (1979-2008). *Climate Dynamics* 39, 1123-1135
- Wang, B., Jin, C., Liu, J., 2020. Understanding Future Change of Global Monsoons Projected by CMIP6 Models. *Journal of Climate* 33, 6471-6488
- Zhou, J., Lau, K.M., 1998. Does a Monsoon Climate Exist over South America? *Journal of Climate* 11, 1020-1040.