

Universidade Federal do Rio de Janeiro

O Sistema de Monção da América do Sul:  
As Mudanças Observadas e as Projeções (Hidro)climáticas

Camila Camarinha

2022

O Sistema de Monção da América do Sul:  
As Mudanças Observadas e as Projeções (Hidro)climáticas

CAMILA CAMARINHA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPFM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências (área: Meteorologia).

Orientadora: Ana Maria Bueno Nunes

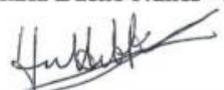
Rio de Janeiro  
Setembro de 2022

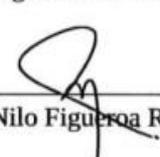
**O SISTEMA DE MONÇÃO DA AMÉRICA DO SUL: AS MUDANÇAS  
OBSERVADAS E AS PROJEÇÕES (HIDRO)CLIMÁTICAS**

CAMILA CAMARINHA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (ÁREA: METEOROLOGIA).

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Ana Maria Bueno Nunes - PPGM/UFRJ

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Hugo Abi Karam - PPGM/UFRJ

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Silvio Nilo Figueroa Rivero - INPE

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO 2022

**Camarinha, Camila.**

**O Sistema de Monção da América do Sul: As Mudanças Observadas e as Projeções (Hidro)climáticas / Camila Camarinha. – Rio de Janeiro: UFRJ/PPGM/IGEO/CCMN, 2022.**

**XXII, 88 p.: il;**

**Orientadora: Ana Maria Bueno Nunes.**

**Bibliografia: Inclui Bibliografias.**

**1. Hidroclimatologia 2. Modelo Climático 3. América do Sul**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar aos meus pais Arilma Camarinha e Alzir Cosme Camarinha e ao Bruno Moreira Soares Medeiros, que sempre me ajudaram de todas as formas possíveis, durante esse período em que estive nessa instituição e sempre acreditaram em mim e principalmente a Deus, por todas as oportunidades que tive.

Agradeço ao Projeto de Educação Ambiental e Cidadania (PEAC) da Universidade Castelo Branco e principalmente a professora Edilaine Morais de Souza, pelo suporte e ajuda que sempre me foram concedidos durante o tempo em que estive no projeto, desde a faculdade até aqui, obrigada Didi. Aprendi muito com as pessoas que compunham esse grupo, não só em questões acadêmicas, mas em questões éticas e morais.

Devo também agradecimentos a Sibeles Cazelli, pela chance de fazer parte de sua pesquisa PIBIC e a Coordenação de Educação do Museu de Astronomia e Ciências Afins e especialmente a Amanda Amorim, pela oportunidade que me deu, por acreditar em mim.

Agradeço ao Departamento de Meteorologia da UFRJ e principalmente ao corpo docente e a secretaria, ao professor e antigo coordenador Luiz que sempre me auxiliou durante o caminho novo que eu estava começando a trilhar e pela explicação e suporte, do Esteban e do Antônio, meus sinceros agradecimentos.

Agradeço a minha orientadora Professora Ana Nunes, por ter acreditado que eu conseguiria chegar até aqui, nesse caminho que foi difícil, mas com a recompensa do aprendizado. A Isabella Ecard por ter me ajudado a entender diversas coisas na pesquisa, principalmente os programas de análise que a meteorologia utiliza e o mesmo digo do Geraldo Gomes e muito obrigada ao laboratório GEMMAS.

E finalizando agradeço a CAPES, pela bolsa que me ajudou a concluir esse mestrado, principalmente em meio a essa pandemia, que se eu não tivesse a bolsa não sei como teria sido esse momento, então entrego aqui o fruto da confiança empregada em mim.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGM/IGEO/CCMN/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

Sistema de Monção da América do Sul:

As Mudanças Observadas e as Projeções (Hidro)climáticas

O sistema global de monção está conectado com o padrão de precipitação da região tropical, portanto o entendimento da variabilidade e da mudança de seu regime é de suma importância para o crescimento de diversos países em desenvolvimento, nos quais a agricultura é o principal fator econômico e boa parte da energia elétrica é gerada em hidrelétricas. Dentro desse contexto, o estudo foi dividido em duas partes com o propósito de avaliar o impacto das mudanças climáticas no Sistema de Monção da América do Sul (SMAS), o qual é responsável pela precipitação que abastece importantes regiões hidrográficas brasileiras. Como uma forma de detectar possíveis mudanças nos períodos histórico e futuro na área do SMAS, utilizaram-se médias mensais de 30 anos dos meses de janeiro a dezembro das seguintes variáveis: temperatura do ar, precipitação e evapotranspiração. Então, na primeira fase do estudo, comparações entre o clima no passado recente (de janeiro 1955 até dezembro de 1984) e a climatologia corrente (janeiro de 1985 até dezembro de 2014) foram realizadas através dos seguintes modelos climáticos globais de quarta geração do *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL): o modelo climático acoplado, *Coupled Climate Model* (CM4), e do sistema terrestre, *Earth System Model* (ESM4), sendo que ambos fazem parte do *Coupled Model Intercomparison Project, Phase 6* (CMIP6). Produtos com base em observações *in situ* e uma reanálise global foram selecionados para as avaliações nos dois períodos históricos devido à longa série temporal disponível desses produtos. Na segunda parte, buscou-se avaliar as mudanças no clima projetado para o final do século na região do SMAS. Dessa forma, realizaram-se comparações entre o clima corrente, analisado na primeira parte do estudo, e o do final do século XXI (janeiro de 2071 até dezembro de 2100), o último utilizando o cenário mais severo entre os do CMIP6. Através de métricas estatísticas, os resultados indicaram que nos meses chuvosos do verão austral na região do SMAS, o CM4 teve um desempenho melhor do que o ESM4 em comparações com as análises da precipitação observada. Os resultados da fase histórica apontaram uma maior mudança nos meses da estação seca do inverno, com um aumento da temperatura do ar acima 1,5 °C, seguido por uma redução na precipitação, em comparação com o clima do passado recente, utilizando as análises da Universidade de Delaware, EUA. Sob o cenário mais extremo do CMIP6, o CM4 projetou uma diferença na temperatura do ar que pode ultrapassar 9 °C nos meses associados com o início da fase ativa do SMAS em algumas áreas na primavera. Os dois modelos do GFDL projetam uma redução na precipitação durante todos os meses do ano em relação ao clima corrente, especialmente no inverno e na primavera. O presente trabalho indica um atraso no início da fase ativa do SMAS para o final do século XXI, o que corrobora estudos anteriores que utilizaram os modelos do GFDL da quinta fase do experimento CMIP.

Palavras-chave: hidroclimatologia, modelo climático, recursos hídricos, América do Sul



Abstract of Dissertation presented to PPGM/IGEO/CCMN/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

South American Monsoon System:  
Observed Changes and Hydro-climate Projections

The global monsoon system is associated with the tropical rainfall pattern; therefore, it is of paramount importance to understand its precipitation variability and change for the growth of several developing countries, in which agriculture is the main economic factor and hydropower plants produce most of the energy. Within this context, this work was divided into two parts with the purpose of assessing the impact of climate change on the South American Monsoon System (SAMS), which is responsible for the precipitation in important Brazilian hydrographic regions. To detect any changes in the historical and future periods over the SAMS region, monthly averages of 30 years from January to December of the following variables were used: air temperature, precipitation, and evapotranspiration. Then, in the first phase of the study, comparisons will be made between the climatology of the recent past (from January 1955 to December 1984) and the current climate (from January 1985 to December 2014), carried out using the following fourth-generation climate models of the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL): the Coupled Climate Model (CM4) and the Earth System Model (ESM4). Both models integrate the Model-Coupled Intercomparison Project, Phase 6 (CMIP6). To assess the current climatology of the two global models, we used long-record, gridded products based on in situ observations and a global reanalysis. In the second part, an evaluation of the projected changes in temperature and precipitation for the end of the century in the SAMS region was performed using the two models' climates, current and end of the 21st century (January 2071 to December 2100), the latter using the most severe scenario of CMIP6. In comparison with precipitation analyses using statistical metrics, the first-phase results indicated that overall, CM4 performs better than ESM4 in the study area, especially in the rainy months of the austral summer. The results of the historical phase also indicated changes in the months of the SAMS dry season, with an increase in air temperature above 1.5 °C, followed by a reduction in precipitation in comparison with the recent past climate using the gridded analyses of the University of Delaware, USA. Under the CMIP6 extreme climate scenario, CM4 projected an increase in air temperature that could exceed 9 °C in the months associated with the beginning of the active phase of SAMS in some areas during the spring. Both GFDL models projected a reduction in precipitation related to the current climate throughout the year, especially during winter and spring. The reported results corroborate previous studies, using the GFDL models from Phase 5 of the CMIP experiment, on the delay in the onset of SAMS by the end of the 21st century.

Keywords: hydro-climatology, climate model, water resources, South America



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Esquema do SMAS para meses de verão e inverno no Hemisfério Sul.	23
Figura 2	Área de interesse do estudo na América do Sul. Orografia do modelo GFDL-CM4 em metros representada pela barra de cores. SMAS delimitado por um retângulo tracejado.	29
Figura 3	Exemplo de Diagrama de Caixa ( <i>Boxplot</i> )	37
Figura 4	Exemplo do Diagrama de Taylor.	39
Figura 5	Diferença na climatologia mensal na área do SMAS entre o clima corrente e o passado recente nos meses de janeiro a dezembro para: a) temperatura do ar (°C), (b) precipitação acumulada (mm), ambas provenientes de UDEL, e (c) precipitação acumulada (mm) oriunda do GPCC.	41
Figura 6	Avaliação da precipitação média mensal (mm/dia) dos modelos globais através do Diagrama de Taylor, para os meses de janeiro a dezembro (a-m) na área do SMAS.	46
Figura 7	Mudança na temperatura do ar a 2 metros (°C) de UDEL no clima corrente em relação ao passado recente de janeiro a dezembro (a-m), respectivamente. Área do SMAS demarcada por um retângulo tracejado.	49
Figura 8	Idem Figura 7, exceto que para o CM4.	50
Figura 9	Idem Figura 7, exceto que para o ESM4.	51
Figura 10	Mudança na precipitação (%) de UDEL no clima corrente em relação ao passado recente de janeiro a dezembro (a-m), respectivamente. Área do SMAS demarcada por um retângulo tracejado.	53
Figura 11	Idem Figura 10, exceto que para o CM4.	54
Figura 12	Idem Figura 10, exceto que para o ESM4.	55

Figura 13	Diferença entre a precipitação e a evaporação (P-E) no clima corrente em mm/d para ERA5, de janeiro a dezembro (a-m), respectivamente. Área do SMAS demarcada por um retângulo tracejado.	58
Figura 14	Idem Figura 13, exceto que para o CM4.	59
Figura 15	Idem Figura 13, exceto que para o ESM4.	60
Figura 16	Diagrama de Caixa (BoxPlot) para o passado recente, clima corrente e final do século (apenas para os modelos) para: a observação UDEL (a, b) e os modelos CM4 (c-e) e ESM4 (f-h), respectivamente.	63
Figura 17	Mudança projetada na temperatura do ar a 2 metros (°C) pelo CM4 para o clima final do século XXI em relação ao clima corrente de janeiro a dezembro (a-m), respectivamente. Área do SMAS demarcada por um retângulo tracejado.	65
Figura 18	Idem Figura 17, exceto que para o ESM4.	66
Figura 19	Mudança projetada na precipitação (%) pelo CM4 para clima do final do século XXI em relação ao clima corrente de janeiro a dezembro (a-m), respectivamente. Área do SMAS demarcada por um retângulo tracejado.	69
Figura 20	Idem Figura 19, exceto que para o ESM4.	70
Figura 21	Diferença entre precipitação e evapotranspiração (P-E) no clima do final do século XXI em mm/d para o CM4, de janeiro a dezembro (a-m), respectivamente. Área do SMAS demarcada por um retângulo tracejado.	73
Figura 22	Idem figura 21, exceto que para o ESM4.	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Modelos Climáticos do GFDL	31
Tabela 2	Reanálise e produtos com base em observações	32

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>1.1. Objetivos</b>	<b>14</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>16</b>
<b>2.1. O Sistema da Monção da América do Sul (SMAS)</b>	<b>19</b>
<b>2.2. Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP)</b>	<b>23</b>
<b>2.3. Cenários do Projeto de Intercomparação de Modelos</b>	<b>25</b>
<b>2.4. Projeções Climáticas e SMAS</b>	<b>25</b>
<b>3. DADOS E MÉTODOS</b>	<b>28</b>
<b>3.1. Área de Estudo</b>	<b>29</b>
<b>3.2. Modelos Climáticos Globais</b>	<b>30</b>
<b>3.3. Dados Utilizados</b>	<b>31</b>
<b>3.3.1. Interpolação de Dados</b>	<b>34</b>
<b>3.3.2. Ferramentas de Análise</b>	<b>34</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>40</b>
<b>4.1. Séries Históricas</b>	<b>40</b>
<b>4.2. Projeções Climáticas</b>	<b>61</b>
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>75</b>
<b>5.1. Trabalhos Futuros</b>	<b>76</b>
<b>6. REFERÊNCIAS</b>	<b>77</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O sistema global de monção está conectado com um padrão de precipitação da região tropical, portanto o entendimento da variabilidade de seu regime é de suma importância para a segurança hídrica e alimentar de diversos países em desenvolvimento, onde a agricultura é o principal fator econômico e boa parte da energia elétrica é gerada em hidrelétricas (WADE, 2014). Além disso, um estudo recente de Moozhipurathe e Kraft (2021) discorre sobre o impacto da monção no sudoeste da Índia na saúde da população e sua contribuição na dinâmica de doenças contagiosas, que tendem a ocorrer no pico da temporada pós-monção, entre julho até setembro naquele país. Moozhipurathe e Kraft (2021) também relatam através de outros estudos que a vitamina D e sua fonte primária, a radiação ultravioleta-B (UVB), desempenham um papel protetor na mitigação de mortes por COVID-19, pois é afetada diretamente pela nebulosidade nessa região.

No caso do Sistema de Monção da América do Sul (SMAS), não há a reversão completa dos ventos em baixos níveis como no Sistema de Monção Asiático (CALEY *et al.*, 2014). Portanto, não se considerava a existência de um sistema de monção na América do Sul, pois se acreditava que o continente por ser muito estreito nas regiões subtropicais limitaria a área de formação de uma alta fria estacionária e de uma baixa térmica e por causa ainda da ressurgência persistente das águas frias do Oceano Pacífico Sul na costa oeste do continente, que mantém a temperatura da superfície do mar (TSM) menor do que a temperatura do ar na superfície do continente durante todo ano (GAN *et al.*, 2016).

Porém, a interpretação começou a mudar no final dos anos 90 com o trabalho de Zhou e Lau (1998), os autores analisaram a evolução sazonal de muitas das características da circulação atmosférica da América do Sul e concluíram que o desenvolvimento do SMAS se iniciava durante a primavera.

Desta forma, uma convecção intensa começa a ser ampliada primeiramente sobre o noroeste da bacia Amazônica no mês de setembro e em seguida se desloca para o sudeste do Brasil, a intensidade máxima de chuvas ocorre nos meses de verão e a fase de enfraquecimento da monção se inicia no final do verão quando a convecção intensa muda gradualmente para o Equador, em relação ao hemisfério Sul (KOUSKY, 1988).

Sifeddine *et al.* (2015) relataram que é necessário se obter um conhecimento aprofundado da amplitude, extensão geográfica e velocidade de ocorrência de mudanças

climáticas, principalmente quando se considera os impactos socioeconômicos e a vulnerabilidade da população aos desastres naturais e de saúde de origem climática associadas a essa mudança, como ocorre no SMAS.

### 1.1. OBJETIVOS

O objetivo principal do presente trabalho é analisar as possíveis mudanças no ciclo anual de precipitação na região do SMAS, assim como na distribuição espacial da temperatura do ar próximo à superfície, já no período histórico, a partir da climatologia de um passado recente e do clima corrente. Além disso, investigar também as mudanças projetadas na precipitação e na temperatura do ar para o final do século XXI a partir de dois modelos globais, porém com ênfase em diferentes fatores do sistema climático, considerando-se um cenário sem estabilização das forçantes radiativas. Para isso, o corrente estudo foi dividido em duas partes, da seguinte forma:

- a) A primeira avaliou o SMAS no passado recente (de janeiro 1955 até dezembro de 1984) e no clima corrente (janeiro de 1985 até dezembro de 2014), através de análises das seguintes variáveis: temperatura, precipitação e evapotranspiração. As variáveis em questão foram obtidas de análises com base nas observações de precipitação e temperatura do ar a 2 metros provenientes da *University Of Delaware* (UDEL; Willmott e Matsuura, 2001) e as análises de precipitação e densidade das observações do *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC; Schneider *et al.*, 2017). Além disso, análises da precipitação também foram obtidas da reanálise global, *ERA5, Version5* (ERA5; Hersbach *et al.*, 2020).
- b) Na segunda parte, investigou-se a mudança projetada para o SMAS através das projeções climáticas dos seguintes modelos globais do *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL): o modelo climático acoplado, *Global Climate Model* (CM4; Held *et al.*, 2019) e do sistema terrestre, *Earth System, version 4* (ESM4; Dunne *et al.*, 2020) que integram o *Coupled Model Intercomparison Project, Phase 6* (CMIP6). No estudo proposto, os modelos climáticos do GFDL utilizarão o mesmo período do clima corrente que foram analisados na primeira

parte do estudo e do final do século XXI (janeiro de 2071 até dezembro de 2100), sendo o último período utilizando o cenário mais severo entre os do CMIP6. Também será avaliada a habilidade do CM4 e do ESM4 em representar os principais padrões (hidro)climáticos pertinentes ao SMAS, neste caso no clima corrente, através dos mesmos produtos utilizados na primeira fase.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A monção é um dos principais sistemas de circulação atmosférica nas áreas continentais da região tropical, responsável por grandes acumulados de precipitação na sua fase ativa (CHEN *et al.*, 2003 e WEBSTER *et al.*, 1998). A monção pode também ser classificada de duas formas, como marítima e continental. A Monção Marítima é caracterizada por ventos que vão do oceano para o continente e provocam fortes chuvas, podendo causar enchentes e inundações, já a Monção Continental, pelos ventos do continente para o oceano provocando secas, sendo descritas também como monção de verão (Marítima) e de inverno (Continental) (MENDES; SOARES, 2004).

De acordo com Ramage (1971), apenas eram utilizados os seguintes critérios para a classificação da monção: todos os pontos na área considerada de janeiro até julho deveriam apresentar uma mudança da direção do vento de ao menos 120°, e a frequência do mesmo deveria ser maior que 40%, sendo que a média do vento final em pelo menos um dos meses deveria exceder 3 m/s e, finalmente, deveria haver uma alternância da circulação ciclone-anticiclone ocorrendo de dois em dois anos em ambos os meses em uma região de 5° de latitude/longitude.

Dessa forma, segundo Ramage (1971), não seria possível a detecção do SMAS. No entanto, Gan *et al.* (2004) verificaram a existência de uma reversão do vento zonal em toda troposfera entre a estação chuvosa e a estação seca na América do Sul.

Geralmente muitos desses eventos estão relacionados às interações entre o oceano e a atmosfera, principalmente sobre a região do Oceano Pacífico Tropical resultando no aparecimento natural do El Niño-Oscilação Sul (ENOS; TRENBERTH, 1997). Essa forçante de grande escala pode afetar a circulação na região tropical da América do Sul e contribuir para que a estação chuvosa se inicie ou termine mais cedo ou ainda que sofra algum tipo de atraso, favorecendo para que a estação chuvosa tenha uma precipitação acima ou abaixo do normal (CALEY *et al.*, 2014).

No estudo de Correia *et al.* (2021) foram analisados diversos métodos para estimar o início e o fim do SMAS, avaliados no período de 1979-2018. Os resultados foram obtidos em relação a precipitação principalmente, tendo como resultado a demonstração de um atraso no início do SMAS, portando indicando que ocorre uma diminuição no seu período ativo e o

alongamento consistente da estação seca dependem principalmente de variações na fase de início do SMAS, como já observado em estudos anteriores.

Portanto a avaliação dos impactos regionais e locais das mudanças climáticas nas chuvas e nos padrões de fluxo é frequentemente desafiador, porém necessário, já que a maioria dos resultados tende a ser muito disperso e inconsistente entre os modelos. Com isso reforçando a necessidade de um estudo mais aprofundado da análise por meio de modelos como é o caso de modelos do CMIP, pois como exemplo os modelos do CMIP5 já previam de forma consistente um fortalecimento e deslocamento do SMAS (ARTEGA; LIMA, 2020).

Comprovando a viabilidade da avaliação por meio de modelos do CMIP, o estudo de Wang *et al.* (2021) demonstra que os modelos do CMIP6 simulam melhor a intensidade das monções globais e precipitação do que os modelos do CMIP5, mas persistem ainda com incerteza em relação aos aerossóis, porém há grande confiança de que a frequência e a intensidade dos eventos de chuvas extremas das monções aumentarão, juntamente com um risco crescente de seca em algumas regiões e a projeção condiz com uma monção mais encurtada no Hemisfério Sul devido ao início tardio.

Já o estudo de Zhou *et al.* (2020) aponta para aumentos significativos na precipitação extrema em associação com o aquecimento global nas regiões da monção global, com chuvas e recursos de água doce de extrema importância para dois terços da população mundial. Porém, segundo os autores, determinar de fato se a precipitação extrema mudou significativamente, particularmente em associação com o aquecimento global, ainda carecem de mais estudos, pois a incerteza nos resultados quantitativos decorrentes das coberturas espaciais e temporais limitadas e do uso de diferentes conjuntos de dados merece atenção.

O transporte de umidade atmosférica do Atlântico para o continente sul-americano, foi investigado em relação aos impactos do desmatamento na circulação da Monção da América do Sul com foco particular em um feedback positivo anteriormente negligenciado, os resultados acabaram por indicar a existência de um ponto de inflexão, que causaria uma redução na precipitação de até 40% em partes não desmatadas na América do Sul (BOERS *et al.*, 2017).

CUI *et al.* (2020) caracterizam a monção global como transições bem diferenciadas entre estações secas e úmidas, o que afeta a segurança alimentar de dois terços da população mundial com o aumento do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) atmosférico que influencia o ciclo hidrológico terrestre através das forçantes climáticas e fisiológicas. Os autores utilizaram

Modelos do Sistema Terrestre para reforçar que em um clima enriquecido com CO<sub>2</sub>, os feedbacks da vegetação acabam por afetar de forma acentuada a precipitação anual, especialmente nas regiões das monções da América do Norte, América do Sul e Austrália. Além disso, concluíram que na estação seca, o escoamento aumenta sobre a maioria das regiões de monção, devido a reduções na evapotranspiração devido ao fechamento estomatal dos organismos vegetais e às mudanças associadas à circulação atmosférica.

O estudo de Marengo *et al.* (2012) revisa o progresso na compreensão do funcionamento e da variabilidade do SMAS em escalas de tempo que variam de sinótica a variabilidade de longo prazo e mudanças climáticas. Os autores enfatizam que grupos e projetos internacionais chegaram à constatação, através de uma avaliação das interações atmosfera-superfície terrestre, que as mudanças no uso da terra e os aerossóis da queima de biomassa são considerados como fontes de variabilidade e mudança no funcionamento, características e comportamento do SMAS.

Grimm e Saboia (2015) realizaram uma análise para a primavera e o verão austral, utilizando um conjunto abrangente de dados das duas estações do ano para o período 1950-2000. Os modos de variabilidade climática apresentados foram considerados robustos e consistentes com estudos anteriores em escala regional, estes com modos obtidos a partir de séries de tempo mais longas em domínios menores, com isso os autores descobriram que há relações significativas entre a variabilidade interdecadal na primavera e no verão, indicando influências locais e remotas no SMAS.

Santamas *et al.* (2021) identificaram a variabilidade (hidro)climatológica no Sistema Lagunas de Vilama na Argentina e sua resposta às forçantes climáticas. Os resultados revelaram que a precipitação do verão e do outono austral controlam a variabilidade sazonal das superfícies dos lagos, sendo um estudo que fornece novos índices que se mostraram bons indicadores da variabilidade na hidroclimatologia da América do Sul, e que o SMAS controla a variabilidade regional da precipitação.

O dipolo de precipitação entre o sudeste da América do Sul e o sudeste do Brasil é considerado o modo dominante da variabilidade intrasazonal associada ao SMAS e, portanto, é socioeconomicamente relevante já que influencia a precipitação de áreas densamente povoadas e de grande importância para o abastecimento alimentar regional. Estudos anteriores usando análise de componentes principais ou redes complexas foram capazes de descrever e

caracterizar esse padrão de variabilidade, mas questões cruciais sobre o mecanismo físico responsável permanecem em aberto (GELBRECHT; BOERS; KURTHS, 2018).

O estudo de Boers *et al.* (2014) analisa as propriedades dinâmicas de eventos extremos de chuva associados ao dipolo caracterizado pelo SMAS combinando uma medida de sincronização não linear com redes complexas. Tal estudo trouxe evidências de que a influência das ondas de Rossby que causam sistemas frontais sobre a América do Sul afetam os padrões de circulação em larga escala e se estende além do equador.

## 2.1 O SISTEMA DA MONÇÃO DA AMÉRICA DO SUL (SMAS)

O aquecimento diferencial entre a terra e o oceano favorece a liberação de calor na atmosfera, contribuindo para determinar a evolução, força e distribuição espacial de monções em grande escala. Segundo Bombardi e Carvalho (2007), diversos estudos descrevem o papel dos processos físicos de superfície que atuam na estrutura e na evolução do SMAS, com ênfase no comportamento da precipitação, explorando os processos biofísicos da vegetação.

Portanto é importante investigar o impacto dos processos físicos associados também a hidrologia de superfície, tanto na modulação quanto na circulação do SMAS. Yongkang *et al.* (2006) discutiram que até o momento de publicação do estudo nenhuma análise foi feita dos impactos da desertificação no âmbito da SMAS e, portanto, o estudo deles forneceu uma estrutura útil para a compreensão da circulação da América do Sul e contribuiu para uma avaliação do provável impacto que o desmatamento teria no processo de desertificação.

Já o estudo de Cheng *et al.* (2021) propõe uma estrutura para conciliar diferentes comportamentos da evolução de registros de monção, auxiliando sobre o mecanismo de condução da evolução da monção e feedback do ecossistema nela, com implicações para as mudanças climáticas em outras regiões de alta sensibilidade ao clima em todo o globo.

Segundo Raia *et al.* (2008), o ciclo de vida do SMAS desempenha um papel importante na distribuição e duração da estação chuvosa, principalmente no sudoeste da Amazônia e nas regiões centro-oeste e sudeste do Brasil, e pode afetar a economia de forma direta, gerando impactos nos setores de agricultura e de hidrologia relacionados a chuva e a falta dela. Os autores exemplificam que há um novo critério que ajuda a identificar tanto o início, como o fim do SMAS que leva em conta tanto o fluxo de umidade atmosférica sobre

uma área reconhecida como o núcleo da monção por meio da reversão zonal do vento, como as mudanças na umidade das estações de transição para as estações do verão e do inverno.

O estudo de Marengo *et al.* (2008) analisa o avanço atual sobre a compreensão e a variabilidade do SMAS em escalas temporais que variam de sinótica a alterações de longo prazo e ainda maiores como as mudanças climáticas, apresentando uma forte variabilidade sazonal em uma região situada entre a Amazônia e a bacia do Prata. O artigo exemplifica que o progresso em relação a esse tipo de estudo é devido a programas internacionais complementares, como o Experimento de Grande Escala da Biosfera Atmosfera na bacia Amazônica (LBA) e o Projeto da Bacia do Prata, que é um projeto de Hidroclima Regional que inclui uma rede de estudos entre a Europa e a América do Sul para estimativas de mudanças climáticas e impactos na bacia Platina.

O SMAS representa uma função importante na duração da estação chuvosa em áreas da América do Sul, podendo afetar a economia por meio de impactos na agricultura, gestão de energia e recursos hídricos. Por isso, a previsão de modelos numéricos do início e fim do SMAS, e das características atmosféricas relacionadas é uma ferramenta a ser utilizada na formulação de políticas públicas de gestão daqueles setores. Segundo Raia e Cavalcanti (2008), esta informação ainda está em falta nas previsões sazonais, e os autores examinaram os resultados de uma simulação climática, utilizando o modelo numérico de circulação geral do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), o que serviu para verificar sua capacidade de simular o início até o fim do SMAS, bem como as características atmosféricas associadas.

São padrões de circulação na alta troposfera associados ao verão na América do Sul e a fase ativa do SMAS, um anticiclone com núcleo de alta pressão na região que compreende Bolívia e, portanto, conhecido como Alta da Bolívia (AB), assim como uma região de pressão atmosférica relativamente baixa nas proximidades da costa do Nordeste, denominado Cavado do Nordeste (CN), frequentemente associado às frentes (GAN; KOUSKY, 1986).

Nos baixos níveis da troposfera, encontramos a Baixa do Chaco (BCH), que corresponde a um sistema de baixa pressão que se forma entre a bacia amazônica e o norte da Argentina nos meses chuvosos. Também um sistema que concorre para a variabilidade da precipitação da América do Sul, a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) é marcada na circulação dos níveis inferiores. ASAS interage com o oceano

provocando o resfriamento da atmosfera durante todo o ano, sendo menos intensa no verão e compreende uma área onde não se encontra nebulosidade (KALNAY *et al.*, 1996).

Segundo Hastenrath e Heller (1977), a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é um sistema meteorológico, que se situa nos trópicos, sendo parte da circulação geral da atmosfera, tendo uma grande área de instabilidade e ocorrendo nela a formação de nuvens convectivas na região equatorial. Já a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é um dos sistemas meteorológicos que ocorrem frequentemente no verão da América do Sul, que traz grande nebulosidade e precipitação (frequente e volumosa) a partir da Amazônia, atravessando o centro-oeste e o sudeste do Brasil (QUADROS *et al.*, 2012).

A Figura 1 apresenta a média mensal do produto *Satellite-enhanced Regional Downscaling for Applied Studies* (SRDAS; Nunes, 2016) de 20 anos (disponível de janeiro de 1998 a dezembro de 2017) para um mês de verão (janeiro) e de inverno (julho) no Hemisfério Sul, onde são observados padrões de circulação típicos do período chuvoso e seco associados ao SMAS, a partir das linhas de corrente nos níveis isobáricos de 200 e 925 hPa, que correspondem aos níveis inferior e superior troposfera, respectivamente. As linhas de corrente são tangentes ao vetor velocidade do vento (horizontal) médio. Também estão representadas na Figura 1, a precipitação média mensal em taxas diárias (mm/dia) e pressão ao nível médio do mar (PNMM em hPa), ambas têm seus valores definidos pela barra de cores, no caso da PNMM apenas os dois últimos dígitos.

A Figura 1a, c apresenta o padrão sazonal do SMAS relativo ao período quente e chuvoso, representado aqui por janeiro, embora a fase ativa (ou chuvosa) do SMAS tenha em média seu início em outubro e se estenda até abril, como discutido em Rao *et al.* (2014). Já o seu período seco, se inicia em junho e vai até meados de setembro, sendo representado na Figura 1b-d pelo mês de julho.

Na Figura 1a, observam-se os padrões de circulação (representados pelas linhas de corrente) ao nível de 200 hPa e da precipitação, ambos presentes na fase chuvosa do SMAS visto na extensa área continental com valores elevados de precipitação média. Destacam-se os padrões de circulação anticiclônica e ciclônica de verão, AB e CN, respectivamente. Observa-se também uma faixa de precipitação que se estende diagonalmente da Amazônia até a bacia oeste do Atlântico Sul, aqui associada à ZCAS. Também é detectada, através do padrão de precipitação, a presença da ZCIT que no verão está se deslocando para o sul. Na Figura 1b, AB, CN e ZCAS não estão presentes no mês de julho (inverno austral), e a ZCIT apresenta-se

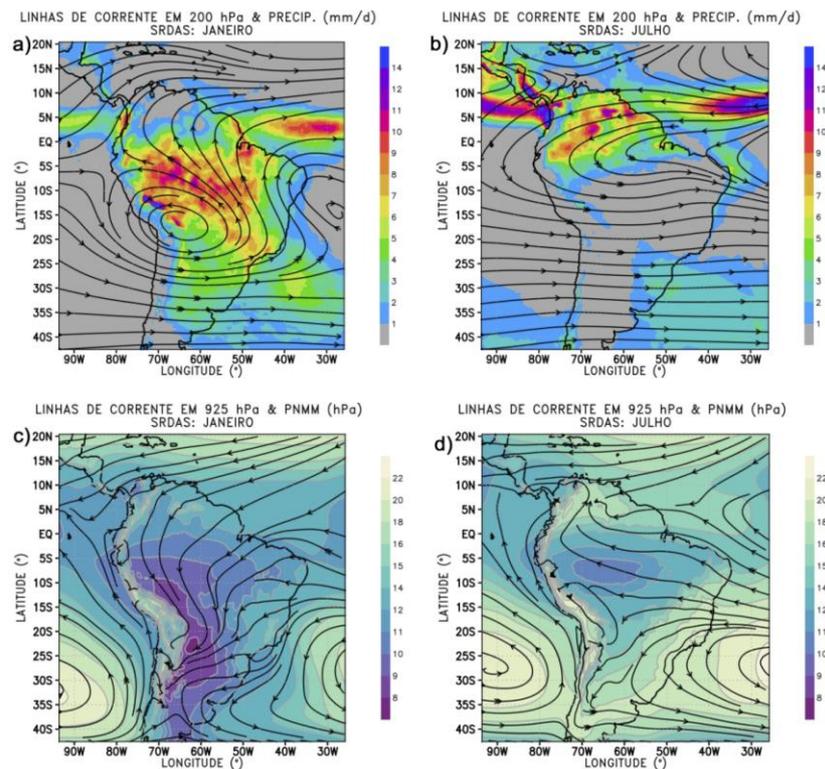
em deslocamento para o norte. O padrão da precipitação muda de modo significativo em julho, com uma extensa área de precipitação bastante reduzida na região central da América do Sul, como se vê na Figura 1b, que coincide com a área do SMAS, sendo os valores elevados de precipitação confinados ao extremo norte da América do Sul.

Um padrão de verão encontrado nos níveis próximos da superfície, BCH está representada na Figura 1c por uma área de pressão relativamente menor a partir da Amazônia até Argentina, a leste dos Andes na região do Chaco, com um núcleo de baixa pressão localizado em 20°–25° S e 60°–65° W. ASAS também está representada na Figura 1c, porém com intensidade menor no verão.

Na Figura 1d, em julho, uma região com PNMM relativamente menor está confinada a uma área central da Amazônia. As linhas de corrente e as áreas sombreadas indicam a intensificação da ASAS no inverno.

Presentes ao longo do ano, os anticiclones subtropicais do Atlântico e Pacífico Sul (ASAS e PSAS, respectivamente) são vistos na Figura 1c-d, porém também é observada a variação sazonal de intensidade e posicionamento de ambos, o que afeta sazonalmente a precipitação no continente.

**Figura 1:** Esquema do SMAS para meses de verão e inverno no Hemisfério Sul.



Fonte: Nunes et al. (2021).

## 2.2. PROJETO DE INTERCOMPARAÇÃO DE MODELOS ACOPLADOS (CMIP)

O CMIP é organizado no âmbito do *World Climate Research Programme* (WCRP). Sendo um experimento que define padrões e específicos protocolos experimentais, em que os resultados do clima são analisados coletivamente o que contribui para melhores projeções climáticas.

Os modelos do CMIP também são fundamentais para avaliações climáticas internacionais, como relatórios de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), que atualmente tem o CMIP como o projeto mais importante desse tipo de avaliação (MEEHL *et al.*, 2005), objetivando produzir experimentos, com o auxílio de modelos, que forneçam estimativas das mudanças climáticas, assim como permitam avaliações de desempenho dos modelos durante o período histórico, e quantificações das

causas da propagação em projeções futuras, a partir de variáveis específicas para uma base de comparação e para o diagnóstico das causas das diferenças entre eles (MIGUEL *et al.*, 2019).

As simulações do CMIP tiveram sua criação entre os líderes em modelagem, sendo eles a Europa, o Japão e os Estados Unidos da América, naquela época ainda não incluíam países do Hemisfério Sul. Em 2013, o Brasil fez sua contribuição para o CMIP5 (experimento anterior ao CMIP6), sendo à primeira vez que um país da América do Sul submeteu resultados de modelagem climática global a um projeto CMIP. As longas integrações climáticas do período histórico seguindo o protocolo do CMIP5 foram realizadas por pesquisadores afiliados ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) envolvidos no projeto nacional de desenvolvimento do Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (BESM) (VEIGA *et al.*, 2019).

Assim como nas fases antecessoras, a sexta fase do CMIP, denominada CMIP6, exige que cada grupo de modelagem execute seu modelo utilizando um conjunto específico de parâmetros, como temperatura, média mensal da superfície do mar, distribuição de gelo marinho etc., que ajudam a entender melhor diversos fenômenos, como é o caso do SMAS. No CMIP6, houve algumas melhorias, entre elas: os diversos modelos poderão ser executados em resoluções mais altas ou foram incluídos processos adicionais que não foram simulados nos modelos anteriores e novas ferramentas permitem que os pesquisadores possam analisar melhor os dados de forma separada e ainda contribuindo para o estudo em grupo (WCRP, 2021).

Segundo Yin *et al.* (2013), a chuva sobre a Amazônia não foi bem representada nos modelos do CMIP, fase 3 (CMIP3). O estudo deles também investigou se o problema persistiu nos modelos do CMIP5 e, em caso afirmativo, o que causaria esse erro. A avaliação de simulações históricas demonstrou que alguns modelos ainda não representam adequadamente as chuvas na região Amazônica. Portanto durante a estação seca, tanto a precipitação convectiva quanto a de grande escala foram subestimadas na maioria dos modelos do CMIP5.

### 2.3. CENÁRIOS DO PROJETO DE INTERCOMPARAÇÃO DE MODELOS

Como uma forma de caracterização dos riscos sociais e climatológicos, visando ações de mudança, os cenários do Projeto de Intercomparação de Modelos, em inglês, *Scenario Model Intercomparison Project* (ScenarioMIP), é uma das principais atividades dentro do CMIP6, que fornece as forçantes climáticas com base em cenários alternativos mais amplos de futuras emissões e de mudanças na superfície que visam facilitar estudos de modelagem para uma avaliação integrada de impactos, adequação e vulnerabilidade aos riscos, formando uma importante estrutura para a próxima avaliação do IPCC (O'NEILL *et al.*, 2016).

As projeções climáticas no CMIP6 são diferenciadas daquelas do CMIP5, pois não apenas são produzidas com versões atualizadas dos modelos climáticos, mas também são forçadas por cenários baseados nos *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs). Os SSPs são produzidos com versões atualizadas do *Integrated Assessment Modeling Consortium* (IAM) e com apoio em dados atualizados sobre tendências recentes de emissões (O'NEILL *et al.*, 2016).

Ao contrário do CMIP3 e CMIP5, onde as projeções dos modelos climáticos faziam parte dos experimentos centrais, no CMIP6, os cenários compreendem parte de um dedicado projeto endossado pelo CMIP6, sendo o cenário extremo (SSP5-8.5) utilizado no presente estudo. O CMIP6-SSP5-8.5 (doravante, SSP585) representa o limite superior do intervalo das trajetórias futuras no IAM e, da mesma forma que o CMIP5-RCP8.5, é o único cenário com emissões altas e suficientes para produzir uma forçante radiativa de  $8,5 \text{ W.m}^{-2}$  em 2100 (O'NEILL *et al.*, 2016).

### 2.4. PROJEÇÕES CLIMÁTICAS E SMAS

Segundo Zhou *et al.* (2020) as projeções climáticas estão subjugadas a uma grande incerteza decorrente da variabilidade do clima, pois incertezas do modelo e incertezas do cenário podem gerar algumas dúvidas sobre a confiabilidade de seu uso. Portanto compreender as fontes de incerteza é fundamental para estreitar elas nas projeções, promovendo mais projeções climáticas futuras confiáveis, necessárias para a tomada de

decisões. Os autores focaram tanto no estado médio quanto nas mudanças extremas de precipitação no domínio global das monções terrestres, incluindo o SMAS.

No meio rural, o período chuvoso da monção é importante para os agricultores que necessitam da chuva para tornar o terreno propício ao cultivo, no entanto em áreas urbanas, os grandes volumes pluviométricos que podem ocorrer durante tal período podem trazer problemas, pois provocam inundações e perdas humanas, principalmente entre a população mais pobre, que habita áreas de risco nos grandes centros urbanos (CUI *et al.*, 2020).

Cerca de um bilhão de pessoas dependem de monções sazonais para suprir suas necessidades de água. Estudos indicam que uma elevação de temperatura pode acarretar seca e, portanto, na falta de água para bilhões de pessoas. As consequências previstas para o aumento de 3 °C na temperatura global, provocaria períodos de seca, podendo levar a um possível início de esgotamento da floresta Amazônica, elevação do risco de colapso da camada de gelo da Antártida Ocidental e por fim um aumento no risco de mudanças abruptas no mecanismo da monção (MARENGO *et al.*, 2018).

Seth *et al.* (2019) apresentam uma revisão sobre a evolução do sistema de monção global e propõem métodos para identificar como a monção responderá às forçantes externas ao longo do século XXI, por exemplo, através de projeções climáticas consistentes com os indícios paleoclimáticos e as tendências observadas no período histórico. Como uma primeira avaliação, os autores concluem que a monção Africana e a Asiática apresentariam uma expansão e tornar-se-iam mais úmidas, enquanto no caso dos sistemas de monção das Américas ainda existe incerteza associada ao comportamento delas no futuro. Dessa forma, a caracterização das monções em décadas passadas pode vir a refinar os conhecimentos em relação à dinâmica da monção do presente e seus impactos futuros.

As interações entre a superfície-solo e a atmosfera são complexas e dependem de diversos fatores, sendo a monção um sistema em que estas interações estão presentes. Algumas áreas se tornariam secas, onde a monção estaria atrasada, e úmidas devido à redistribuição da circulação ou alterações na posição do máximo da banda de precipitação, portanto pesquisas mais abrangentes sobre os efeitos dos processos de superfície-solo-vegetação se fazem necessárias, como no caso do SMAS (YONGKANG *et al.*, 2006).

O aquecimento global e a urbanização contínua ao longo do século XX já causaram um aumento significativo na intensidade e frequência de eventos de chuvas extremas em

todas as regiões de monções. As mudanças observadas na precipitação média das monções variam por região, com variações por década significativas (WANG et al., 2021).

Ainda citando Wang *et al.* (2021), os autores apresentaram os resultados dos modelos do CMIP6 sobre a mudança projetada para precipitação. Os autores relataram que haverá pouca mudança em relação ao que já havia sendo projetado, indicando que no futuro haverá primaveras e invernos mais secos, com o aumento da precipitação ocorrendo mais acentuadamente em períodos ativos da monção, que se tornarão menores na América do Sul.

A redução da duração da fase chuvosa do SMAS projetada para o final do século XXI também foi discutida em Gomes *et al.* (2021), que utilizaram no estudo os modelos do GFDL que fizeram parte do experimento CMIP5.

### 3. DADOS E MÉTODO

A fim de se estudar a variabilidade e o possível impacto das mudanças climáticas no SMAS, o presente estudo utilizará dados observacionais e modelos climáticos globais na avaliação da variabilidade e da mudança na área de interesse do presente estudo situada dentro da região continental que compreende o núcleo do SMAS.

Dessa forma, o presente estudo propõe que uma avaliação da mudança observada, assim como da projetada pelos modelos climáticos globais, CM4 e ESM4, seja realizada através de valores mensais como uma forma de detectar a mudança já observada entre o passado recente e o clima corrente, a projetada para o final do século. Para isso, computou-se a diferença entre a climatologia de três períodos para temperatura e precipitação, e a diferença entre a precipitação e a evapotranspiração de cada período analisado. Realizou-se também uma avaliação dos modelos através das seguintes ferramentas estatísticas: diagrama de Taylor e *boxplots*, referentes a cada um dos meses. A discussão apresentada a seguir utiliza a médias dos 30 anos referentes a cada período de janeiro a dezembro.

A metodologia sugerida para realização das análises e obtenção dos resultados está descrita a seguir, assim como os dados que serão utilizados.

#### 3.1. ÁREA DE ESTUDO

Novello *et al.* (2017) descrevem que nas últimas décadas foi reconhecido que o SMAS, que domina a circulação da estação quente da América do Sul, é caracterizado por intensa precipitação sobre o Brasil central que se estende em direção ao sudeste e, sendo associada à ZCAS. Destaca-se também a ZCIT, que é uma região de nebulosidade de grande desenvolvimento vertical, que estende globalmente e influencia a precipitação do Nordeste do Brasil.

Dessa forma, a área de estudo deste trabalho foi definida com base em Yim *et al.* (2014) que segue uma delimitação proposta a partir de uma região de precipitação associada ao SMAS. Sendo assim, determinou-se uma área de estudo na América do Sul (apenas sobre o continente), sendo denominada, SMAS (Figura 2). A área foi delimitada de forma que contenha um entorno no sul-sudeste da Amazônia indo até o centro do Brasil, e contemplando

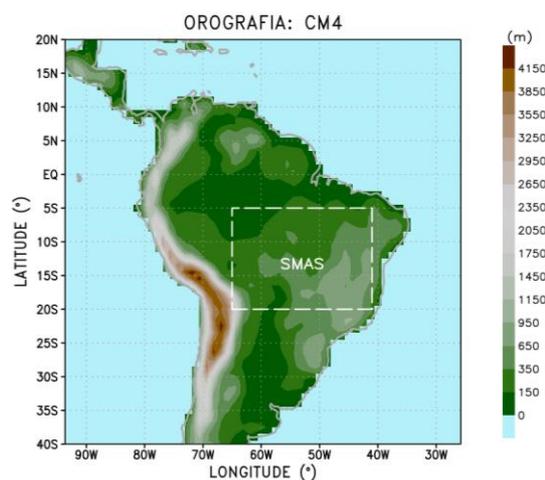
a Região Sudeste. A área (SMAS) está compreendida entre as latitudes 5°S e 20°S e as longitudes 65°W e 41°W na Figura 2.

O primeiro relatório de avaliação nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2013), no seu sumário executivo “*Impacts, Vulnerability and Adaptation to Climate Change*”, indica para as Regiões Norte e Nordeste, que estão parcialmente representadas no SMAS, um aumento progressivo dos danos ao ecossistema e à biodiversidade da Amazônia e de eventos extremos, como chuvas intensas e secas, sendo também projetada uma redução de até 40% na precipitação até 2100.

No Nordeste, a redução projetada para precipitação está entre 40 e 50% até o final do século XXI, com tendência a um aumento na aridez do solo e na evaporação, o que afetaria o armazenamento de água e a agricultura de subsistência.

O SMAS compreende uma boa parte das Regiões Centro-Oeste e Sudeste. Segundo o PBMC, a Região Centro-Oeste sofrerá uma redução na precipitação em torno de 35 a 45% no pantanal e no cerrado, com um aumento da taxa de evaporação e da frequência de ondas de calor até o final do século XXI. No caso da Região Sudeste, o Painel traz em seu primeiro relatório uma projeção de aumento de temperatura na Mata Atlântica, com uma possível perda do habitat para os animais nativos.

**Figura 2:** Área de interesse do estudo na América do Sul. Orografia do modelo GFDL-CM4 em metros representada pela barra de cores. SMAS delimitado por um retângulo tracejado.



Fonte: Próprio autor.

### 3.2. MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS

Serão utilizadas as saídas de dois dos modelos climáticos do CMIP6, os quais fornecerão variáveis específicas em um formato padrão, criando uma base para a intercomparação de desempenho dos modelos e apontando as diferenças na representação do SMAS.

A Tabela 1 descreve os modelos climáticos desenvolvidos no GFDL que serão utilizados na pesquisa proposta e que também fazem parte do grupo de modelos climáticos globais do CMIP6 (GUO *et al.*, 2018).

Os principais modelos utilizados no presente estudo são: o Modelo Climático Global 4 (CM4) que é um modelo acoplado constituído pelos seguintes componentes: o Modelo Atmosférico (AM4), o Modelo Oceânico (OM4) e o Modelo Superfície-Solo (LM4). O AM4 conta com uma resolução de aproximadamente 1° e 33 níveis verticais, sendo possível simular aerossóis. O OM4 apresenta uma resolução horizontal de 0,25°, com 75 níveis verticais de uma coordenada híbrida. O LM4 conta com vegetação dinâmica. Uma melhoria observada no sistema acoplado descrito acima e representado pelo CM4 é que produz uma simulação mais apurada da climatologia atual e da variabilidade do ENOS em comparação ao CM3 (HELD *et al.*, 2019).

Também será utilizado o modelo do Sistema Terrestre (ESM4), que tem como base os modelos AM4.0, OM4e LM4.1, além de outras componentes. Assim como o CM4, o ESM4 conta com os modelos oceânico, atmosférico e de solo atualizados. O AM4.0 tem resolução horizontal de 1° e 49 níveis verticais em que a química e os aerossóis abrangentes e interativos estão representados, o que leva em conta o efeito indireto das emissões e, portanto, com mais níveis verticais do que o AM4 do CM4. OM4 é a componente oceânica do ESM4 e tem como base a sexta versão do modelo oceânico modular (MOM6; GRIFFIES *et al.* 2020), com resolução horizontal de 0,5° e 75 níveis verticais, usando a coordenada vertical híbrida pressão-isopícnica. AM4 é acoplado ao modelo de superfície, LM4.1, que possui um novo modelo de dinâmica de vegetação com tratamento explícito do desenvolvimento da planta, estrutura da altura e microrganismos de solo, e inclui a porcentagem de fogo, plantações e pastagens (DUNNE *et al.*, 2020).

**Tabela 1:** Modelos Climáticos do GFDL

Modelo Referência	Resolução Horizontal Latitude x Longitude no. de pontos	Componente Atmosférica		Componente Oceânica	Componente Superfície	
		AM4	AM4.0	OM4	LM4	LM4.1
<b>CM4</b> Held <i>et al.</i> (2019)	180 x 288	X		X	X	
<b>ESM4</b> Dunne <i>et al.</i> (2020)	180 x 288		X	X		X

Fonte: Próprio autor

### 3.3. DADOS UTILIZADOS

Foram utilizadas três fontes de dados nas análises do clima no passado recente e corrente, e na verificação da habilidade dos modelos climáticos globais em reproduzir o clima corrente. Especificamente, os produtos com base nas observações são UDEL, GPCC e a reanálise global ERA5. Os dois produtos e a reanálise se encontram sumarizados na Tabela 2.

Os dados de precipitação e de temperatura do ar a 2 metros que serão utilizados têm como base as observações de superfície dos registros disponíveis. No entanto, é importante que esses registros sejam contínuos no tempo, contemplando os dois períodos considerados para que seja feita uma avaliação da mudança observada na climatologia corrente da precipitação na região do SMAS.

Duas das principais componentes do ciclo hidrológico na superfície são no presente estudo avaliadas conjuntamente sobre a região do SMAS e as áreas continentais vizinhas, inclusive sobre os oceanos adjacentes, são elas: a precipitação e a evaporação, sendo esta última denominada evapotranspiração na região continental, sendo definida como a soma da evaporação direta da água no solo, da interceptada pelo dossel e da transpiração da vegetação. A diferença entre a precipitação e a evaporação (P-E) é investigada nos climas corrente e do final século XXI, sendo que os valores positivos (negativos) indicam um aumento (uma redução) na disponibilidade de água para solo.

**Tabela 2:** Reanálise e produtos com base nas observações

Produto	Resolução Horizontal	Período Disponível	Referência
UDEL	0,50°× 0,50°	1900–2017	Willmott e Matsuura (2001)
GPCC	0,50°×0,50°	1891–2016	Schneider <i>et al.</i> (2011)
ERA5	0,28°× 0,28°	1959 até o presente	Hersbach <i>et al.</i> (2020)

Fonte: Próprio autor

a) UDEL

Os produtos de observação provenientes do UDEL são gerados através de estudos da Universidade de Delaware onde pesquisadores reuniram dados de médias mensais de temperatura do ar (°C) e acumulados mensais precipitação (cm) provenientes de estações de superfície distribuídas globalmente, gerando uma série temporal de mais de 100 anos (WILLMOTT; MATSUURA, 2001), aqui identificada como UDEL, versão 5.01. É um produto amplamente utilizado em avaliações da habilidade dos modelos numéricos atmosféricos em representar os campos mensais de precipitação, como no *North American Regional Climate Change Assessment Program* (NARCCAP). NARCCAP é um programa internacional que investiga incertezas das mudanças climáticas em escala regional através de respostas combinadas ou individuais de modelos climáticos regionais empregados no *downscaling* dinâmico de um conjunto de modelos climáticos globais, além de auxiliar em estudos dos impactos sociais das mudanças climáticas (MEARNS *et al.*, 2012).

b) GPCC

Os dados de precipitação provenientes do GPCC que serão utilizados no presente estudo são análises em grade regular de 0,5°, com base em dados das estações de superfície, versão 2018. O GPCC disponibiliza dois produtos descritos a seguir: (a) o Produto de Reanálise de Dados Completos (1891–2016) é recomendado para estudos de balanço hídrico global e regional, também para calibração e validação de estimativas de precipitação baseadas

em sensoriamento remoto e verificação de modelos numéricos, o qual será utilizado neste estudo (SCHNEIDER *et al.*, 2011), e (b) um segundo que é um conjunto de dados de 50 anos para estudos de tendência e variabilidade climática (SCHNEIDER *et al.*, 2017).

Os produtos não são corrigidos para erros sistemáticos de calibração. No entanto, o GPCC fornece estimativas para esse erro, bem como a densidade dos dados usados na grade. Tendo como pontos fortes, seu grande número de estações; uma rede extensa, porém com algumas limitações, são elas: o número variável de estações por grade ao longo do tempo pode ser uma importante fonte de não homogeneidade e os produtos de monitoramento são atualizados com frequência, mas os produtos climáticos não (SCHNEIDER *et al.*, 2017).

### c) ERA5

O produto ERA5 é uma reanálise global de quinta geração do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) e compreende o período de janeiro de 1959 até o presente, sendo distribuída à comunidade científica através do *Copernicus Climate Change Service*.

ERA5 fornece estimativas horárias de diversos tipos de variáveis atmosféricas, terrestres e oceânicas, disponíveis na resolução horizontal de aproximadamente 30 km, com 137 níveis da superfície até uma altura de 80 km. ERA5 combina uma grande quantidade de observações históricas e estimativas globais em sistemas avançados de modelagem e assimilação de dados (HERSBACH *et al.*, 2020).

Além da temperatura do ar próximo à superfície, o presente estudo também utilizou as seguintes variáveis obtidas da ERA5 e dos modelos CM4 e ESM4: a precipitação total, constituída pela soma da precipitação de grande escala e a convectiva, incluindo neve, e a evaporação total sobre áreas continentais e oceânicas. Especificamente na região continental, a evaporação total é definida como a soma da evaporação direta da água no solo, da interceptada pelo dossel e da transpiração da vegetação e, portanto, denominada evapotranspiração.

### 3.3.1. Interpolação de dados

Por meio da interpolação de dados é possível se realizar aproximações de valores, sendo um método que permite a construção de novos conjuntos de dados a partir de um conjunto inicial, sendo este já conhecido (SOUZA *et al.*, 2011).

No presente estudo, empregam-se dois produtos baseados em observação e uma reanálise, que apresentam pequenas variações, de acordo com seus métodos de controle de qualidade e interpolação que são aplicados aos conjuntos de dados brutos disponíveis, fornecendo uma gama de resultados que permitem avaliar melhor a confiabilidade das saídas dos modelos, sendo eles, especificamente: GPCC, ERA5 e UDEL. Os três produtos são interpolados para corresponder a grade horizontal do CM4 e do ESM4, sendo que ambos possuem a mesma resolução horizontal, usando uma função de interpolação ponderada por latitude do *Grid Analysis and Display System* (GrADS), que é também utilizado na manipulação e visualização de dados meteorológicos e climáticos (Disponível em: <http://cola.gmu.edu/grads/>).

### 3.4. FERRAMENTAS DE ANÁLISE

Como introduzido na seção anterior, foi utilizada a ferramenta computacional GrADS para a manipulação de dados climáticos, assim como outros pacotes gráficos e de tratamento de dados durante o desenvolvimento do presente estudo. O GrADS é uma ferramenta utilizada para promover o acesso, manuseio e visualização de dados meteorológicos, na forma de grade e de estações meteorológicas irregularmente espaçadas, podendo utilizar diversos formatos de arquivo de dados, como, binário, GRIB, NetCDF, HDF e BUFR (COLA, 2018).

Além disso, foi realizada a utilização de estatística descritiva para caracterizar o clima do passado recente, corrente e do final do século XXI, os quais tem a variabilidade interanual e o ciclo anual das variáveis selecionadas graficamente representadas por meio de “*boxplots*” através do programa R-base. Para avaliar a habilidade dos modelos climáticos globais em reproduzir alguns dos padrões mais marcantes da precipitação na América do Sul, nos períodos históricos pré-selecionados, o Diagrama de Taylor (TAYLOR, 2001) foi

utilizado com a ferramenta gráfica para uma comparação entre os modelos e as observações no clima corrente.

#### a) *Grid Analysis and Display System (GrADS)*

O GrADS foi implementado mundialmente em uma variedade de sistemas operacionais comumente utilizados, sendo distribuído gratuitamente pela Internet. Utilizando um ambiente de dados 5-Dimensional, da seguinte forma: as quatro dimensões convencionais, mais uma 5ª dimensão opcional para análise de vários membros, por exemplo de uma previsão por conjunto ou *ensemble*. Os conjuntos de dados são colocados no espaço 5-D, usando um arquivo descritor de dados. O pacote gráfico manipula os dados em grades regulares ou não linearmente espaçadas, gaussianas ou de resolução variável. As operações são executadas de forma interativa, inserindo expressões na linha de comando e utilizando um rico conjunto de funções integradas, sendo que os usuários também podem inserir suas próprias funções (SOUZA, 2004).

Por fim, este pacote gráfico possui uma interface programável que permite uma exibição dos resultados através, por exemplo, de linhas de corrente, vetores, escalares, valores discretos, entre outros formatos. Permite obter médias climatológicas, anomalias, coeficientes de correlação, entre outros parâmetros estatísticos. Dessa forma, executa várias ações com base no que foi determinado pelo usuário (MARTINS, 2014).

Na presente discussão é utilizada uma média climatológica simples obtida a partir da média aritmética (WILKS, 2011) de valores mensais, considerando uma série temporal de 30 anos, definida da seguinte forma:

$$\bar{x}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{i,j} , \quad j = 1, 2, 3, \dots, 12. \quad (1)$$

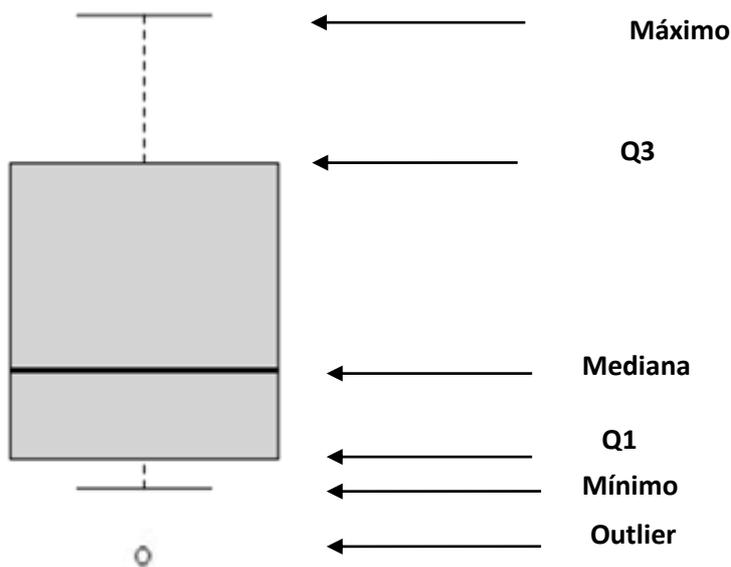
Sendo que  $\bar{x}_j$  representa a média climatológica para um determinado mês, identificado por  $j$ , computada a partir dos valores médios (ou acumulados) mensais da variável “ $x$ ” (por exemplo, precipitação), em que “ $i$ ” representa um dado ano do intervalo considerado, sendo  $N$  (=30) o número total de anos. Nos resultados apresentados na próxima seção,  $j$  assume apenas os valores numéricos correspondentes a cada um dos doze meses do ano.

## b) Diagrama de Caixa (*Boxplot*)

O *boxplot* é um diagrama de caixa, sendo uma ferramenta gráfica para representar a variação de dados observados de uma variável numérica. Pode, por exemplo, ser utilizado para analisar a variabilidade interanual, como no presente estudo. Os *Boxplots* foram processados usando um pacote R para computação estatística (R; R Core Equipe 2018).

O exemplo de um *boxplot* é dado na Figura 3, nele são apresentadas 5 estatísticas: o mínimo, o primeiro quartil (Q1), a mediana ou segundo quartil (Q2), o terceiro quartil (Q3), os valores máximo e mínimo, e os valores discrepantes ou *outliers*. Desta forma para a construção do *boxplot* se desenha um retângulo alinhado verticalmente com duas semirretas, uma em cada um dos lados opostos do retângulo, sua altura é definida pelos quartis Q1 e Q3. Com isso uma linha secciona o retângulo no valor da mediana (ou Q2, percentil 50). As semirretas ligam os quartis Q1(percentil 25) e Q3 (percentil 75) ao valor mínimo e ao máximo do conjunto de dados, respectivamente. Na série considerada, valores discrepantes (*outliers*) inferiores ou superiores são aqueles definidos pela diferença entre Q1 e Q3, ou seja, o intervalo interquartil (IQ), situados abaixo de  $Q1 - 1,5 \cdot IQ$  (Figura 3) ou acima de  $Q3 + 1,5 \cdot IQ$ , respectivamente.

**Figura 3:** Exemplo de Diagrama de Caixa (*Boxplot*).



Fonte: Próprio autor.

### c) Diagrama de Taylor

Neste estudo, o diagrama de Taylor foi utilizado como uma forma gráfica para avaliar a performance dos modelos nas representações dos padrões do clima corrente em relação a precipitação, assim como no estudo de Pereira *et al.* (2014). A construção do diagrama de Taylor se dá pela representação de  $\frac{1}{2}$  ou  $\frac{1}{4}$  de círculo, sendo este último o mais comum e utilizado neste estudo. Os eixos x e y têm as medidas do desvio padrão.

A razão pela qual cada ponto no espaço bidimensional do diagrama de Taylor pode representar três estatísticas diferentes simultaneamente, ou seja, a raiz quadrada do erro quadrático médio centrado (REQMC), a correlação e o desvio padrão, é que essas estatísticas estão relacionadas pela seguinte fórmula, segundo Taylor (2001):

$$E'^2 = \sigma_p^2 + \sigma_r^2 - 2\sigma_p\sigma_r R,$$

em que,

$R$  = coeficiente de correlação entre os campos previstos e a referência;

$E'$  = é o REQMC entre os campos previstos e a referência;

$\sigma_p^2$  a  $\sigma_r^2$  = São as variâncias dos campos previstos e da referência, respectivamente.

Taylor (2001) determina que a construção do diagrama é dada pela correlação do cosseno do ângulo azimutal, sendo baseado na semelhança da equação descrita por ele acima e da Lei dos cossenos:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos\phi.$$

Destaca-se que dado um campo previsto ( $p$ ) e um campo de referência ( $r$ ), as fórmulas para calcular o coeficiente de correlação ( $R$ ), o erro (ou desvio) quadrático médio centrado ( $E'^2$ ) e a variância do campo previsto ( $\sigma_p^2$ ) e o do campo de referência ( $\sigma_r^2$ ) são dadas abaixo como descrito por Taylor (2001):

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (p_n - \bar{p})(r_n - \bar{r})}{\sigma_p \sigma_r},$$

$$E'^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(p_n - \bar{p}) - (r_n - \bar{r})]^2,$$

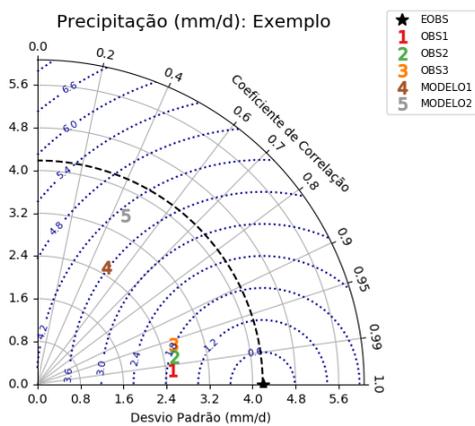
$$\sigma_p^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (p_n - \bar{p})^2,$$

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (r_n - \bar{r})^2.$$

Na Figura 4, considerando a precipitação em milímetros por dia (mm/dia) como a variável analisada, os números (em cores) representam cada uma das observações e dos

modelos, sendo assim se iniciando pelo OBS1, indicado pelo número 1, OBS2, número 2, OBS3, número 3, MODELO1, número 4 e MODELO2, número 5. As curvas pontilhadas em azul indicam REQMC (mm/dia), as curvas sólidas cinzas, o desvio padrão (DP; mm/dia), as linhas sólidas cinzas, o coeficiente de correlação linear (R, adimensional) e a estrela representa o valor de referência, que no exemplo corresponde à média do conjunto das observações (EOBS).

**Figura 4:** Exemplo do Diagrama de Taylor.



Fonte: Próprio autor.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. SÉRIES HISTÓRICAS

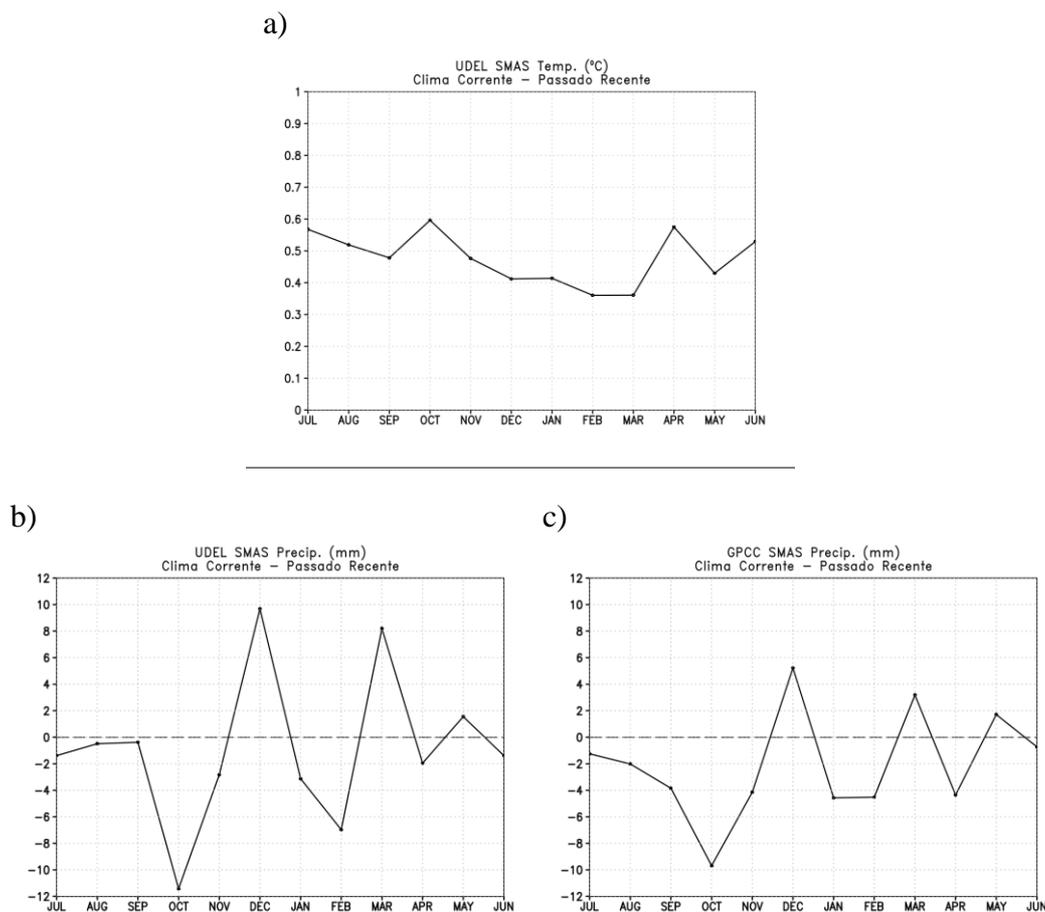
Segundo Yim *et al.* (2014), a área da monção é definida de acordo com o regime de precipitação, e, dessa forma, os autores identificam as monções regionais. Nas regiões sujeitas ao regime de monção ocorrem um forte contraste entre o verão chuvoso e o inverno seco, nas quais a taxa de precipitação é superior a 2 mm/dia, sendo o verão caracterizado por uma precipitação que excede 55% do total anual de chuva.

As médias climatológicas mensais da temperatura do ar próximo à superfície (°C) e da precipitação acumulada (mm) do produto UDEL e do GPCC (Figura 5b-c, respectivamente) são utilizadas para computar a diferença entre o clima corrente e o do passado recente em cada mês, sendo as médias mensais relativas aos dois períodos históricos do CMIP6, 1985–2014 e 1955–1984, na região delimitada como SMAS na Figura 2, para os meses de janeiro a dezembro, e na resolução  $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$ .

Na Figura 5a, observa-se que a diferença na temperatura é sempre positiva, portanto, em média, o clima corrente apresenta já um aquecimento em relação ao passado recente durante todo ano na região do SMAS e, em particular, um maior aquecimento é visto em outubro e abril, os quais são geralmente associados com início e o final do período chuvoso (fase ativa) do SMAS (RAO *et al.*, 2014), respectivamente. Ainda na Figura 5a, as menores diferenças são vistas em fevereiro e março, os quais são meses da fase ativa do SMAS. Em relação a diferença na precipitação (Figura 5b-c), um aumento é observado no clima corrente em relação ao passado recente em dezembro e março, sendo a maior de redução foi observada em outubro o que pode indicar um atraso no início da fase ativa do SMAS.

Ressalta-se que os campos das diferenças entre os dois períodos históricos de 30 anos da precipitação acumulada do UDEL (Figura 5b) e do GPCC (Figura 5c) são consistentes quanto ao sinal da mudança, embora, de um modo geral, o GPCC apresente diferenças menores na área SMAS em comparação com aquelas computadas a partir do UDEL.

**Figura 5:** Diferença na climatologia mensal na área do SMAS entre o clima corrente e o passado recente nos meses de janeiro a dezembro para: a) temperatura do ar (°C), (b) precipitação acumulada (mm), ambas provenientes de UDEL, e (c) precipitação acumulada (mm) oriunda do GPCC.



Fonte: Próprio autor.

Na análise realizada com o Diagrama de Taylor (Figura 6), se observa o desempenho dos modelos CM4 e ESM4 e das observações UDEL e ERA5, este último uma reanálise. Neste caso, OBS se refere aos dados correspondentes ao GPCC interpolado para a grade de menor resolução dos modelos CM4 e ESM4, e utilizado com a referência no presente estudo. Sendo uma avaliação da performance dos modelos, utilizar o Diagrama de Taylor para simultaneamente comparar os modelos e as observações com OBS.

Na Figura 6, os números (em cores) representam cada uma das observações e dos modelos, ou seja, UDEL (1), ERA5 (2), CM4 (3) e ESM4 (4), respectivamente. As curvas

pontilhadas em azul indicam o REQMC; as curvas sólidas cinzas, o DP; as linhas sólidas cinzas, o R e a estrela representa o valor de referência, que corresponde ao OBS (GPCC).

Para o mês de janeiro (Figura 6a), UDEL apresentou R de 0,965, enquanto o ERA5 obteve 0,901, já os modelos obtiveram uma menor correlação com o OBS sendo o CM4 com 0,597 e o ESM4, com 0,470. O REQMC está em torno de 0,7 mm/dia para o UDEL e 1,1 mm/dia para o ERA5, enquanto os modelos têm um REQMC de 2,2 mm/d para o CM4 e 2,6 mm/dia para o ESM4. Já variabilidade espacial é dada por meio do DP, que teve seu maior valor registrado em janeiro pelo UDEL (2,639 mm/dia), seguido pelo OBS (2,501 mm/dia) e pelos modelos ESM4 (2,564 mm/dia) e CM4 (2,220 mm/dia), e pela reanálise ERA5 (2,200 mm/dia)

Em fevereiro (Figura 6b), o UDEL, teve a R em relação ao OBS de 0,968, enquanto o ERA5 de 0,930, já os modelos obtiveram novamente uma menor correlação com o OBS e as observações, sendo o CM4 com 0,488 e o ESM4 com 0,447. O REQMC está em torno de 0,6 mm/dia para o UDEL, e 1,0 mm/dia para o ERA5, enquanto os modelos obtiveram um erro de 2,7 mm/dia para o CM4 e 3,3 mm/dia para o ESM4. O DP registrou em fevereiro o valor de 2,521 mm/dia para OBS, tendo o seu maior valor para ERA5 (2,626 mm/dia), seguido por UDEL (2,578 mm/dia). Os modelos apresentaram, para ESM4 e CM4, os valores de 2,564 e 2,543 mm/dia, respectivamente.

Em março (Figura 6c), o UDEL teve o maior valor de R em relação OBS de 0,957, enquanto o ERA5 foi de 0,936, já os modelos tiveram uma menor correlação com o OBS e as observações, sendo o CM4 com 0,660 e o ESM4, com 0,470. O REQMC ficou em torno de 0,7 mm/dia para o UDEL e 0,9 mm/dia para o ERA5, enquanto os modelos tiveram um erro de 2,7 mm/dia para o CM4 e 3,6 mm/dia para o ESM4. O DP registrou os menores valores em março para OBS (2,541 mm/dia), seguido pelas observações UDEL (2,519 mm/dia) e ERA5 (2,268 mm/dia). Os modelos apresentaram maiores desvios, sendo o maior para o ESM4 (4,055 mm/dia), seguido pelo CM4 (3,589 mm/dia).

Em abril (Figura 6d), o UDEL teve novamente o maior valor de R em relação ao OBS de 0,976, enquanto o ERA5 de 0,963, já os modelos têm uma menor correlação com o OBS e as observações, sendo o CM4 com 0,911 e o ESM4, com 0,873. O erro está em torno de 0,5 mm/dia para o UDEL e 0,6 mm/dia para o ERA5, enquanto os modelos apresentaram 1,2 mm/dia para o CM4 e 2,0 mm/dia para o ESM4. O DP registrou em abril para OBS o valor de 2,342 mm/dia e para as observações ERA5 e UDEL, os valores de 2,426 e 2,357

mm/dia, respectivamente. Os modelos apresentaram os maiores desvios, sendo o maior para ESM4 (3,713 mm/dia), seguido pelo o CM4 (2,773 mm/dia).

Para o mês de maio (Figura 6e), o UDEL teve uma correlação em relação ao OBS de 0,970, enquanto o ERA5, 0,961, já os modelos apresentaram os menores valores de R, sendo o CM4 com 0,802 e o ESM4, 0,922. O REQMC ficou em torno de 0,4 mm/dia para o UDEL e 0,5 mm/dia para o ERA5, enquanto os modelos, 1,1 mm/dia para o CM4 e 0,6 mm/dia para o ESM4. Em maio (Figura 6e), DP teve o maior valor para ERA5 (1,731 mm/dia), seguido do UDEL (1,566 mm/dia) e OBS (1,516 mm/dia). O menor valor de DP foi encontrado no CM4 (0,647 mm/dia) o que corresponde a menor variabilidade na área do SMAS, já o ESM4 apresentou o segundo maior valor (1,640 mm/dia) entre todos os campos de precipitação.

Para junho (Figura 6f), o UDEL teve o valor de R de 0,950, enquanto o ERA5 de 0,931, já os modelos tiveram menores valores de correlação com o OBS do que as observações, sendo o CM4, com 0,370 e o ESM4, com 0,682. O erro ficou em torno de 0,2 mm/dia para o UDEL e 0,35 mm/dia para o ERA5, enquanto os modelos tiveram erros de 0,6 mm/dia para o CM4 e 0,5 mm/dia para o ESM4. O DP teve, para junho, para OBS apresentou o valor de 0,681 mm/dia e para a reanálise ERA5, 0,877 mm/dia, e UDEL, 0,730 mm/dia. Os modelos exibiram os menores valores, sendo ESM4 de 0,402 mm/dia e o menor entre todos para CM4 de 0,218 mm/dia.

Observa-se em julho (Figura 6g), que o UDEL teve R de 0,921, enquanto ERA5, 0,943, já os modelos tiveram uma menor correlação com o OBS do que as observações, sendo o CM4 com 0,260 e o ESM4 0,210. O erro ficou em torno de 0,2 mm/dia para o UDEL e para o ERA5, enquanto os modelos apresentaram um REQMC de 0,4 mm/dia para o CM4 e 0,5 mm/dia para o ESM4. O DP teve seu maior valor registrado em julho pelo ERA5 (0,603 mm/dia), seguido pelo UDEL (0,471 mm/dia) e OBS (0,439 mm/dia). Os modelos exibiram os menores valores, sendo 0,238 mm/dia e 0,115 mm/dia para o ESM4 e o CM4, respectivamente.

No caso de agosto (Figura 6h), observou-se que UDEL teve uma correlação em relação ao OBS de 0,930, enquanto o ERA5 de 0,894, já os modelos apresentaram as menores correlações com o OBS, sendo o CM4 com 0,219 e o ESM4 com 0,153. O erro ficou em torno de 0,2 mm/dia para o UDEL e 0,3 mm/dia para o ERA5, enquanto os modelos tiveram um erro de 0,53 mm/dia para o CM4 e 0,54 mm/dia para o ESM4. O DP registrou para agosto para OBS o valor de 0,524 mm/dia, para ERA5, 0,675 mm/dia, e UDEL apresentou o valor de

0,608 mm/dia. Os modelos ESM4 e CM4 apresentaram as menores variabilidades espaciais no mês, com os valores de DP de 0,231 e 0,184 mm/dia, respectivamente.

Para o mês de setembro (Figura 6i), o UDEL apresentou R em relação ao OBS de 0,951, enquanto ERA5 acima de 0.873. Já os modelos apresentaram uma menor correlação com o OBS e as observações, sendo 0,215 e 0,189, para o CM4 e o ESM4, respectivamente. O REQMC ficou em torno de 0,3 mm/dia e 0,6 mm/dia para UDEL e ERA5, respectivamente. Os modelos, CM4 e ESM4, apresentaram o mesmo REQMC de 1,1 mm/dia. O DP teve seu menor valor registrado para setembro pelo OBS (0,524 mm/dia), seguido pelas observações ERA5 (0,675 mm/dia) e UDEL (1,102 mm/dia). Os modelos apresentaram os menores desvios em comparação com OBS e as observações, com 0,349 mm/dia para o CM4 e 0,231 mm/dia para o ESM4.

Para o mês de outubro (Figura 6j), UDEL apresentou uma R em relação ao OBS de 0,959, enquanto ERA5 de 0,904. Porém, os modelos exibiram uma menor correlação com OBS do que as observações, sendo o CM4 com 0,404 e o ESM4 0,365. O erro ficou em torno de 0,5 mm/dia para UDEL e 0,7 mm/dia para ERA5, enquanto os modelos apresentaram o mesmo erro de 1,5 mm/dia para o CM4 e o ESM4. O DP teve o maior valor registrado para outubro pelo OBS (1,626 mm/dia), seguido pela reanálise global ERA5 (1,510 mm/dia) e a observação UDEL (1,431 mm/dia). Mais uma vez os modelos apresentaram os menores desvios, sendo 0,738 mm/dia e 0,776 mm/dia para o CM4 e ESM4, respectivamente.

Observou-se que em novembro (Figura 6l), o UDEL teve uma R em relação ao OBS de 0,937, enquanto ERA5 de 0,900. Os modelos CM4 e ESM4 tiveram as menores correlações com OBS, 0,700 e 0,813, respectivamente. Os erros ficaram em torno de 0,6 mm/dia e 0,7 mm/dia para UDEL e ERA5, enquanto os modelos apresentaram os maiores valores de 1,2 mm/dia e 1,0 mm/dia para o CM4 e o ESM4, respectivamente.

Para o mês de dezembro (Figura 6m), UDEL teve uma R em relação ao OBS de 0,952, enquanto o ERA5 de 0,899. Os modelos exibiram as menores correlações com OBS, sendo o CM4 com 0,700 e o ESM4, 0,722. O REQMC ficou em torno de 0,6 mm/dia para o UDEL e 0,9 mm/dia para o ERA5, enquanto os modelos apresentaram os maiores erros em torno de 1,4 mm/dia para o CM4 e 1,6 mm/dia para o ESM4. O DP apresentou o maior valor no mês de dezembro para OBS (2,214 mm/dia), seguido por UDEL (2,131 mm/dia) e ERA5 (1,851 mm/dia). Os modelos apresentaram desvios de 1,796 mm/dia e 2,155 mm/dia para o CM4 e o ESM4, respectivamente.

Observou-se através do Diagrama de Taylor que os modelos não se aproximam do OBS na maioria dos meses em comparação com as observações, sendo que o CM4 foi o modelo que apresentou o melhor desempenho, correlacionando-se melhor com OBS do que o ESM4 na maioria dos meses. O UDEL apresentou um melhor desempenho entre as observações, sendo a observação que mais se aproximou da referência OBS.

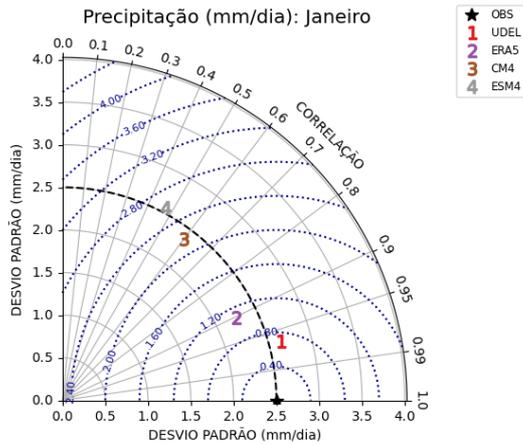
O DP representa a variabilidade espacial das observações e dos modelos na área do SMAS e apresentou, notadamente, os maiores valores para os modelos em fevereiro (ESM4), março e abril, e os menores na primavera e no inverno em relação aos das observações (UDEL e ERA5) e OBS. O REQMC foi maior para os modelos do que para as observações em relação à referência, exceto em setembro em comparação com o UDEL.

OBS apresentou uma variabilidade espacial maior que os modelos na maioria dos meses, o que pode estar associado a diversos fatores. Geralmente, quando ocorre uma correlação maior o REQMC é menor, contudo, o UDEL, que apresentou as maiores correlações com OBS em comparação com ERA5 e os modelos, exibiu em setembro o maior REQMC. Os modelos tiveram os piores desempenhos em comparação com UDEL e ERA5, embora, na maioria dos meses, o CM4 tenha se correlacionado melhor com OBS do que o ESM4.

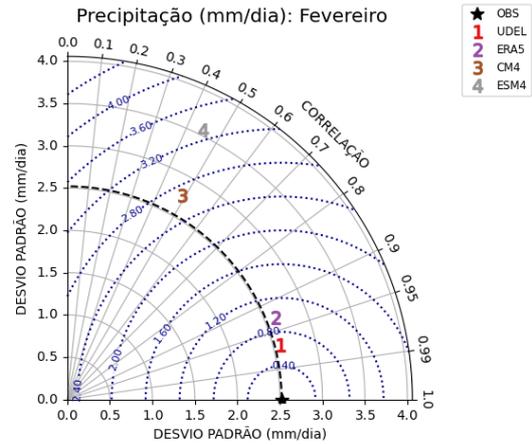
Sumarizando, os padrões espaciais da precipitação foram satisfatoriamente reproduzidos pelos modelos CM4 e ESM4 na região do SMAS. No entanto, o estudo de Albuquerque *et al.* (2018) que analisou diferentes conjuntos de dados globais de precipitação provenientes de três reanálises globais e comparou os padrões de precipitação associados ao SMAS a uma análise com base em dados observados do NOAA/NCEP *Climate Prediction Center* (CPC), indicou que as três reanálises apresentaram algumas dificuldades em simular a distribuição espacial e a intensidade da precipitação observada. Apesar disso, a reanálise de quarta geração do ECMWF, ERA-Interim, foi entre as reanálises globais do estudo a que melhor representou a variabilidade observada na precipitação durante a estação quente e chuvosa austral, sendo que os padrões de divergência associados com cada produto poderiam explicar as diferenças encontradas na precipitação das três reanálises globais na região central do SAMS.

**Figura 6:** Avaliação da precipitação média mensal (mm/dia) dos modelos globais através do Diagrama de Taylor, para os meses de janeiro a dezembro (a-m) na área do SMAS.

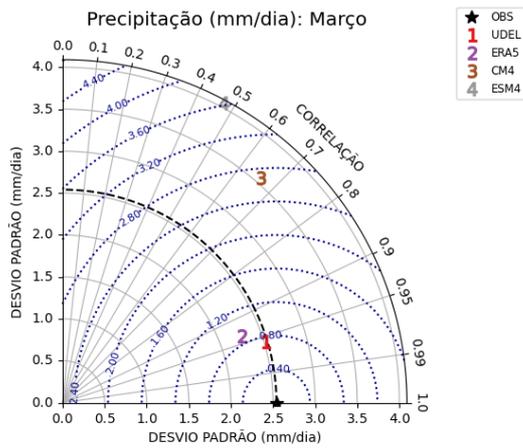
a)



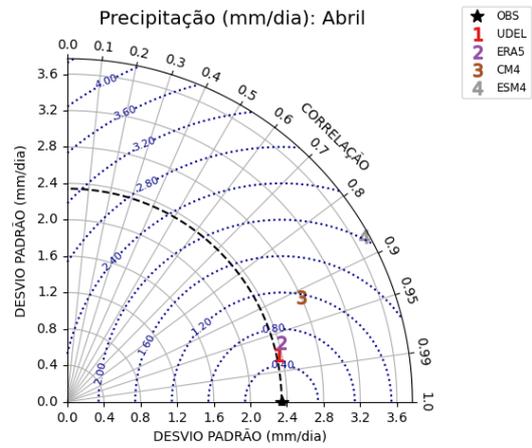
b)



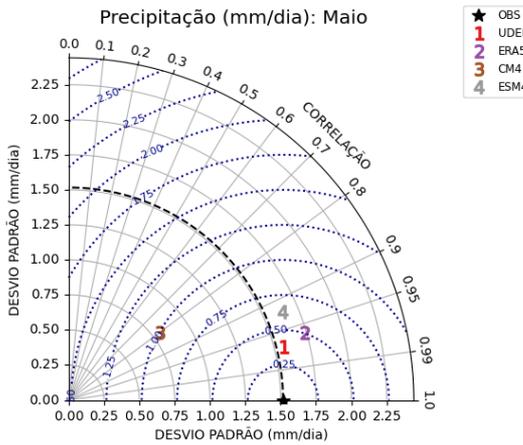
c)



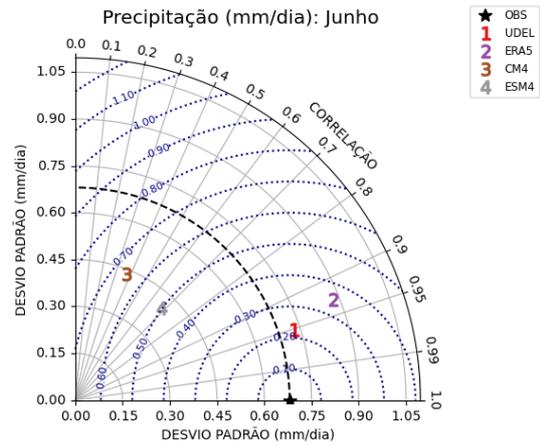
d)



e)



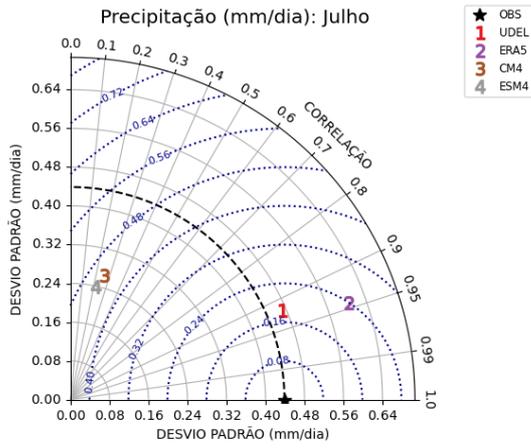
f)



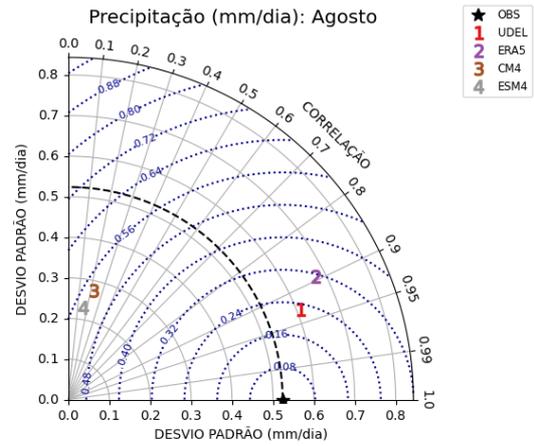
Fonte: Próprio autor.

Figura 6: Continuação.

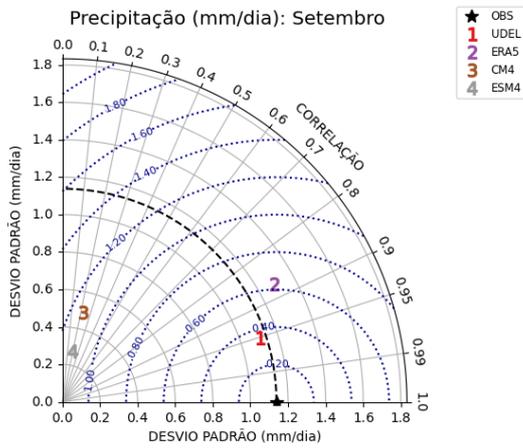
g)



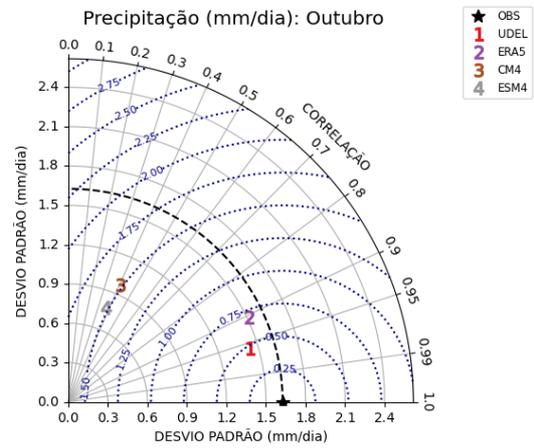
h)



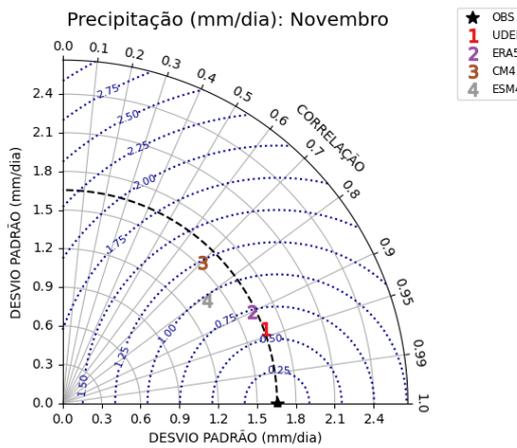
i)



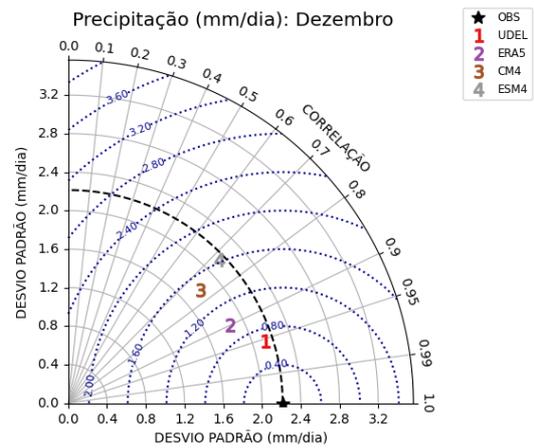
j)



l)



m)



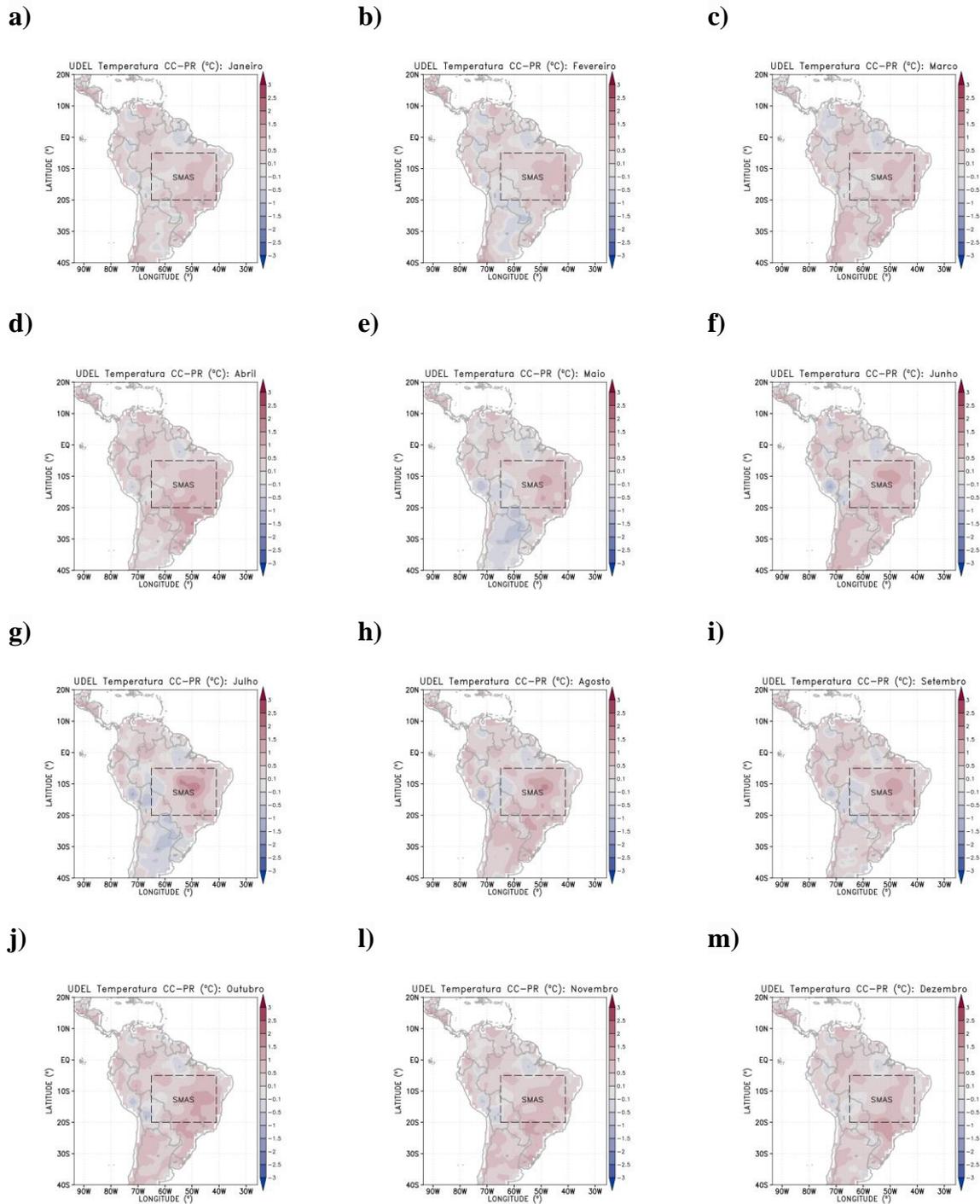
Fonte: Próprio autor.

Nas Figuras 7, 8 e 9, as áreas sombreadas com cores quentes (frias) indicam temperaturas maiores (menores) no clima corrente em comparação com clima do passado recente para os meses de janeiro a dezembro, para UDEL, CM4 e ESM4, respectivamente. Desta forma, veremos observar a variação de temperatura entre os dois climas de 1,5 °C até - 1,5 °C.

Pode-se observar que em janeiro (Figura 7,8,9a), que é um mês chuvoso na região do SMAS (Figura 3), que de um modo geral, o clima corrente apresenta valores de temperatura maiores do que o passado recente tanto para a observação (Figura 7) como para os modelos (Figuras 8-9), porém essa diferença parece ser suavizada pelos maiores volumes de precipitação registrados em média neste mês. Já no mês de julho (Figuras 7,8,9g), caracterizado por um ambiente seco, a área SMAS tracejada na figura, apresenta um núcleo com as maiores diferenças entre os dois climas na América do Sul, com valores acima de 1,5 °C, sendo mais evidenciado pela observação em julho de UDEL (Figura 7g), em outubro no CM4 (Figura 8j) e o ESM4, mas suavizado em novembro (Figura 9l). Dessa forma, já se observa, em relação ao clima do passado recente que ocorreu um aumento na temperatura do ar no clima corrente.

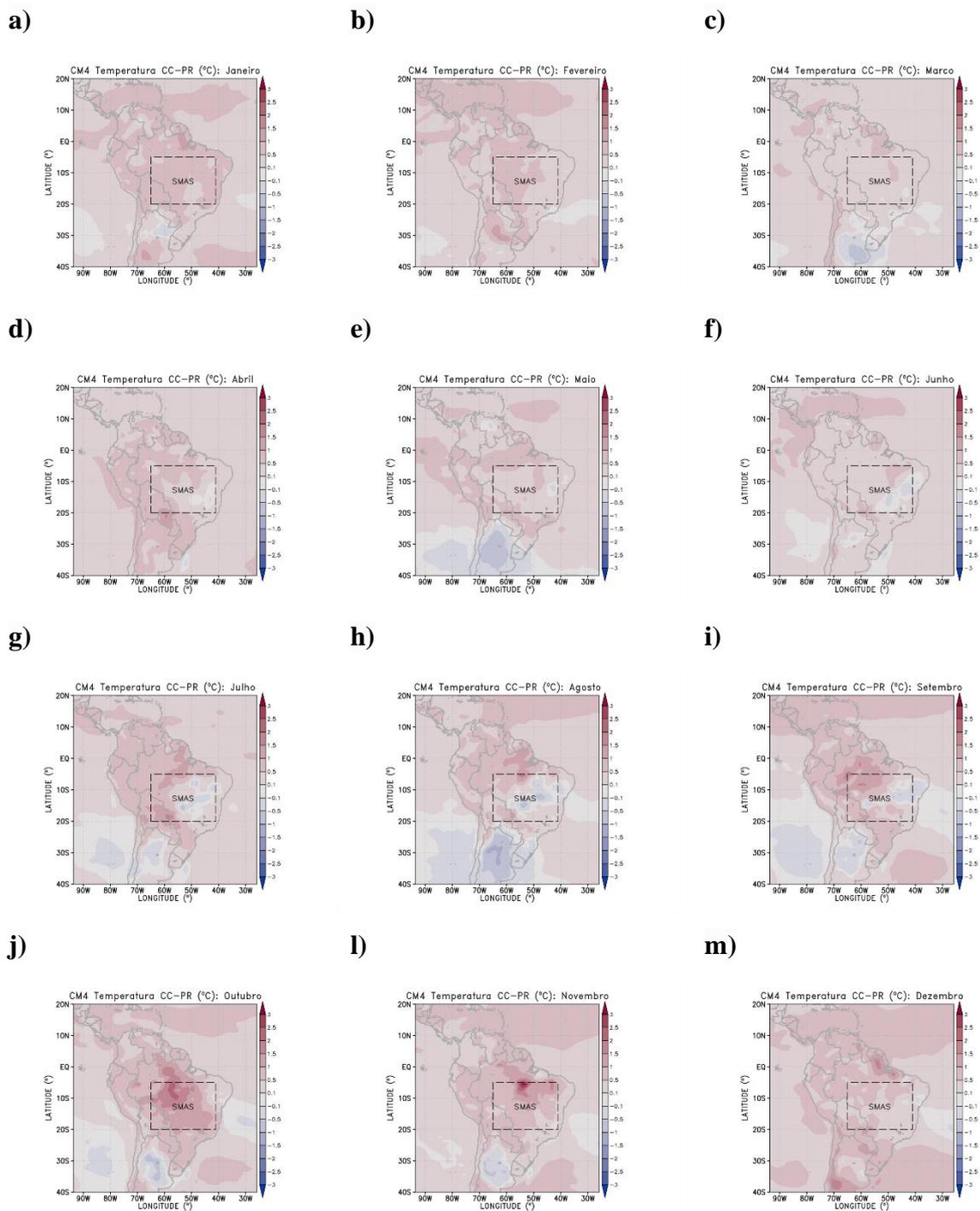
Os modelos evidenciam mais um núcleo com valores positivos maiores de temperatura em outubro para o CM4 (Figura 8j) e novembro no ESM4 (Figura 9l). No entanto, o CM4 atenua o aumento, indicando até mesmo um núcleo com redução, da temperatura nos meses de inverno do clima corrente em comparação com os mesmos meses do ESM4 e, principalmente, de UDEL. Os modelos climáticos de última geração, como os do GFDL do projeto CMIP6, são capazes de simular realisticamente as características básicas de um fenômeno, no entanto, vários aspectos ainda não estão satisfatoriamente representados nos modelos climáticos, incluindo as diferenças na resposta às forçantes climáticas entre o CM4 e ESM4 (CHEN *et al.*, 2021).

**Figura 7:** Mudança na temperatura do ar a 2 metros (°C) de UDEL no clima corrente em relação ao passado recente de janeiro a dezembro (a-m), respectivamente. Área do SMAS demarcada por um retângulo tracejado.



Fonte: Próprio autor.

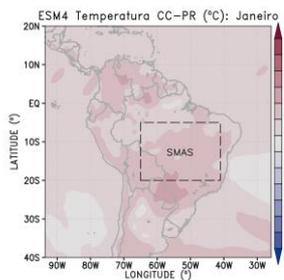
**Figura 8:** Idem Figura 7, exceto que para o CM4.



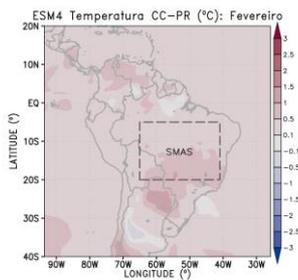
Fonte: Próprio autor.

**Figura 9:** Idem Figura 7, exceto que para o ESM4.

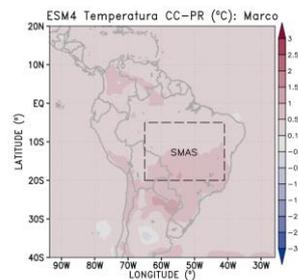
**a)**



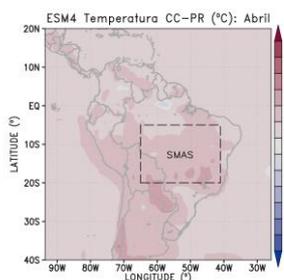
**b)**



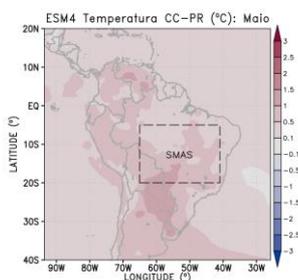
**c)**



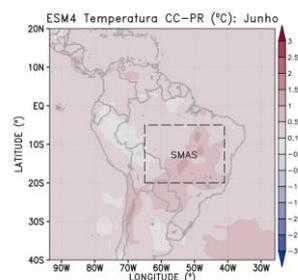
**d)**



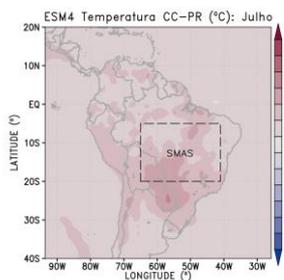
**e)**



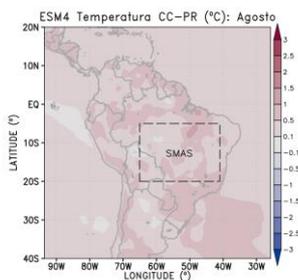
**f)**



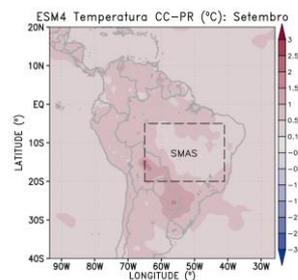
**g)**



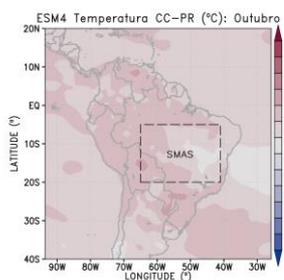
**h)**



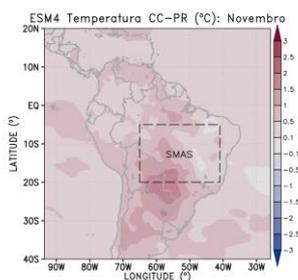
**i)**



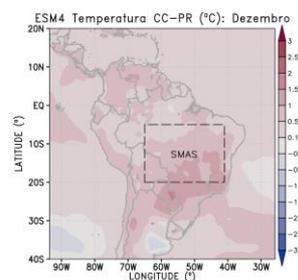
**j)**



**l)**



**m)**



Fonte: Próprio autor.

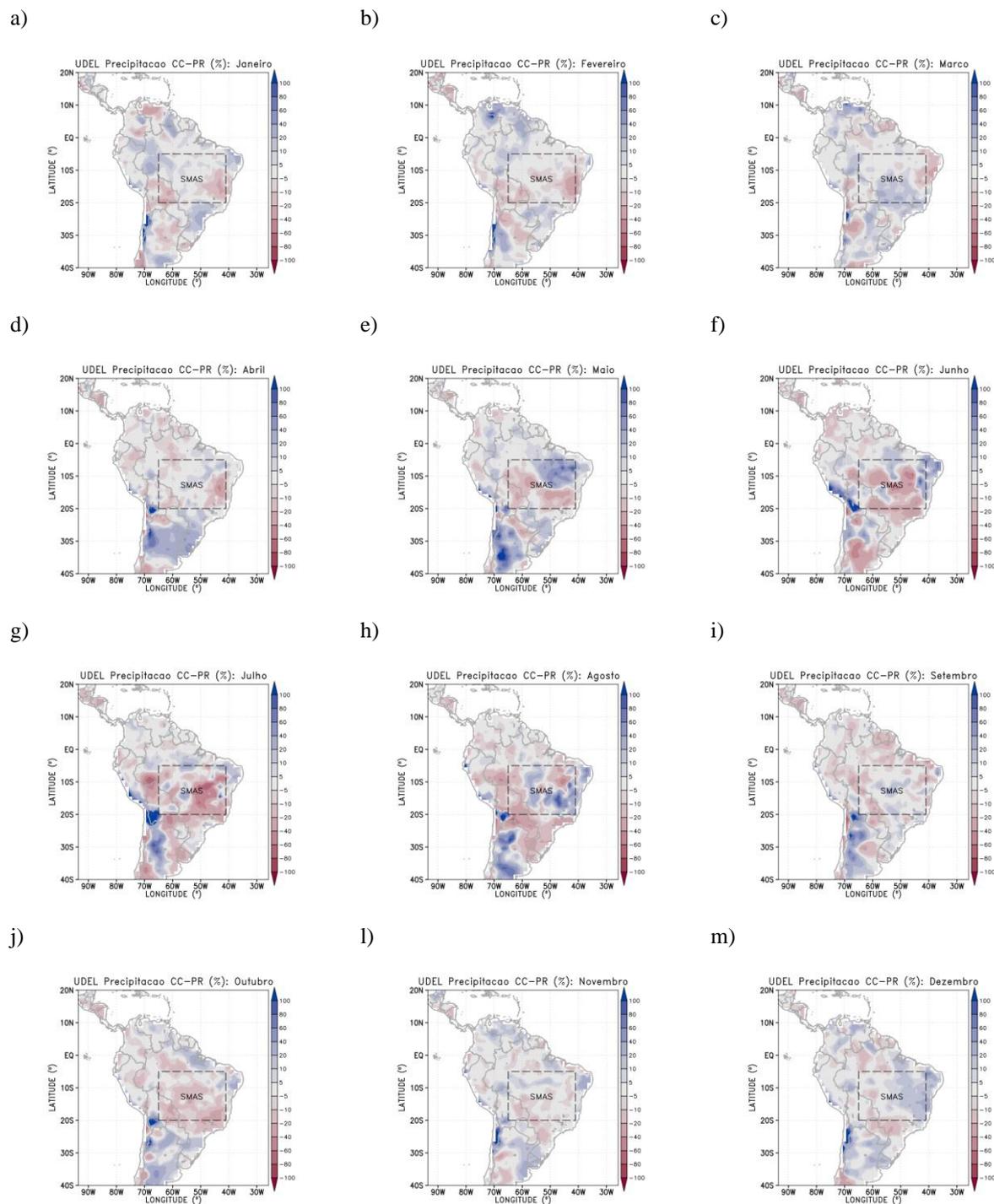
Nas Figuras 10, 11 e 12, se observa a diferença percentual na precipitação em mm/dia entre o clima corrente e o clima do passado recente para os meses de janeiro a dezembro (a-m), respectivamente. As cores mais quentes indicam uma redução da precipitação, enquanto as cores frias representam um aumento em comparação com o passado recente, para UDEL, CM4 e ESM4, respectivamente.

Em UDEL, uma diminuição da precipitação é observada a partir de junho, tornando-se mais acentuada em julho, e em toda a região em outubro (Figura 10f, g, j). Para CM4, a precipitação total do final do século em relação ao clima corrente atinge valores que ultrapassam uma redução de 80% na maior parte da região do SMAS entre agosto e setembro (Figura 11h, i). De modo similar, ocorre uma redução na precipitação do ESM4, principalmente entre junho e setembro (Figura 12f-i); no entanto, de julho a setembro, núcleos de aumento de precipitação em relação à climatologia do passado recente são encontrados no ESM4, alcançando valores de até 100%, na região do SMAS (Figura 12g-i).

O artigo de Correia *et al.* (2020) realiza uma avaliação de múltiplos índices do SMAS, onde os resultados foram obtidos a partir de índices baseados na precipitação e radiação de onda longa emergente no topo da atmosfera, exibindo um atraso no início do SAMS, enquanto as datas de término não mostram mudanças marcantes durante o período considerado, indicando um encurtamento do SAMS e com isso um alongamento da estação seca ao sul do SMAS, sendo este resultado independente do conjunto de dados observacionais considerado.

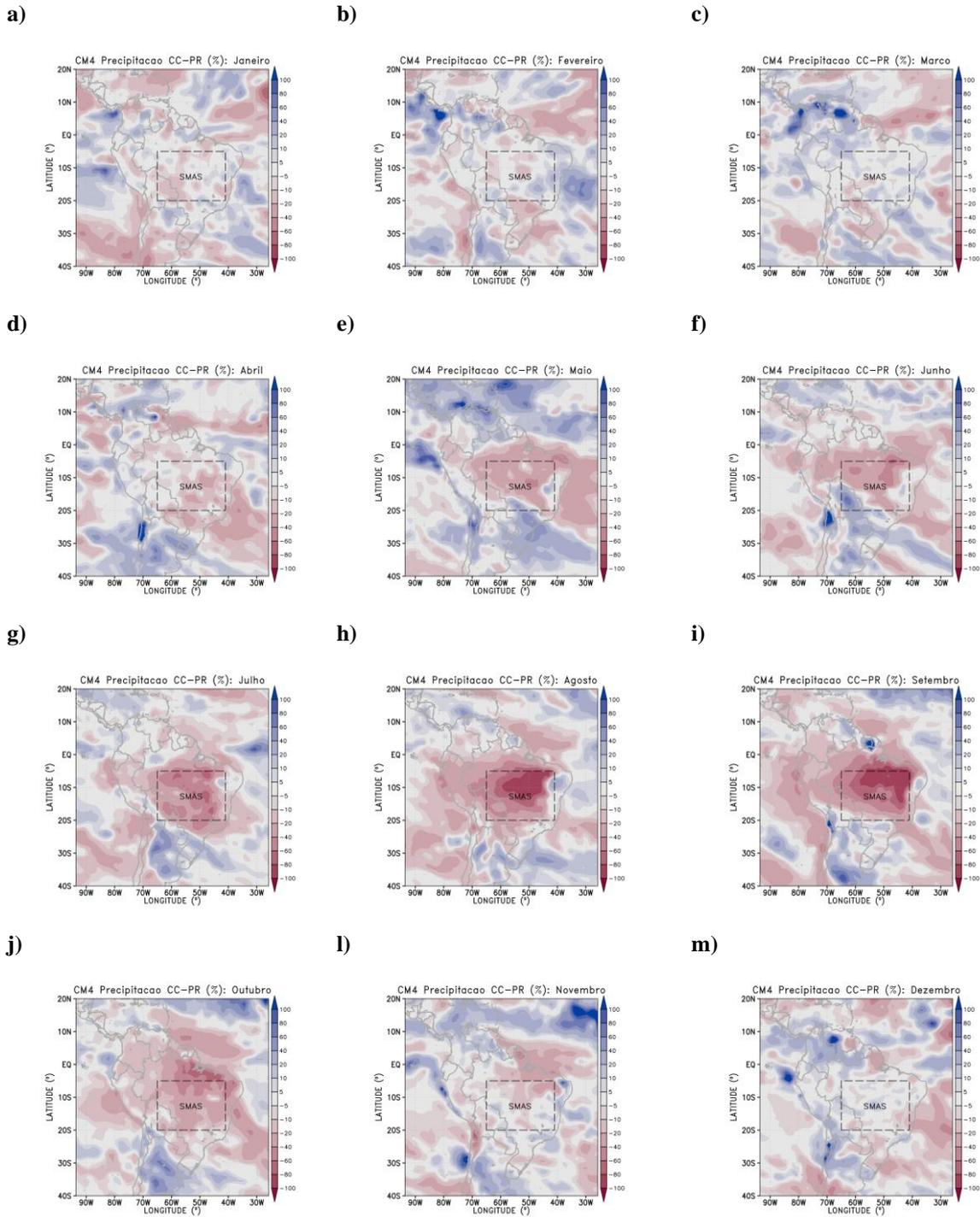
Dessa forma, é possível argumentar sobre a presença de um sinal de mudança já no período histórico, principalmente, nos meses do inverno e início da primavera, tanto para a temperatura do ar a 2 metros quanto para a precipitação total, especialmente na região SMAS, o que pode ser observado nas Figuras 10, 11 e 12.

**Figura 10:** Mudança na precipitação (%) de UDEL no clima corrente em relação ao passado recente de janeiro a dezembro (a-m), respectivamente. Área do SMAS demarcada por um retângulo tracejado.



Fonte: Próprio autor.

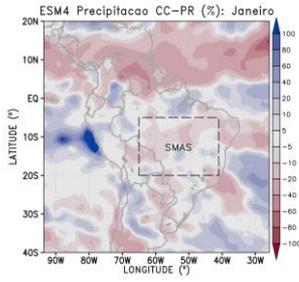
**Figura 11:** Idem Figura 10, exceto que para o CM4.



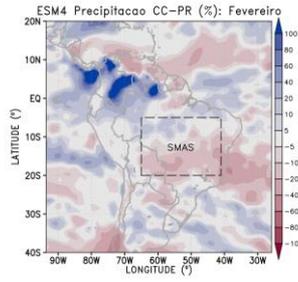
Fonte: Próprio autor.

Figura 12: Idem Figura 10, exceto que para o ESM4.

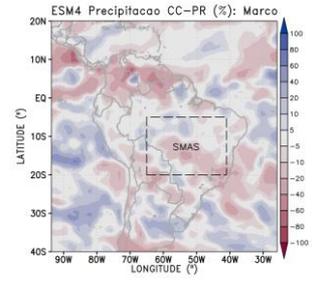
a)



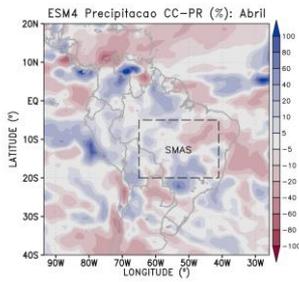
b)



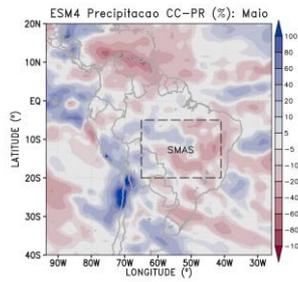
c)



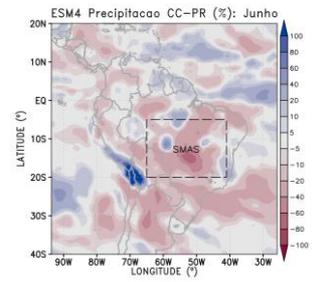
d)



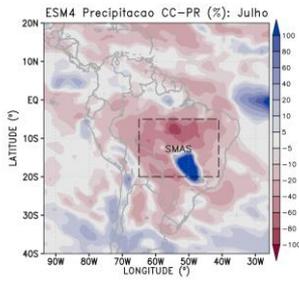
e)



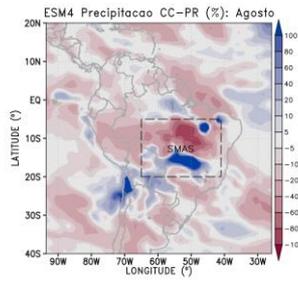
f)



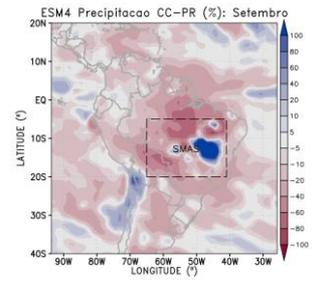
g)



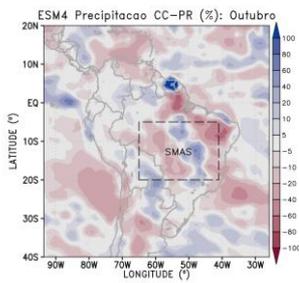
h)



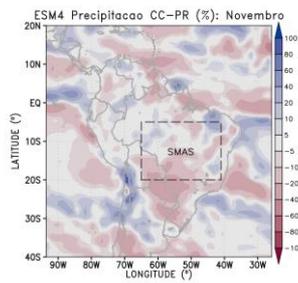
i)



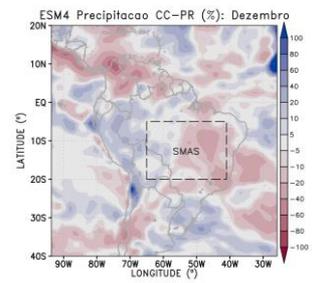
j)



l)



m)



Fonte: Próprio autor.

No presente estudo, as duas principais componentes do ciclo hidrológico, especificamente, precipitação e evaporação, são avaliadas conjuntamente sobre a região do SMAS, nas áreas continentais vizinhas e nos oceanos adjacentes. Devaraju *et al.* (2015) discutem que, os efeitos biogeofísicos, como alterações de albedo e evapotranspiração devido ao desmatamento, já foram mostrados por vários estudos no passado, e podem exercer forte influência sobre as temperaturas da superfície local, sendo que os autores verificaram os efeitos do desmatamento em grande escala em regiões de monção, fazendo uma análise sobre os efeitos remotos e locais. Eles puderam avaliar os benefícios de estratégias de mitigação das mudanças climáticas, como florestamento/reflorestamento.

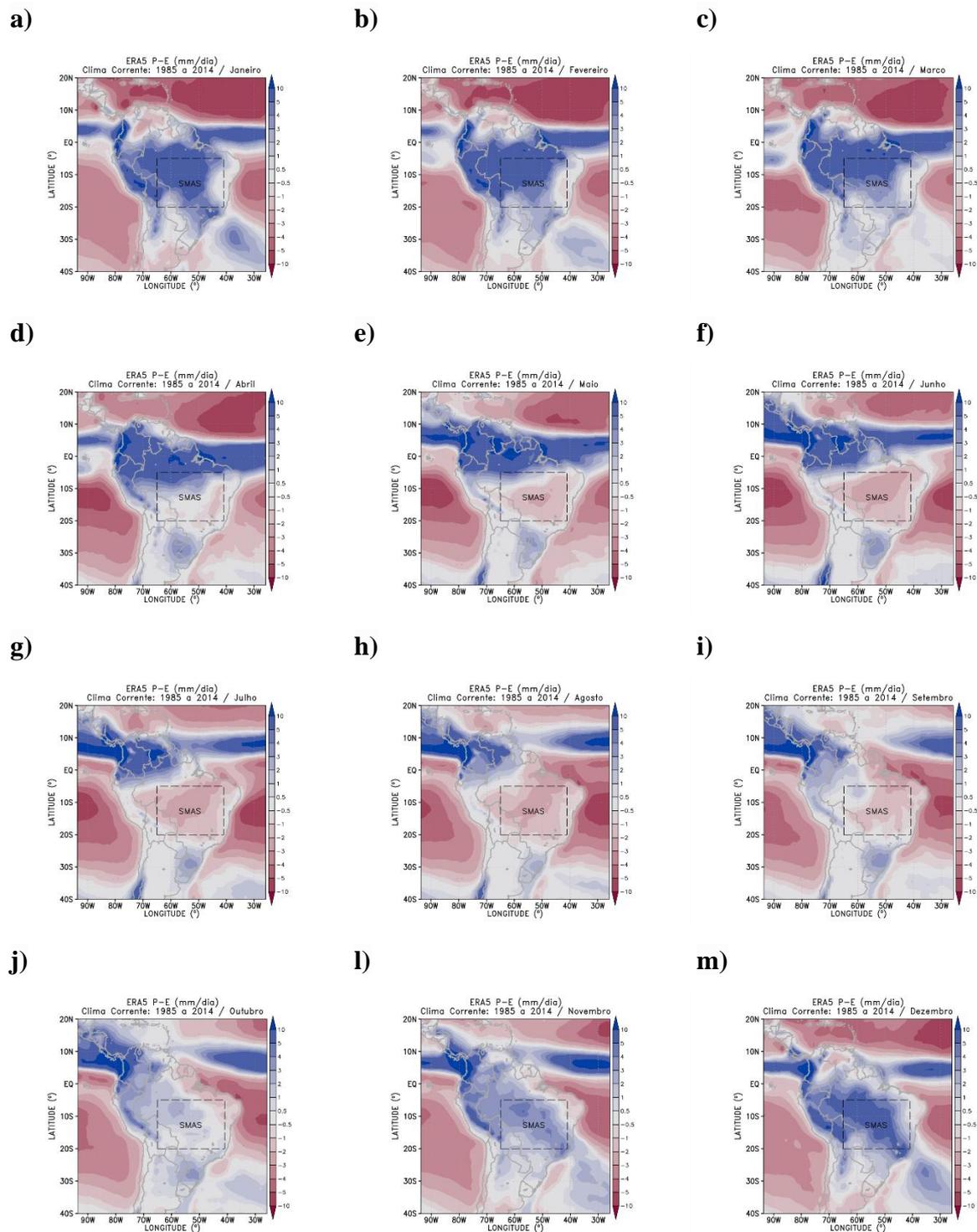
Nas Figuras 13, 14 e 15, observa-se a diferença entre a precipitação e a evaporação (P-E) no clima corrente, onde as áreas sombreadas com cores frias (quentes) indicam que os valores da precipitação média mensal estão acima (abaixo) dos da média mensal da evapotranspiração/evaporação. Desta forma, observa-se uma variação entre essas duas variáveis na faixa entre 10 e -10 mm/dia, para a reanálise ERA5 e os modelos CM4 e ESM4 nos meses de janeiro a dezembro nas Figuras 13, 14 e 15a-m, respectivamente.

O aumento do CO<sub>2</sub> atmosférico influencia o ciclo hidrológico terrestre através de forças climáticas e fisiológicas. Dessa forma, CUI *et al.* (2020) utilizaram Modelos do Sistema Terrestre para reforçar que em um clima enriquecido com CO<sub>2</sub> tem-se os feedbacks da vegetação afetando substancialmente a precipitação anual na maioria das regiões de monção, como no caso do SMAS, e que na estação seca, o escoamento aumenta devido a reduções de evapotranspiração orientadas pelo fechamento estomatal dos organismos vegetais e pelas mudanças associadas à circulação atmosférica.

Inicialmente, observa-se uma boa correspondência entre os padrões climatológicos de P-E da reanálise global ERA5 e os dos modelos globais CM4 e ESM4 ao longo do ano na área do SMAS e regiões adjacentes (Figuras 13, 14 e 15 a-m). Nas figuras referentes à ERA5 e aos modelos CM4 e ESM4, observa-se uma maior precipitação de janeiro a abril (Figuras 13-15 a-d) em relação à evapotranspiração que supera a precipitação entre maio e setembro (Figuras 13-15 e-i). Uma diferença notável entre ERA5 e os modelos é vista no mês de outubro, mais seco para os modelos (Figuras 14 e 15j) do que para ERA5 (Figura 13j). A partir de novembro, observa-se o retorno gradual da estação chuvosa, com uma precipitação maior do que evapotranspiração no SMAS (Figuras 13, 14 e 15 l), sendo o restabelecimento da estação chuvosa marcado no mês de dezembro por valores positivos de P-E na área do

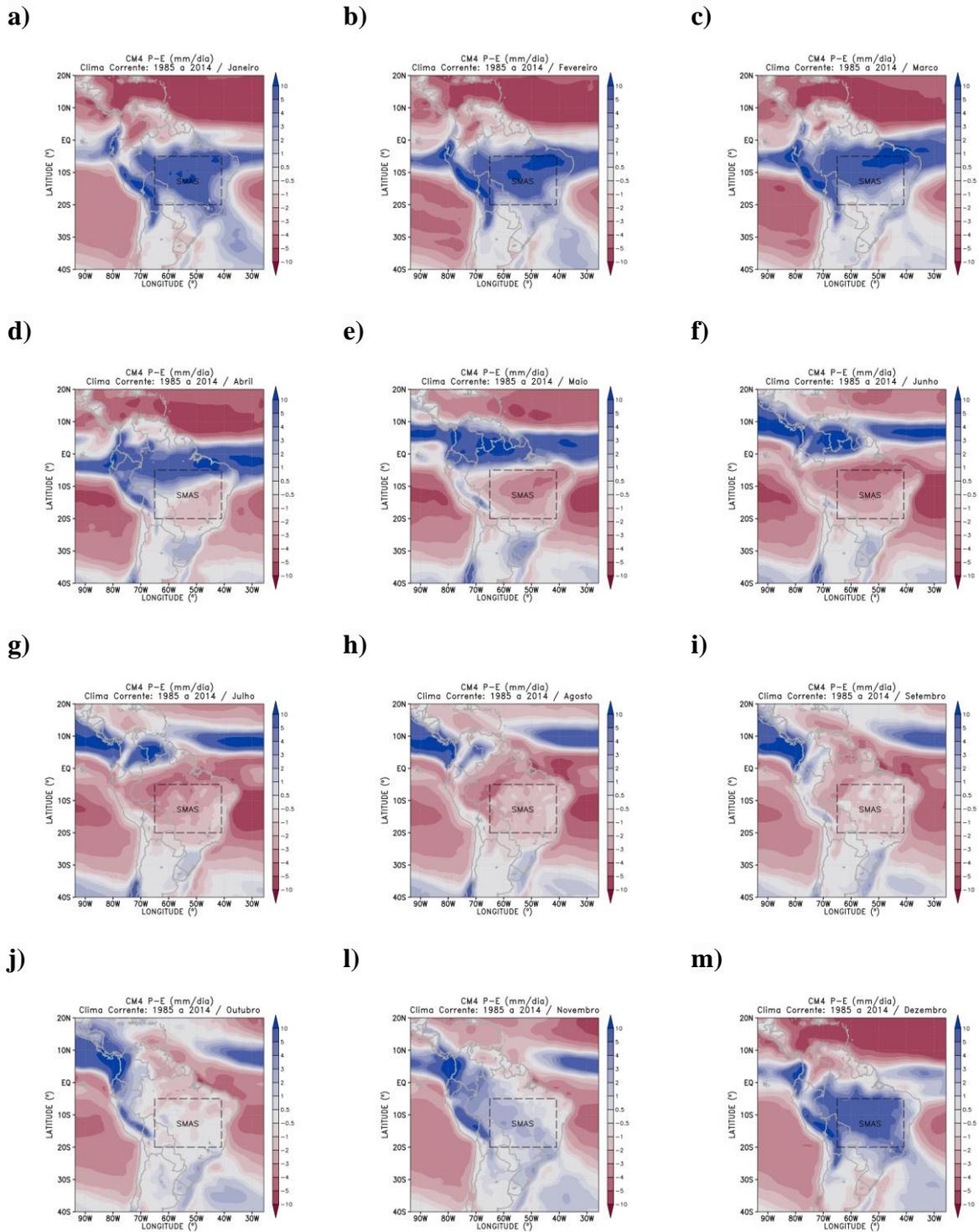
SMAS (Figuras 13, 14 e 15 m). Nota-se que a precipitação sempre acaba sendo maior que a evapotranspiração nos meses de dezembro a março, os quais estão entre os meses da fase ativa (chuvosa) do SMAS.

**Figura 13:** Diferença entre a precipitação e a evaporação (P-E) no clima corrente em mm/dia para ERA5, de janeiro a dezembro (a-m), respectivamente. Área do SMAS demarcada por um retângulo tracejado.



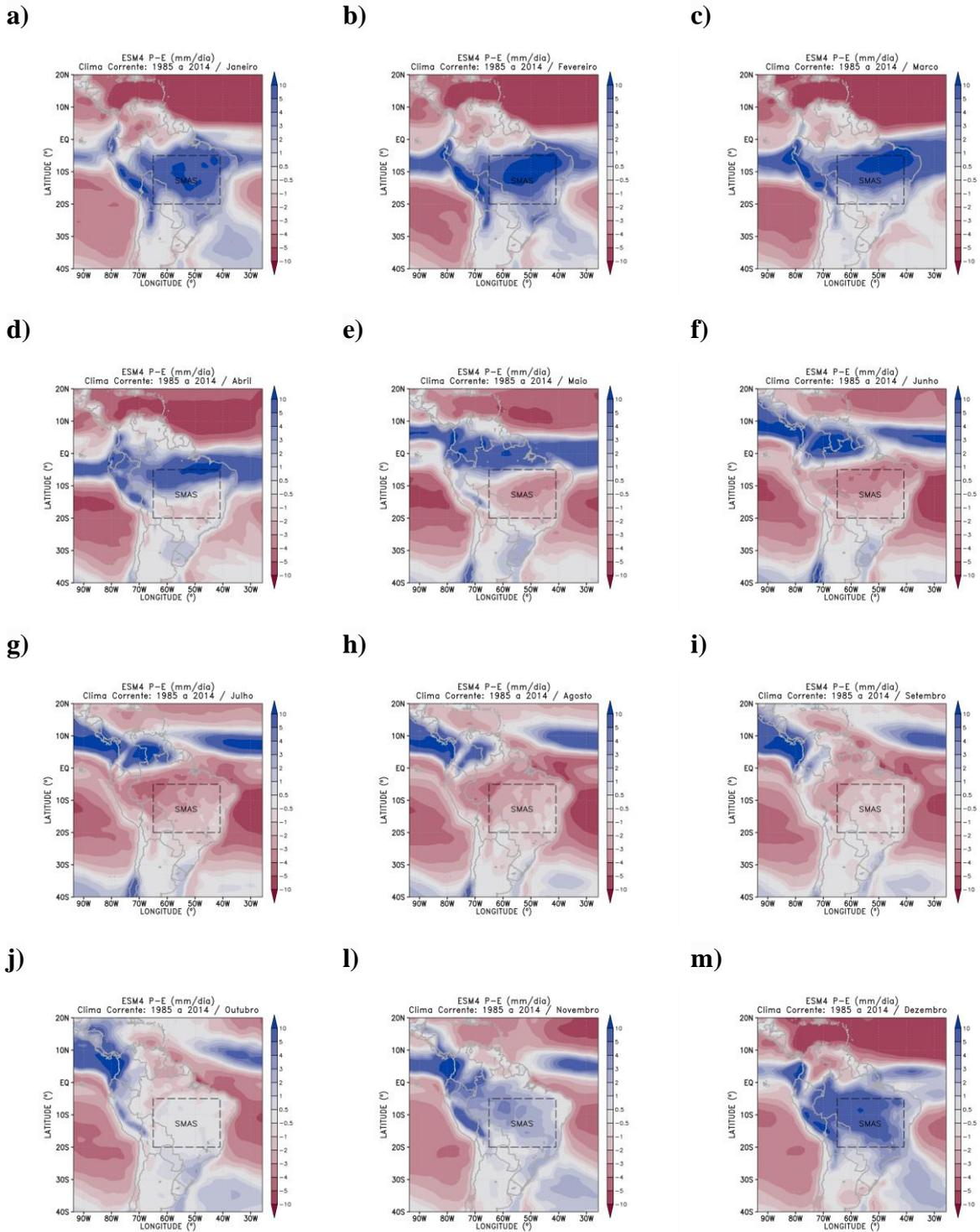
Fonte: Próprio autor.

**Figura 14:** Idem Figura 13, exceto que para o CM4.



Fonte: Próprio autor.

Figura 15: Idem Figura 13, exceto que para o ESM4.



Fonte: Próprio autor.

## 4.2. PROJEÇÕES CLIMÁTICAS

O estudo de GOMES *et al.* (2021) realizou uma análise sobre o impacto que o aumento das emissões de gases de efeito estufa teria nos mecanismos que conectam as duas principais bacias hidrográficas da América do Sul e investigou as prováveis causas das mudanças no hidroclima através de projeções de modelos climáticos globais, constatando uma diminuição da precipitação e no comprimento da estação chuvosa associada ao SMAS para o final do século XXI. Da mesma forma, o presente estudo analisa o ciclo anual nos períodos histórico (passado recente e clima corrente) e final do século XXI, representados pela linha azul e pelos *boxplots*.

A Figura 16 apresenta *boxplots* para a precipitação média mensal (mm/dia) para o clima do passado recente, clima corrente e clima do final do século. Da esquerda para à direita, na primeira linha está sendo exibida a observação UDEL interpolada para a grade dos modelos CM4 e ESM4, representado na Figura 16a-b, o passado recente e o clima corrente respectivamente. Na segunda linha, são mostrados o passado recente, clima corrente e final do século (Figura 16 c-e) para o modelo CM4; e na terceira linha, encontra-se o ESM4, da mesma forma que o CM4, no entanto para a Figura 16 f-h. As linhas sólidas em azul exibem os ciclos anuais de precipitação. Os valores mensais mínimos e máximos na série temporal são marcados por *whiskers* representados por linhas perpendiculares delimitadoras acima e abaixo dos *boxplots*. A variabilidade interanual da série de precipitação para cada mês pode ser avaliada a partir do IQ ( $Q3 - Q1$ ) em cada *boxplot*.

Na observação UDEL (Figura 16a-b), verifica-se que a variação de precipitação ocorre de forma gradual entre os meses no ciclo anual, com pouca variação durante os meses do inverno austral, porém sendo acentuada nos meses do verão austral. Na Figura 16a, observam-se, no passado recente, os maiores volumes de precipitação na área do SMAS a partir de outubro (acima de 4 mm/dia), atingindo o máximo em janeiro (em torno de 8 mm/dia), diminuindo em fevereiro e alcançando o menor valor em julho. Já no clima corrente (Figura 16b), verifica-se, em fevereiro, que houve uma diminuição na precipitação no clima corrente em relação aos meses de janeiro e março. Observa-se que já vinha ocorrendo uma diminuição de precipitação do clima do passado recente para o clima corrente a partir de agosto e na primavera (Figura 16b), o que se destaca é que há uma redução bem marcada na

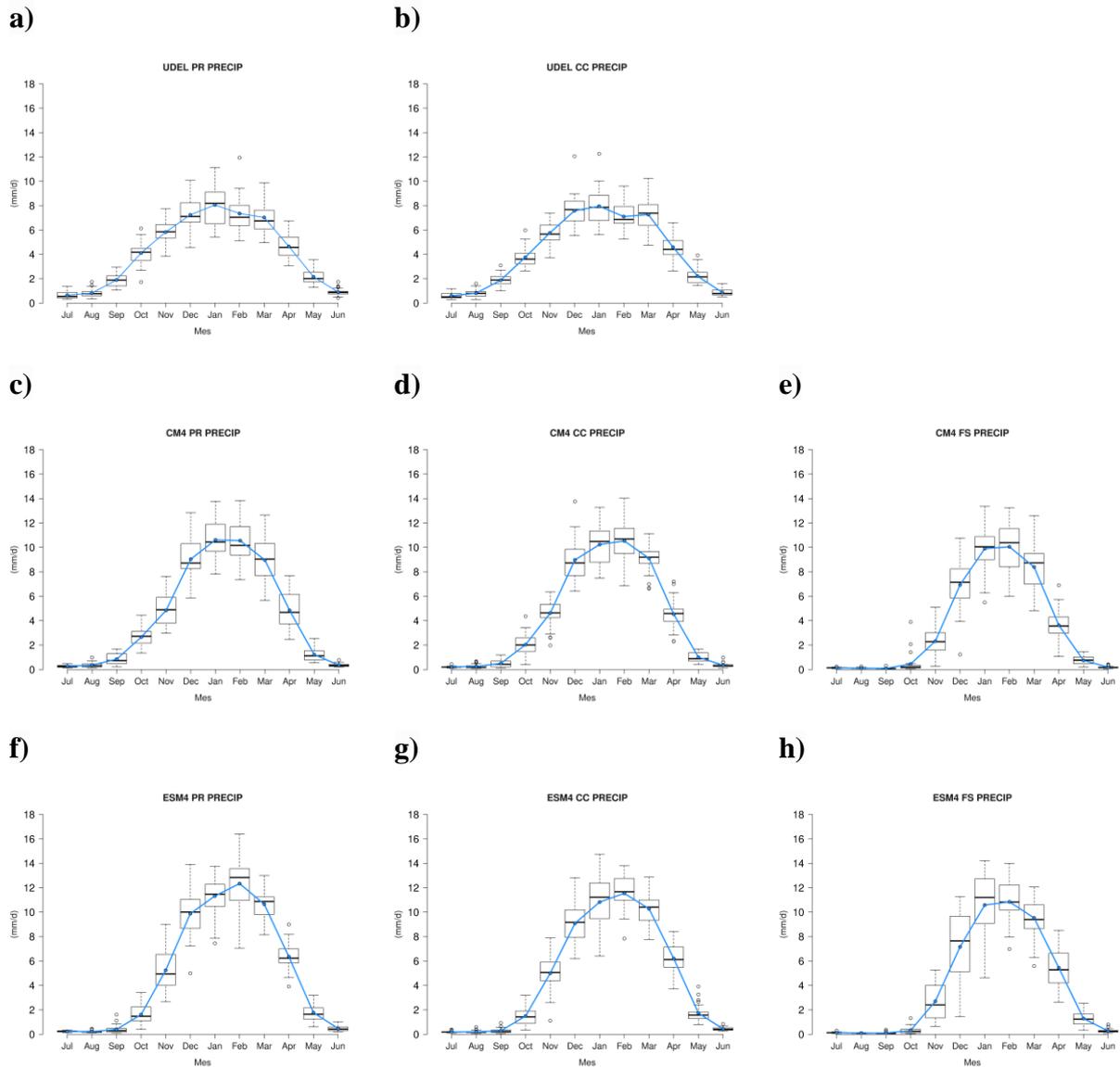
precipitação no clima corrente em setembro em comparação ao clima do passado recente (Figura 16a).

Observa-se no CM4 no clima corrente (Figura 16d) uma diminuição da precipitação na área de estudo SMAS, nos meses de agosto, setembro e outubro com uma retomada nos meses de novembro e dezembro que se estende até março. No ESM4 (Figura 16f), também se observa um aumento na precipitação de janeiro a abril, em relação ao que foi observado no CM4, sendo os maiores valores observados no modelo ESM4.

Observa-se, nos dados do final do século, uma diminuição em relação a precipitação, que ocorre de forma mais acentuada no ESM4 (Figura 16h) do que no CM4 (Figura 16e), o qual também apresenta uma diminuição de precipitação durante os meses.

Em relação ao intervalo interquartil (IQ), observa-se que há uma maior variabilidade interanual presente nos meses de maior pluviosidade para a observação UDEL, tanto no passado recente como para o clima corrente (Figura 16a-b), assim como para os modelos (Figura 16c-h) que apresentam uma variabilidade maior em diversos meses representativos do verão, sendo a menor variabilidade encontrada nos meses de menor pluviosidade na região do SMAS em todos os climas, tanto na observação, quanto nos modelos (Figura 16a-h).

**Figura 16:** Diagrama de Caixa (*Boxplot*) para o passado recente, clima corrente e final do século (apenas para os modelos) para: a observação UDEL (a, b) e os modelos CM4 (c-e) e ESM4 (f-h), respectivamente.



Fonte: Próprio autor.

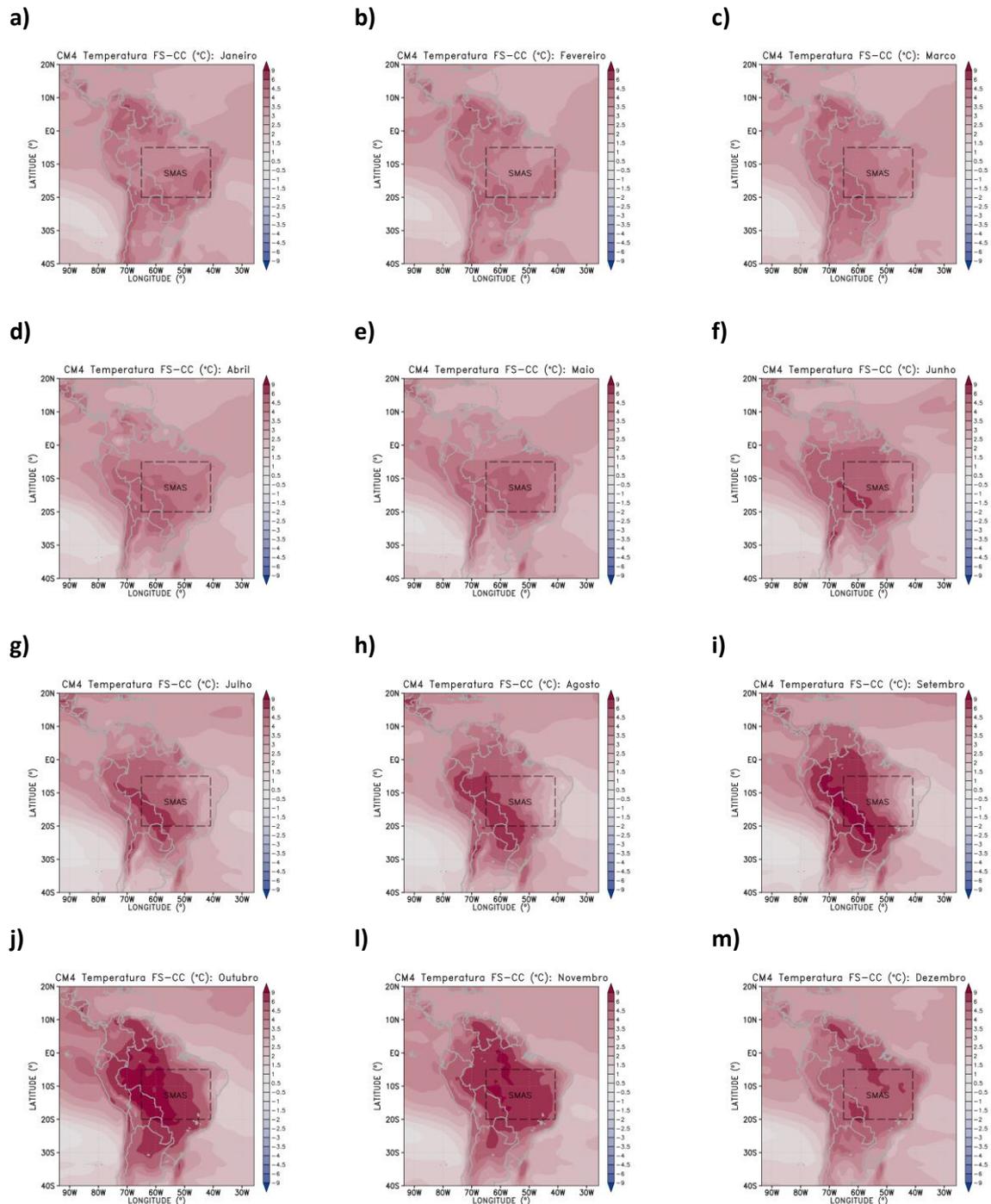
Nas Figuras 17 e 18, as áreas sombreadas com cores quentes (frias) indicam temperaturas maiores (menores) no clima do final do século em comparação com o clima corrente, para os meses de janeiro a dezembro para CM4 e ESM4 (Figuras 17 e 18 a-m), respectivamente. Observa-se uma progressão no aumento da temperatura durante os meses,

sempre mais acentuadas no CM4 (Figura 17a-m) para os mesmos períodos observados no ESM4 (Figura 18a-m).

Os modelos indicam um aumento progressivo de temperatura com um núcleo com valores mais elevados a partir do noroeste da América Sul, o qual está definido melhor no ESM4 em janeiro (Figura 18a), até um máximo em outubro (Figuras 17 e 18 j) nas projeções do CM4 e ESM4. Além disso, observa-se que dois modelos exibem um aumento acentuado da temperatura, especialmente nos meses do inverno e primavera na parte oeste do SMAS, que progressivamente engloba uma boa parte da região do SMAS em novembro (Figuras 17 e 18l). Porém, ressalta-se que o CM4 projeta uma diferença na temperatura do ar que pode ultrapassar 9 °C nos meses associados com o início do período chuvoso, em algumas áreas do SMAS na primavera. Isso corresponde a uma redução na precipitação projetada para o final do século, na área do SMAS, em relação ao clima corrente do estudo, como será mostrado pelas projeções da precipitação (Figuras 19 e 20).

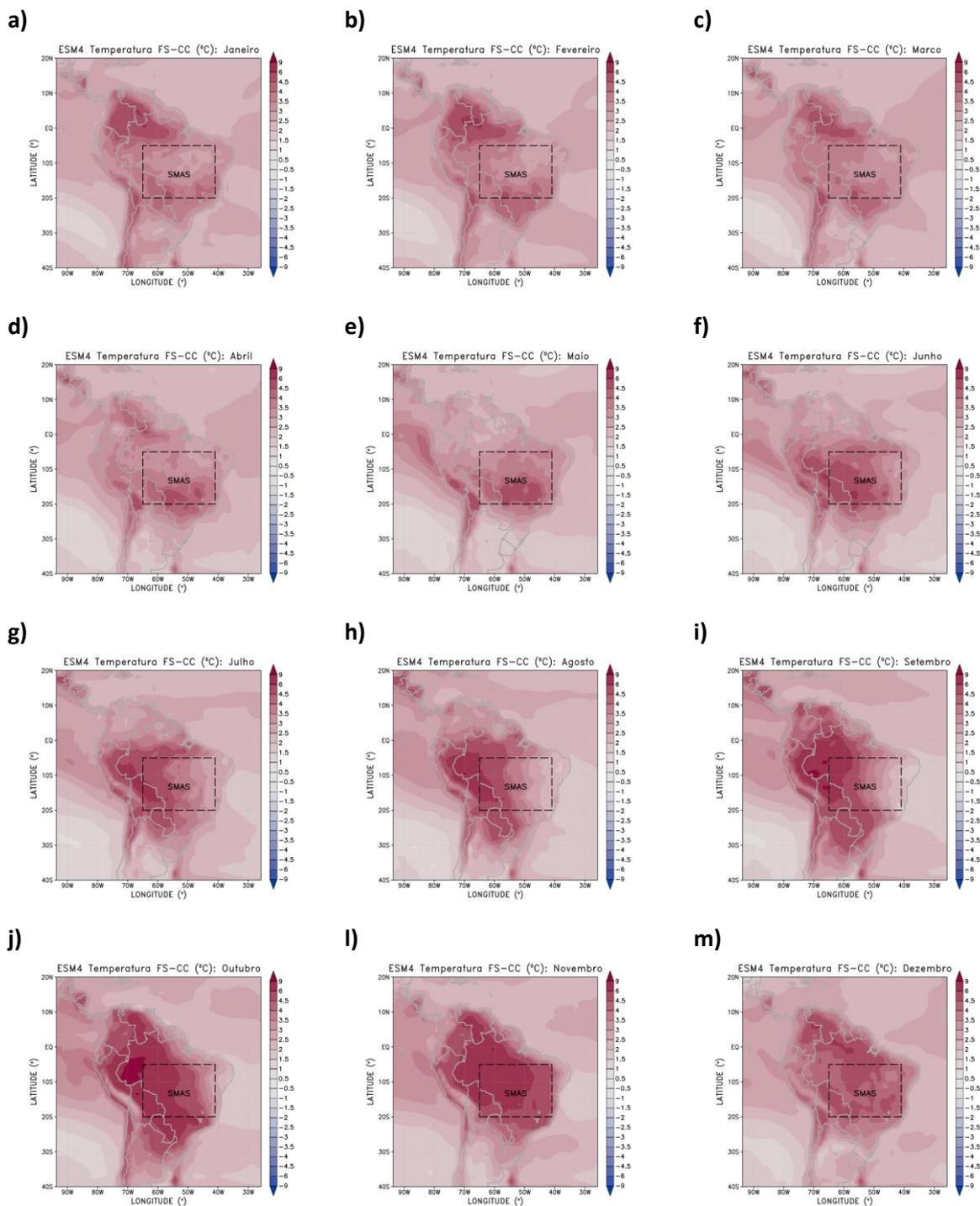
Segundo Almazroui *et al.* (2021), sob o cenário de emissões mais altas, SSP585, um aquecimento médio regional mais forte é projetado sobre SMAS para o final do século XXI, podendo chegar a 5,4 °C, enquanto um aquecimento mais fraco é projetado sobre a parte sul da América do Sul, chegando a 3 °C. Essas variações latitudinais contrastantes na resposta de temperatura podem ser parcialmente explicadas em termos de suas diferenças nas características do tipo de precipitação. Portanto, esse estudo pode levar a uma resposta plausível para o que se encontra em relação às projeções induzidas pelo cenário SSP585 para os modelos CM4 e ESM4 (Figuras 17 e 18), sendo este o cenário extremo utilizado nas projeções para o final do século XXI.

**Figura 17:** Mudança projetada na temperatura do ar a 2 metros (°C) pelo CM4 para o clima final do século XXI em relação ao clima corrente de janeiro a dezembro (a-m), respectivamente. Área do SMAS demarcada por um retângulo tracejado.



Fonte: Próprio autor.

**Figura 18:** Idem Figura 17, exceto que para o ESM4.



Fonte: Próprio autor.

Nas Figuras 19 e 20, observa-se a diferença percentual da precipitação dada em mm/dia para os meses de janeiro a dezembro (a-m) para o CM4 e o ESM4, respectivamente. Essa diferença é referente à relação entre o clima do final do século e o clima corrente. As

cores frias (quentes) indicam aumento (redução) em relação ao clima corrente para CM4 e ESM4, respectivamente.

Dentro desse contexto, Li *et al.* (2020) investigaram as mudanças futuras em eventos associados com precipitação extrema que expõem a população a situações de risco na América do Sul. O estudo deles avaliou se o aquecimento de 1,5 °C nas projeções em relação ao período pré-industrial evitaria a exposição da população aos riscos de precipitação extrema. O estudo demonstrou que, em todos os modelos, limitar o aquecimento a 1,5 °C em oposição a 2 °C mostra uma redução geral na exposição da área e da população a precipitações extremas perigosas em toda a América do Sul. Já nas regiões do SMAS e sul da América do Sul, o estudo deles indicou que os modelos produziram a maior porcentagem mediana de exposição populacional “evitada” (> 10%).

Ambos os modelos do GFDL exibem uma redução da precipitação na climatologia do final do século na área do SMAS, durante o ano, em relação ao clima corrente. No entanto, observa-se no CM4 uma redução mais acentuada (Figura 19a-m) em comparação com o ESM4 (Figura 20a-m). Essa diferença entre os dois modelos foi observada nas Figuras 17 e 18a-m, como uma elevação maior da temperatura no final do século no CM4 em relação ao ESM4, sendo, da mesma forma, projetados valores ligeiramente menores de precipitação pelo modelo CM4.

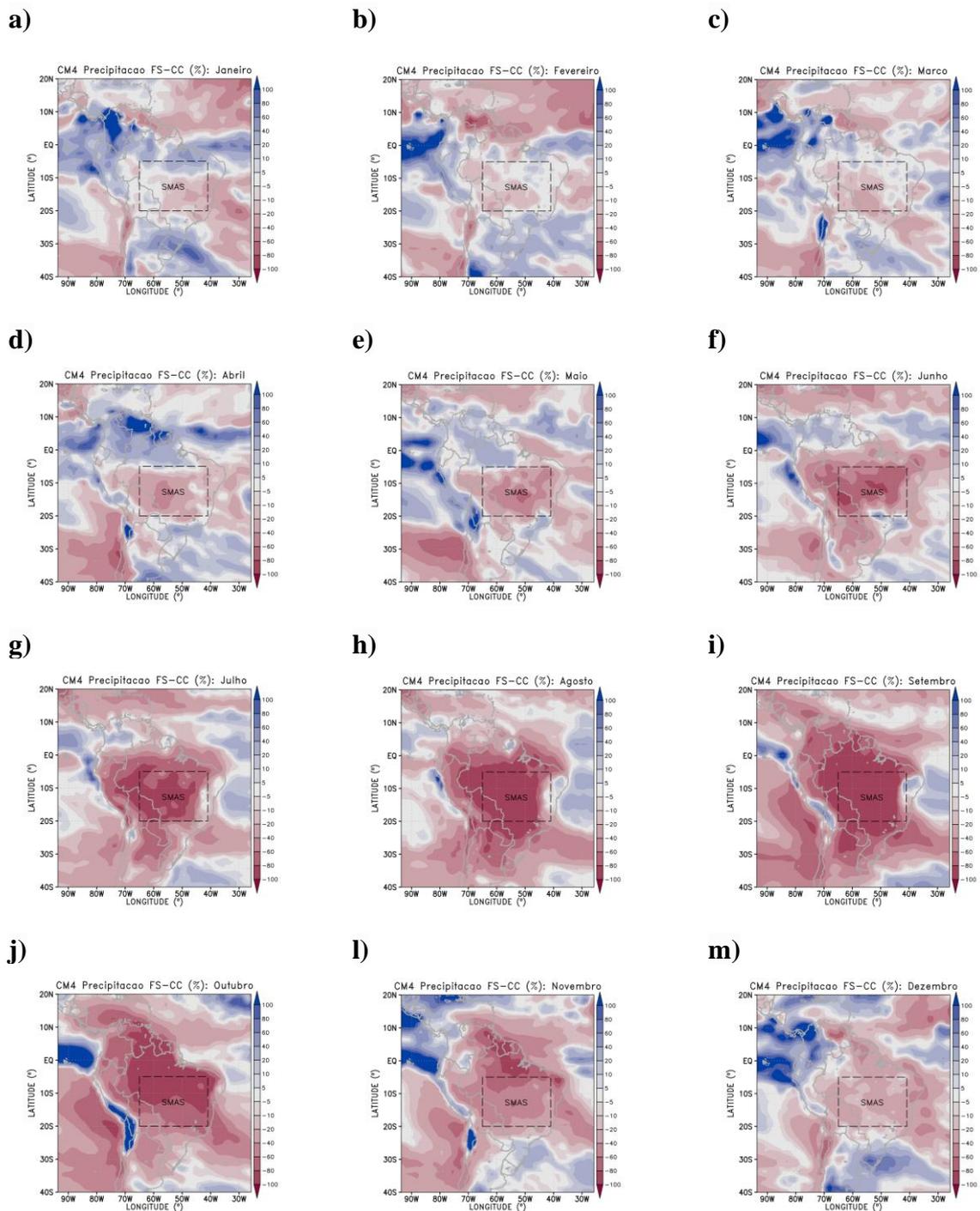
Em relação à precipitação no mês de junho, comparando o CM4 e ESM4 na parte oeste da região do SMAS, que se entende até o mês de outubro (Figuras 19 e 20f-j) em relação a ambos os modelos. No ESM4, a precipitação diminui drasticamente durante os meses de junho a outubro (Figura 20f-j), com mais de 90% de redução em relação ao clima corrente, o mesmo ocorre no CM4 para os mesmos meses (Figura 19g-j). Para o ESM4, no entanto, a precipitação apresentou uma redução de cerca de 80% em relação ao clima corrente.

O estudo de Boers *et al.* (2017) utilizou um modelo projetado especificamente para analisar os acoplamentos não lineares entre a floresta amazônica e o transporte de umidade atmosférica do Atlântico para o continente sul-americano. Esses acoplamentos estão associados a uma cascata de precipitação e evapotranspiração na direção oeste em toda a Amazônia. Os seus resultados indicam a existência de um ponto de inflexão e cruzar o ponto de inflexão causa reduções de precipitação de até 40% em partes não desmatadas da Amazônia ocidental e regiões adjacentes. Portanto, isso poderia explicar a questão da

precipitação nos dois tipos de modelos analisados e, conseqüentemente, poderia ser uma das causas do que se observa nas projeções do clima do final do século, a partir do cenário mais extremo.

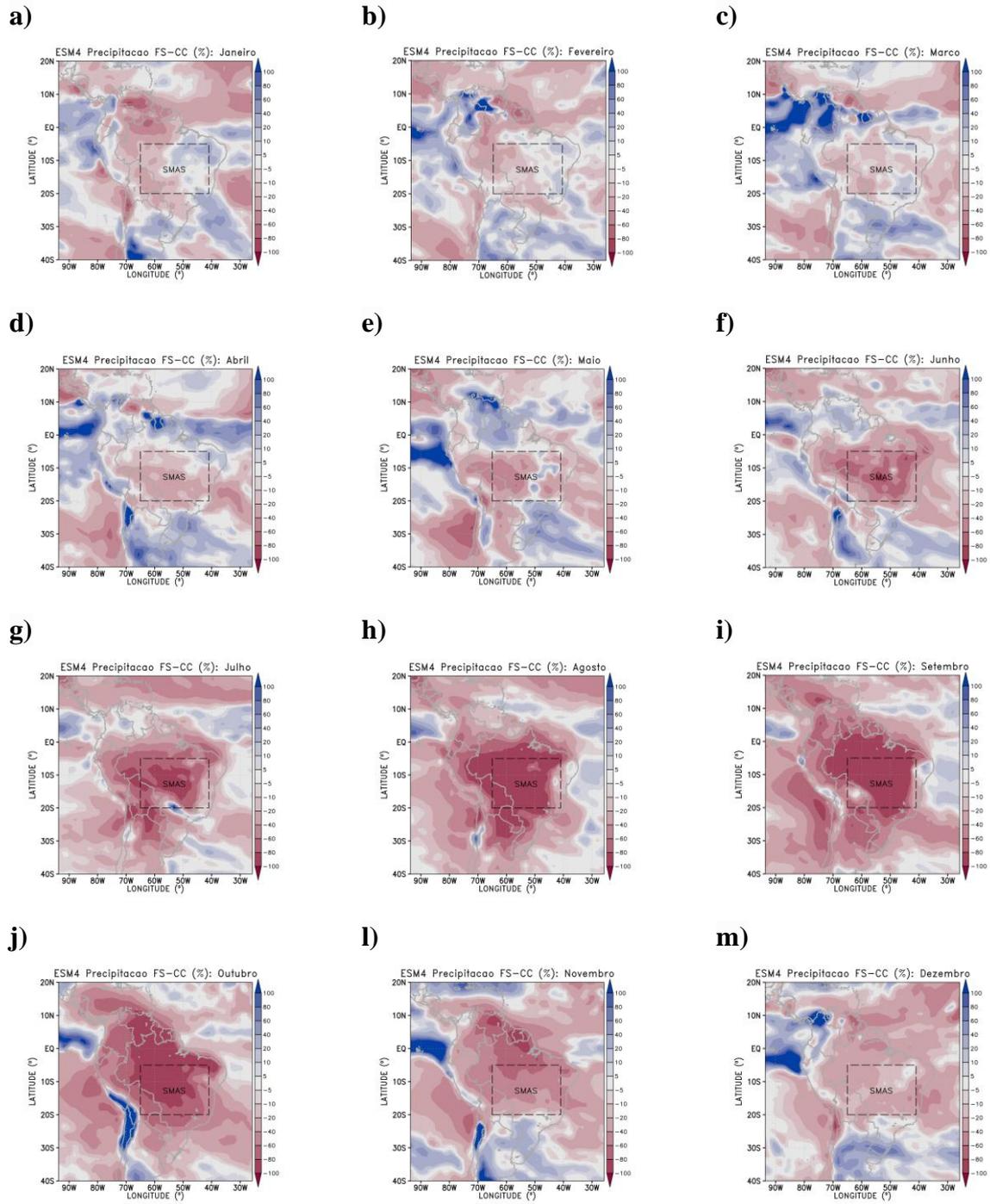
Sena e Magnúsdóttir (2019) apontam, através das análises com base no *Community Earth System Model Large Ensemble* (CESM-LENS), que o sistema de monção sul-americana tem uma estação chuvosa mais curta em comparação com as observações. No entanto, ao contrário das projeções dos modelos do GFDL aqui apresentadas, tanto o início quanto o final da estação chuvosa sobre a América do Sul são adiados nas projeções futuras do CESM-LENS. Como resultado, os autores assinalam para o final do século XXI uma estação chuvosa ligeiramente mais longa e, portanto, comparadas com o clima atual, as projeções para o centro e o sudeste do Brasil seriam mais úmidas, como resultado da convergência de umidade a partir do fortalecimento do jato de baixos níveis e do enfraquecimento da ASAS.

**Figura 19:** Mudança projetada na precipitação (%) pelo CM4 para clima do final do século XXI em relação ao clima corrente de janeiro a dezembro (a-m), respectivamente. Área do SMAS demarcada por um retângulo tracejado.



Fonte: Próprio autor.

**Figura 20:** Idem Figura 19, exceto que para o ESM4.



Fonte: Próprio autor.

Observa-se, nas Figuras 21 e 22, a diferença na climatologia do final do século entre a precipitação e a evapotranspiração (P-E) para os meses de janeiro a dezembro, onde as áreas sombreadas com cores quentes (frias) indicam maiores (menores) valores para a precipitação em comparação com a evapotranspiração para os modelos CM4 (Figura 20a-m) e ESM4 (Figura 21a-m).

Nas Figuras 20 e 21a-c e m, a precipitação supera a evapotranspiração no continente na área do SMAS entre os meses de dezembro a março. A partir de maio até setembro tanto para o CM4 quanto para o ESM4 (Figuras 21 e 22 d-i), a evapotranspiração excede a precipitação na área do SMAS, no entanto em abril (Figuras 21 e 22 d), o ESM4 apresenta maiores valores de precipitação em comparação com os de evapotranspiração na parte norte do SMAS, enquanto o CM4 tem quase toda área com valores negativos.

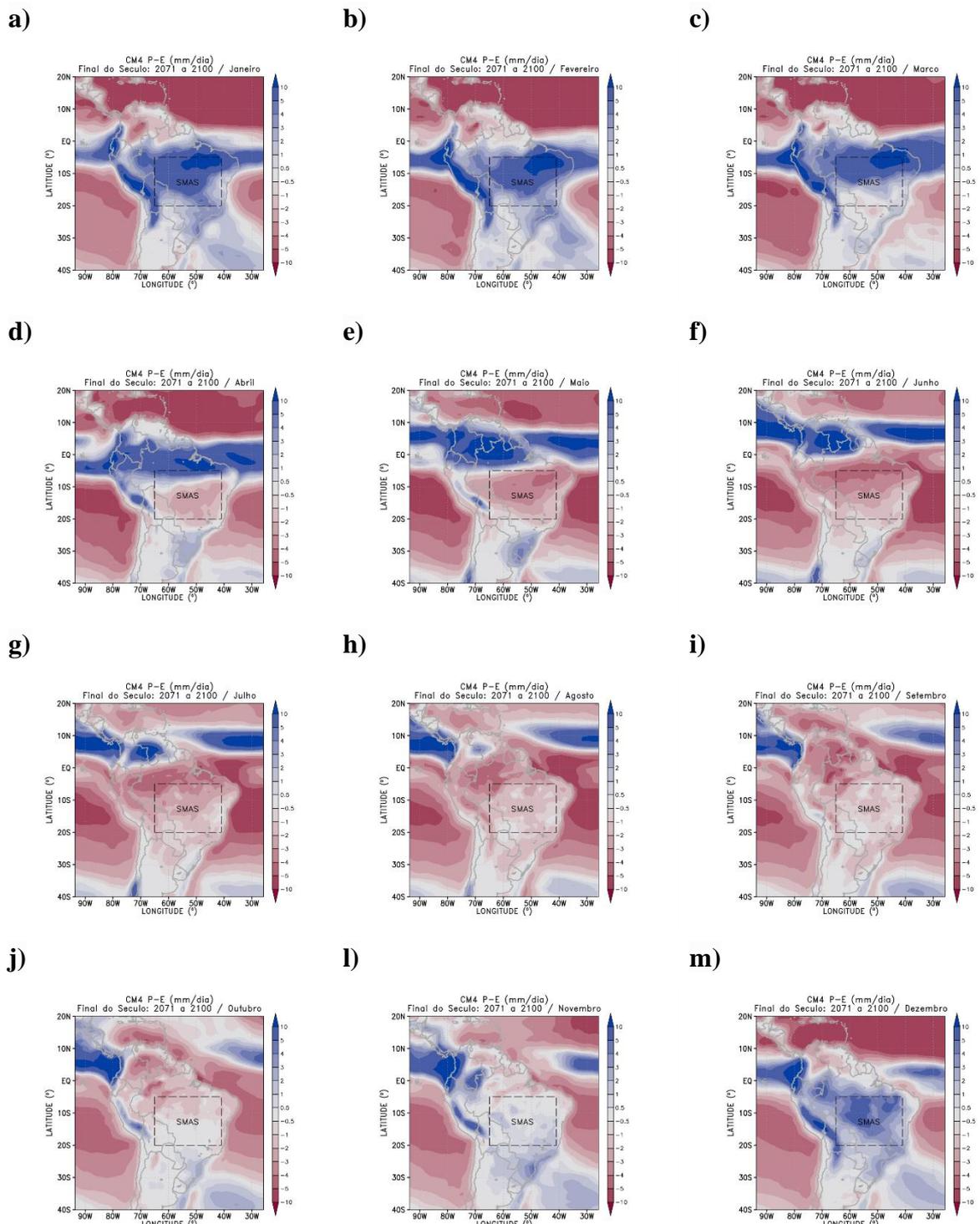
Portanto, no período ativo da monção se observa, principalmente em janeiro, fevereiro e março (Figuras 21 e 22a-c) que a precipitação está sempre com níveis maiores do que a evapotranspiração, pois é um período chuvoso, sendo que o oposto ocorre no inverno, período seco em que a evaporação supera a precipitação. Vale destacar que o oceano está evaporando durante no período ativo da monção em toda extensão visível das figuras no Atlântico Norte, com a temperatura mais elevada nesta fase.

Na comparação com o clima corrente dos modelos na área do SMAS (Figuras 14 e 15), observa-se, para o mês de outubro, na climatologia do final do século (Figuras 21 e 22j), um ligeiro aumento em área dos valores negativos de P-E, em relação aos próximos de zero no clima corrente, principalmente no ESM4, em que a evapotranspiração se aproxima da precipitação. Em conjunto, isso sugere uma menor contribuição para a variação da água no solo no início da fase ativa do SMAS no clima corrente do que no do final do século XXI, este último exibindo uma possível redução do fluxo de água para o solo no mesmo período.

O estudo de BAKER *et al.* (2022) avaliou as interações solo-atmosfera em escalas de tempo anuais a sazonais sobre a América do Sul, identificado as principais características dessas interações na América do Sul. Os autores constataram que modelos e satélites discordam sobre a intensidade e direção dessas interações, sendo que vieses de precipitação e deturpação de processos que controlam a umidade do solo estão implicados como prováveis fatores. Como resultado, os autores concluíram que o estudo poderia indicar onde a melhoria na representação dos processos de superfície pelo modelo reduziria a incerteza na resposta climática modelada às mudanças no uso da terra e destacaram onde os vieses do modelo

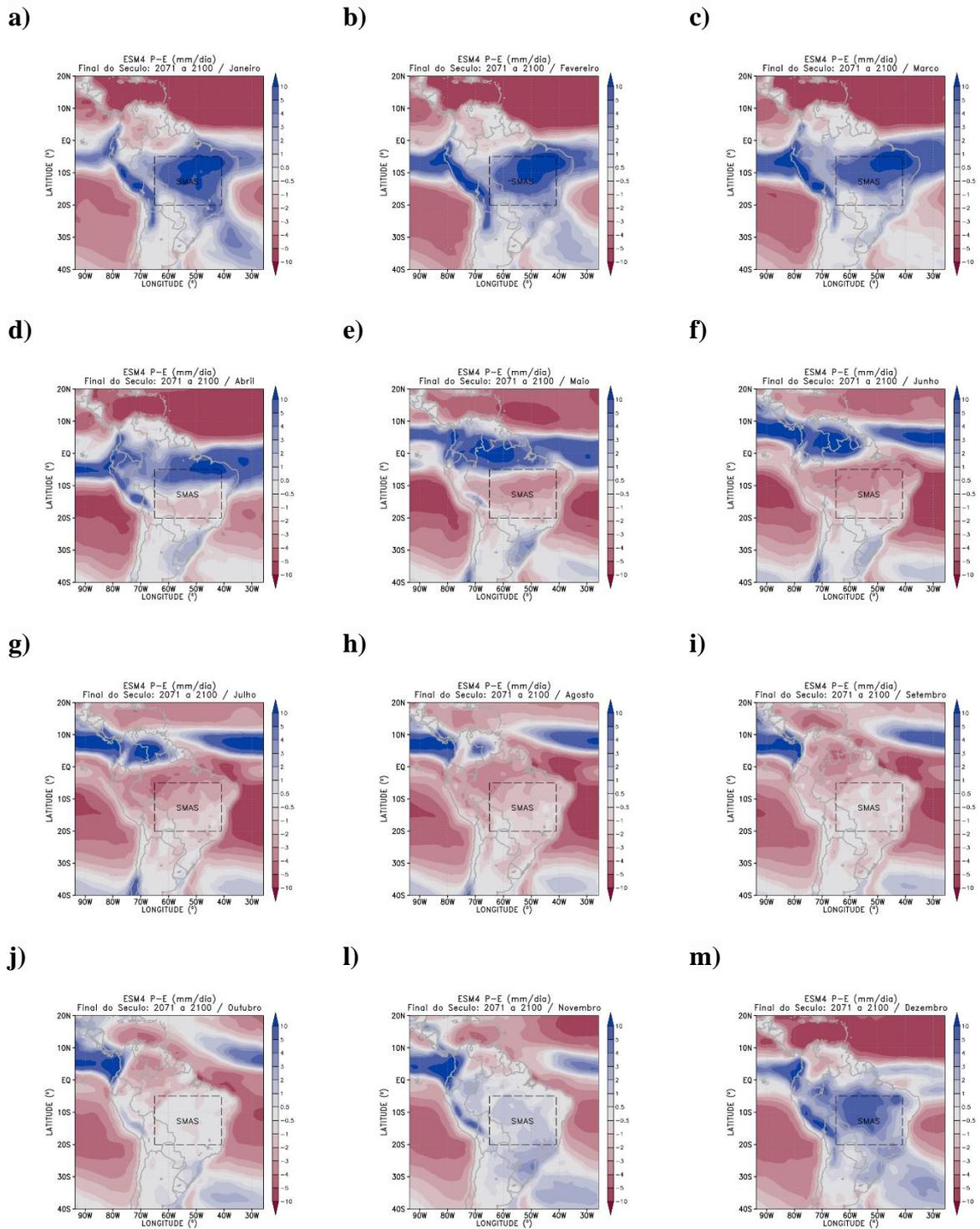
poderiam amplificar de forma irreal as tendências de secagem ou umedecimento nas projeções climáticas. Portanto, torna-se importante uma avaliação mais apurada para o estudo da evapotranspiração conjuntamente com a precipitação.

**Figura 21:** Diferença entre precipitação e evapotranspiração (P-E) no clima do final do século XXI em mm/dia para o CM4, de janeiro a dezembro (a-m), respectivamente. Área do SMAS demarcada por um retângulo tracejado.



Fonte: Próprio autor.

**Figura 22:** Idem Figura 21, exceto que para o ESM4.



Fonte: Próprio autor.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente estudo foram analisadas as projeções climáticas para o final do século XXI (1971-2100) na região central da América do Sul, cuja sazonalidade da precipitação é mais notável, ou seja, a região do SMAS. Para isso, foram utilizados os resultados das integrações numéricas de dois dos modelos climáticos globais que fazem parte do experimento CMIP6, especificamente: GFDL-CM4 e GFDL-ESM4. Ambas as projeções indicaram mudanças na variabilidade intrasazonal da precipitação na região associada ao SMAS, quando utilizado o cenário mais extremo (CMIP6-SSP5-8.5). Foram também realizadas comparações dos resultados dos dois modelos com produtos com base nas observações, a partir da climatologia dos seguintes períodos históricos: passado recente (1955-1984) e clima corrente (1985-2014).

Uma avaliação dos dois modelos, quanto a representatividade espacial da climatologia da precipitação na região do SMAS ao longo dos doze meses, foi realizada através do Diagrama de Taylor. Os resultados demonstram que o CM4 está mais apto a representar a precipitação associada ao SMAS no clima corrente, onde o ESM4 se distancia um pouco mais dos resultados observados em comparação com o CM4, sendo a análise com base nas observações e a reanálise global (UDEL e ERA5, respectivamente) as mais próximas da referência (OBS, computada a partir dos acumulados mensais do GPCC) como esperado.

Também foi feita uma avaliação do ciclo anual da precipitação na região do SMAS através de uma média climatológica e de *Boxplots*. Os resultados encontrados corroboram as diferenças entre as climatologias da precipitação, ou seja, ambos indicam uma redução do período chuvoso, o que favorece áreas com temperaturas mais elevadas no futuro. Verificou-se a ocorrência de um atraso no começo do SMAS, sendo que a diferença entre o clima corrente e o clima do passado recente exibe um aumento da temperatura e uma diminuição da precipitação a partir dos meses do inverno austral, tanto nos dados observados quanto nos modelos, na região que engloba a monção da América do Sul.

Observou-se que há um aumento da temperatura climatológica, visto a partir das diferenças entre o clima do passado recente e clima corrente, e entre o final do século e o clima corrente. No final do século, também se observa uma diminuição da precipitação em diversos meses o que gera um aumento da temperatura na área do SMAS, tanto no CM4 como no ESM4, em relação ao clima corrente. Ambos os modelos exibem um aumento bastante

acentuado da temperatura no clima do final do século XXI, especialmente na parte oeste do SMAS nos meses de inverno e primavera, estendendo-se para leste até englobar boa parte da região delimitada como SMAS em novembro.

Tanto no ESM4 quanto no CM4, a precipitação diminui em todos os períodos analisados na maior parte ou em toda a região do SMAS em relação clima do passado recente, o mesmo ocorrendo no clima do final do século em relação ao clima corrente.

As projeções dos modelos chegam a constatações de maior vulnerabilidade ao risco de extremos, com a temperatura para o final do século, ultrapassando um aumento climatológico de 9 °C em algumas áreas no CM4, e uma diminuição de precipitação de mais de 90% para os modelos CM4 e ESM4 em relação ao clima corrente na região do SMAS, considerando o cenário mais severo.

A partir das projeções dos dois modelos do GFDL que utilizaram o cenário extremo do CMIP6, observa-se, para o final do século XXI, uma resposta mais complexa com temperaturas elevadas em relação ao clima corrente e uma redução da precipitação na região do SMAS é projetada principalmente para o inverno e a primavera, sendo a primavera a estação do ano que marca o início da fase ativa (chuvosa) do SMAS. Isso indicaria que a influência antrópica pode levar a mudanças irreversíveis no clima da América do Sul, no evento das emissões de gases do efeito estufa não sofrerem uma redução nos próximos anos.

## 5.1. TRABALHOS FUTUROS

Devido à relevância do Sistema de Monção da América do Sul para a manutenção dos recursos hídricos da América do Sul, recomenda-se, a partir do estudo aqui iniciado, que as próximas análises envolvam outros produtos observacionais, modelos numéricos atmosféricos acoplados e os de hidrologia de superfície de diferentes instituições de pesquisa em futuros estudos sobre a variabilidade dos campos das variáveis diretamente associadas ao ciclo hidrológico, assim como as mudanças projetadas para o final do século XXI no hidroclima da região em foco.

## 6. REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, V.; MARTON, E.; NUNES, A. M. B. Assessing the ability of three global reanalysis products to reproduce South American monsoon precipitation. **Atmosfera**, v. 31, n. 1, p. 1-10, 2018. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>.

ALMAZROUI, M.; ASHFAQ, M.; ISLAM, MN.; RASHID, U. I.; KAMIL.; ABID, MUHAMMAD ADNAN.; O'BRIEN, ENDA.; ISMAIL, M.; REBOITA, M. S.; SÖRENSON, ANNA, A.; ARIAS, P, A.; LINCOLN MUNIZ ALVES, TIPPETT, M. K.; SAEED, SAJJAD.; REIN HAARSMA, DOBLAS-REYES, FRANCISCO J.; SAEED, FAHAD.; KUCHARSKI, F.; NADEEM, IMRAN.; SILVA-VIDAL, YAMINA.; RIVERA, JUAN A.; EHSAN, MUHAMMAD. AZHAR.; MARTÍNEZ-CASTRO, DANIEL.; MUÑOZ, Á. G.; ALI, M ARFAN.; COPPOLA, E.; SYLLA, M. BAMBA. Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America. **Earth Systems and Environment**. v. 5, p. 155–183, 2021. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>.

ARTEAGA, V. L.; LIMA, C. H. R. Analysis of CMIP5 simulations of key climate indices associated with the South America monsoon system. **International Journal of Climatology**, v. 41, n 1, p. 404-422, 2020. <https://doi.org/10.1002/joc.6627>.

BAKER, J. C. A, CASTILHO, D, D. S.; KUBOTA, P. Y.; BUERMANN, W.; COELHO, C. A. S.; ANDREWS, M. B.; GLOOR, M.; GARCIA-CARRERAS, L.; FIGUEROA, S. N.; SPRACKLEN, D. V. An assessment of land–atmosphere interactions over South America using satellites, reanalysis, and two global climate models. **Journal of Hydrometeorology**, 22 (4), 905-922, 2021. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0132.1>.

BOERS, N.; MARWAN, N.; BARBOSA, H. M. J.; KURTHS, J. A deforestation-induced tipping point for the South American monsoon system. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 41489, 25 jan. 2017. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/srep41489>>.

BOERS, N.; RHEINWALT, A.; BOOKHAGEN, B.; BARBOSA, H. M. J.; MARWAN, N.; MARENGO, J.; KURTHS, J. The South American rainfall dipole: A complex network analysis of extreme events. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 20, p. 7397–7405, 28 out. 2014. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/2014GL061829>>.

BOMBARDI, R. J.; CARVALHO, L. M. V. Variabilidade do Regime de Monções Sobre o Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 23, 58-72, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862008000100007>.

CALEY, T.; ROCHE, D. M.; RENSSSEN, H. Orbital Asian summer monsoon dynamics revealed using an isotope-enabled global climate model. **Nature Communications**, v. 5, n. 1, p. 5371, 6 nov. 2014. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/ncomms6371>>.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; POSADAS, A. N. D.; QUIROZ, R.; BOOKHAGEN, B.; LIEBMANN, B. Precipitation Characteristics of the South American Monsoon System Derived from Multiple Datasets. **Journal of Climate**, 25(13), 4600-4620, 2012. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00335.1>.

CHEN T. Maintenance of summer monsoon circulations: A planetary-scale perspective. **Journal of Climate**, 16, 2022-2037, 2003. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<2022:MOSMCA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<2022:MOSMCA>2.0.CO;2).

CHENG, J.; WU, H.; LIU, Z.; GU, P.; WANG, J.; ZHAO, C.; LI, Q.; CHEN, H.; LU, H.; HU, H.; GAO, Y.; YU, S. Vegetation feedback causes delayed ecosystem response to East Asian Summer Monsoon Rainfall during the Holocene. **Nature Communications**, 12, 18-43, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22087-2>.

CMIP5 historical simulation. **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 4, p. 1613–1642, 24 abr. 2019. Disponível em: <<https://gmd.copernicus.org/articles/12/1613/2019/>>.

COLA. The Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies: GrADS. 2018. Disponível em: <http://cola.gmu.edu/grads/>. Acesso em 20 de jun. de 2020.

CORREA, I.; ARIAS, P. A.; MAISA ROJAS. Evaluation of multiple indices of the South American monsoon. **International Journal of Climatology**. V. 41, p. E2801-E2819, 2020. <https://doi.org/10.1002/joc.6880>.

CUI, J.; PIAO, S.; HUNTINGFORD, C.; WANG, X.; LIAN, X.; CHEVUTURI, A.; TURNER, A. G.; KOOPERMAN, G. J. Vegetation forcing modulates global land monsoon and water resources in a CO<sub>2</sub>-enriched climate. **Nature Communications**, v. 11, n. 1, p. 5184, 14 dez. 2020. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41467-020-18992-7>>.

DEVARAJU, N.; BALA, G.; MODAK, A. Effects of large-scale deforestation on precipitation in the monsoon regions: Remote versus local effects. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 11, p. 3257–3262, 17 mar. 2015. Disponível em: <<https://pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1423439112>>.

DUNNE, J. P.; HOROWITZ, L. W.; ADCROFT, A. J.; GINOUX, P.; HELD, I. M.; JOHN, J. G. The GFDL Earth System Model Version 4.1 (GFDL-ESM 4.1): Overall coupled model description and simulation characteristics. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 12, p. 1-56, 2020. <https://doi.org/10.1029/2019MS002015>.

EIRAS-BARCA, J.; DOMINGUEZ, F.; YANG, Z.; CHUG, D.; NIETO, R.; GIMENO, L.; MIGUEZ-MACHO, G. Changes in South American hydroclimate under projected Amazonian deforestation. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1472, n 1, p. 104-122, 2020.

GAN, M. A.; KOUSKY, V. E.; ROPELEWSKI, C. F. The South America monsoon circulation and its relationship to rainfall over west-central Brazil. **Journal of Climate**, 17, 47-66, 2004.

GAN, M. A.; SANTOS L. F.; LIMA, J. R. A.; AFONSO, J. M. S.; SILVA, A. B. Monção da América do Sul. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – CPTEC/INPE, São José dos Campos, 2016. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/revista/pdf/30anos/ganetal.pdf>. Acesso em 10 de jul. de 2021.

GELARO, R.; MCCARTY, W.; SUÁREZ, M. J.; TODLING, R.; MOLOD, A.; TAKACS, L.; RANGLES, C. A.; DARMENOV, A.; BOSILOVICH, M. G.; REICHLE, R.; WARGAN, K.; COY, L.; CULLATHER, R.; DRAPER, C.; AKELLA, S.; BUCHARD, V.; CONATY, A.; DA SILVA, A. M.; GU, W.; KIM, G.; KOSTER, R.; LUCCHESI, R.; MERKOVA, D.; NIELSEN, J. E.; PARTYKA, G.; PAWSON, S.; PUTMAN, W.; RIENECKER, M.; SCHUBERT, S. D.; SIENKIEWICZ, M.; ZHAO, B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), **Journal of Climate**, v. 30, p. 5419-5454, 2017. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>.

GRIMM, A. M.; SABOIA, J. P. J. Interdecadal Variability of the South American Precipitation in the Monsoon Season. **Journal of Climate**, 28(2), 755-775, 2015. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau3191>.

GRIFFIES, S. M.; ADCROFT, A.; HALLBERG, R. W. A primer on the vertical Lagrangian-remap method in ocean models based on finite volume generalized vertical coordinates. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, 12, e2019MS001954, 2020. <https://doi.org/10.1029/2019MS001954>.

GOMES, G. D.; NUNES, A. M. B.; LIBONATI, R.; AMBRIZZI, T. Projections of subcontinental changes in seasonal precipitation over the two major river basins in South America under an extreme climate scenario. **Climate Dynamics**, 58, 1147–1169, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05955-x>.

GUO, HUAN.; JOHN, JASMIN G.; BLANTON, CHRIS.; MCHUGH, COLLEEN.; NIKONOV, SERGUEI.; RADHAKRISHNAN, APARNA.; RAND, KRISTOPHER.; ZADEH, NIKI T.; BALAJI, V.; DURACHTA, JEFF.; DUPUIS, CHRISTOPHER.; MENZEL, RAYMOND.; ROBINSON, THOMAS.; UNDERWOOD, SETH.; VAHLENKAMP, HANS.; BUSHUK, MITCHELL.; DUNNE, KRISTA A.; DUSSIN, RAPHAEL.; GAUTHIER, PAUL P. G.; GINOUX, PAUL.; GRIFFIES, STEPHEN M.; HALLBERG, ROBERT.; HARRISON, MATTHEW.; HURLIN, WILLIAM.; LIN, P.U.; MALYSHEV, SERGEY.; NAIK, VAISHALI.; PAULOT, FABIEN.; PAYNTER, DAVID J; PLOSHAY, JEFFREY; REICHL, BRANDON G; SCHWARZKOPF, DANIEL M; SEMAN, CHARLES J; SHAO, ANDREW; SILVERS, LEVI; WYMAN, BRUCE; YAN, XIAOQIN; ZENG, YUJIN; ADCROFT, ALISTAIR; DUNNE, JOHN P.; HELD, ISAAC M; KRASTING, JOHN P.; HOROWITZ, LARRY W.; MILLY, P.C.D; SHEVLIAKOVA, ELENA; WINTON, MICHAEL; ZHAO, MING; ZHANG, RONG. NOAA-GFDL GFDL-CM4 model output. Version YYYYMMDD. **Earth System Grid**, 2018.

HELD, I. M.; GUO, H.; ADCROFT, A., DUNNE, J. P.; HOROWITZ, L. W.; KRASTING, J.; SHEVLIAKOVA, M.; WINTON, M.; ZHAO, M.; BUSHUK, A. T.; WITTENBERG, B. WYMAN, B.; XIANG, R.; ZHANG, W.; ANDERSON, V.; BALAJI, L.; DONNER, K.; DUNNE, J.; DURACHTA, P. P. G.; GAUTHIER, P.; GINOUX, J. C.; GOLAZ, S. M.; GRIFFIES, R. HALLBERG, L. HARRIS, M. HARRISON, W. HURLIN, J. JOHN, P. LIN, S. J.; LIN, S.; MALYSHEV, R.; MENZEL, P. C. D. MILLY, Y. MING, V.; NAIK, D. PAYNTER, F.; PAULOT, V.; RAMASWAMY, B.; REICHL, T.; ROBINSON, A.; ROSATI, C.; SEMAN, L. G.; SILVERS, S.; UNDERWOOD, N.; ZADEH, N. Structure and performance of GFDL's CM4.0 climate model. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 11, p. 3691– 3727, 2019. <https://doi.org/10.1029/2019MS001829>.

JONES, C.; CARVALHO, L. M. V.; LIEBMANN, B. Forecast skill of the South American Monsoon System. **Journal of Climate**, 25 (6), p. 1883-1889, 2012. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00586.1>.

KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J.; MO, K. C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; LEETMAA, A.; REYNOLDS, R.; JENNE, R.; JOSEPH, D. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, **Bulletin of the American Meteorological Society**, 77, 437-472. 1996.

KOUSKY, V. E. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 3, 217-231, 1988.

LI, S.; OTTO, F. E. L.; HARRINGTON, L. J.; SPARROW, S. N.; WALLOM, D. C. H. A pan-South-America assessment of avoided exposure to dangerous extreme precipitation by limiting to 1.5 °C warming. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 5, p. 054005, 1 maio 2020. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab50a2>>.

MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, v. 22, p. 83-96, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200006>.

MARENGO, J. A.; B. LIEBMANN, A. M.; GRIMM, V.; MISRA, P. L.; SILVA, D. I. F. A.; CAVALCANTI, L. M. V.; CARVALHO, E. H.; BERBERY, T.; AMBRIZZI, C. S.; VERA, A. C.; SAULO, J.; NOGUES-PAEGLE, E.; ZIPSER, A.; SETH, L. M. A. Recent developments in the South American monsoon system. v. 32, p 1-32, 2012. <https://doi.org/10.1002/joc.2254>.

MARTINS, G. Introdução ao Grid Analysis and Display System (GrADS) (2014). Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/04.14.17.39/doc/publicacao.pdf?metadatarpository=&mirror=iconet.com.br/banon/2006/11.26.21.3110.13140/RG.2.1.2594.2249>. Acesso em: 10 de Jan de 2021.

MEARNS, L. O.; ARRITT, R.; BINER, S.; BUKOVSKY, M. S.; MCGINNIS, S.; SAIN, S.; CAYA, D.; CORREIA JR., J.; FLORY, D.; GUTOWSKY, W.; TAKLE, E. S.; JONES, R.; LEUNG, R.; MOUFOUMA-OKIA, W.; MCDANIEL, L.; NUNES, A. M. B.; QIAN, Y.; ROADS, J.; SLOAN, L.; SNYDER, M. The North American Regional Climate Change Assessment Program. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 9, p. 1337–1362, mar. 2012. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/BAMS-D-11-00223.1>>.

MEEHL, G. A.; COVEY, C.; MCAVANEY, B.; LATIF, M.; STOUFFER, R. J. MEETING SUMMARIES Overview of the coupled model intercomparison project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 86, n. 1, p. 89–96, jan. 2005. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-86-1-89>>.

MENDES, C. L. T.; SOARES, A. G. Circulação nos oceanos: Correntes oceânicas e massas d'água. Departamento de Biologia Marinha, UFF 2007. Disponível em <http://www.uff.br/ecosed/Correntes.pdf>. Acesso em: 10 de jun. de 2021.

MIGUEL, J. C. H.; MAHONY, M.; MONTEIRO, M. S. A. A “geopolítica infraestrutural” do conhecimento climático: o Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre e a divisão Norte-Sul do conhecimento. **Sociologias**, 21, 44-75, 2019. <https://doi.org/10.1590/15174522-0215102>.

MOOZHUPURATH, R. K.; KRAFT, L. Implications of monsoon season and UVB radiation for COVID-19 in India. **Scientific Reports**, 11, 27-57, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82443-6>.

NOVELLO, V.; CRUZ, F.; VUILLE, M.; STRÍKIS, N. M. EDWARDS, R.; LAWRENCE.; CHENG, H.; EMERICK, S.; PAULA, M. S.; LI.; BARRETO, E. S.; KARMANN, I.; SANTOS, R. V. A high-resolution history of the South American Monsoon from Last Glacial Maximum to the Holocene. **Scientific Reports**, 7, 1-8, 2017. <https://doi.org/10.1038/srep44267>.

NUNES, A.; BARROS, I.; PEREIRA, R.; CAMARINHA, C. Advances in the downscaling of extreme hydro-events in South America. **Joint WCRP-WWRP Symposium on Data Assimilation and Reanalysis, virtual**, sciencesconf.org:symp-bonn2021:355649, 2021.

NUNES, A. M. B. Satellite-enhanced dynamical downscaling for the analysis of extreme events, **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 121, p. 10,617-10,636, 2016. <https://doi.org/10.1002/2016JD024927>.

O'NEILL, B.; TEBALDI, C.; van VUUREN, D.; EYRING, V.; FRIEDLINGSTEIN, P.; HURTT, G.; KNUTTI, R.; KRIEGLER, E.; LAMARQUE, JF.; LOWE, J.; MEEHL, G. A.; MOSS, R.; RIAHI, K.; SANDERSON, B. M. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. **Geoscientific Model Development**. 9, p. 3461–3482, 2016. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>.

PBMC, 2013: Executive Summary: Impacts, Vulnerability and Adaptation to Climate Change. Contribution from Grupo de Trabalho 2 (GT2 – acronym for the Working Group 2) to the Primeiro Relatório de Avaliação Nacional sobre Mudança Climáticas (RAN1) of the Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC). [Assad, E.D., Magalhães, A. R. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 28 pp.

PENNA, A. C, TORRES, R. R, GARCIA, S. R, MARENGO, J. A. Moisture flows on Southeast Brazil: Present and future climate. **International Journal of Climatology**. v. 41 (Suppl. 1): E935– E951. 2021. <https://doi.org/10.1002/joc.6738>.

PEREIRA, D. P.; LIMA, J. S. de S.; XAVIER, A. C.; PASSOS, R. R.; FIEDLER, N. C. Aplicação do diagrama de Taylor para avaliação de interpoladores espaciais em atributos de solo em cultivo com eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, n. 5, p. 899–905, out. 2014. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-67622014000500014&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622014000500014&lng=pt&tlng=pt)>.

QUADRO, M. F. L.; SILVA DIAS, M. A. F.; HERDIES, D. L.; GONÇALVES, L. G. G. Análise climatológica da precipitação e do transporte de umidade na região da ZCAS através da nova geração de reanálises. **Rev. Brasileira de Meteorologia**, v. 27, p. 152–162, 2012.

RAIA, A. E. I.; CAVALCANTI, F. A. The life cycle of the South American monsoon system. **Journal of Climate**, v. 21, 6227–6246, 2008. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2249.1>.

RAMAGE, C. S. **Monsoon Meteorology**. Academic Press, New York, 296 p, 1971.

RAO, V. B.; FRANCHITO, S. H.; GAN, M. A.; GEROLAMO, R. O. P. Duration of the South America summer monsoon is increasing. **Atmospheric Science Letters**, v. 15, n. 2, p. 110–113, abr. 2014. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/asl2.476>>.

RIBEIRO, LIGIA M. A. L.; IVO, KARMANN.; BARRETO, E. S.; CHENG, HAI. R.; LAWRENCE, E.; PAULA, MARCOS. S.; SCHOLZ, D. Vegetation and environmental changes in tropical South America from the last glacial to the Holocene documented by multiple cave sediment proxies, **Earth and Planetary, Science Letters**, v. 524, 115717, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115717>.

RIENECKER, M. M.; SUAREZ, M. J.; GELARO, R.; TODLING, R.; BACMEISTER, J.; LIU, E.; BOSILOVICH, M. G.; SCHUBERT, S. D.; TAKACS, L.; KIM, G.; BLOOM, S.; CHEN, J.; COLLINS, D.; CONATY, A.; DA SILVA, A.; GU, W.; JOINER, J.; KOSTER, R. D.; LUCCHESI, R.; MOLOD, A.; OWENS, T.; PAWSON, S.; PEGION, P.; REDDER, C. R.; REICHLE, R.; ROBERTSON, F. R.; RUDDICK, A. G.; SIENKIEWICZ, M.; WOOLLEN, J. MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. **Journal of Climate**, v. 24, p. 3624–3648, 2011. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00015.1>.

SANDERSON, B.; CAVALCANTI, I. F. A. Lifecycle of South American Monsoon System simulated by CPTEC/INPE AGCM. **International Journal of Climatology**. v. 37, p. 878–896, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62888-x>.

SANTAMANS, C. D.; CORDOBA, F. E.; FRANCO, M. G.; VIGNONI, P.; LUPO, L. C. Hydro-climatological variability in Lagunas de Vilama System, Argentinean Altiplano-Puna Plateau, Southern Tropical Andes (22° S), and its response to large-scale climate forcings. **Science of the total environment** v. 767, 144926, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144926>.

SCHNEIDER, U.; BECKER, A.; FINGER, P.; MEYER-CHRISTOFFER, A.; RUDOLF, B.; ZIESE, M.: GPCP Full Data Reanalysis Version 6.0 at 0.5°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historic, 2011.

SCHNEIDER, U.; FINGER, P.; MEYER-CHRISTOFFER, A.; RUSTEMEIER, E.; ZIESE, M.; BECKER, A. Evaluating the Hydrological Cycle over Land Using the Newly-Corrected Precipitation Climatology from the Global Precipitation Climatology Centre (GPCP). **Atmosphere**, 8, 52, 2017. <https://doi.org/10.3390/atmos8030052>.

SENA, THOME, A. C.; MAGNUSDOTTIR, G. Projected End-of-Century Changes in the South American Monsoon in the CESM Large Ensemble, **Journal of Climate**, v. 33(18), p. 7859-7874, 2020. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0645.1>.

SETH, A., G. A., ROJAS, M.; RAUSCHER, S. A.; BORDONI, S.; SINGH, D.; CAMARGO, Monsoon, J. S. Responses to climate changes—connecting past, present and future. **Current Climate Change Reports**, v. 5, p. 63-79, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40641-019-00125-y>.

SIFEDDINE, A.; CHIESSI, C. M. FRANCISCO.; JÚNIOR, W. C. et al. Capítulo 4 - Informações Paleoclimáticas Brasileiras. 2015. Disponível em: [http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos\\_publicos/GT1/GT1\\_volume\\_completo\\_cap4.pdf](http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos_publicos/GT1/GT1_volume_completo_cap4.pdf). Acesso em 03 de mar. de 2020.

SOUZA, E. B. APOSTILA DO CURSO DE EXTENSÃO ORGANIZADO PELA COORDENAÇÃO DO COLEGIADO DE METEOROLOGIA BELÉM – PA 9 A 13 DE

FEVEREIRO DE, 2004. Disponível em: <http://dca.iag.usp.br/material/ritaynoue/aca-0522/referencias/apostilagrads.pdf>. Acesso em: 10 de abr. de 2020.

TAYLOR, K. E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. **Journal of Geophysical Research**. v. 106, p. 7183–7192, 2001. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>.

TRENBERTH, K. E. The Definition of El Niño. **Bulletin of the American Meteorological Society**. v. 178, p. 2771-2777, 1971. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078%3C2771:TDOENO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078%3C2771:TDOENO%3E2.0.CO;2).

VEIGA, S. F.; NOBRE, P.; GIAROLLA, E.; CAPISTRANO, V.; BAPTISTA JR., M.; MARQUEZ, A. L.; FIGUEROA, S. N.; BONATTI, J. P.; KUBOTA, P.; NOBRE, C. A. The Brazilian Earth System Model ocean–atmosphere (BESM-OA) version 2.5: evaluation of its CMIP5 historical simulation. **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 4, p. 1613–1642, 24 abr. 2019. Disponível em: <<https://gmd.copernicus.org/articles/12/1613/2019/>>.

WADE, L. Chasing South America's monsoon. **Science**, v. 346, n. 6213, p. 1042–1043, 28 nov. 2014. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/10.1126/science.346.6213.1042>>.

WANG, B.; BIASUTTI, M.; BYRNE, M. P.; CASTRO, C.; CHANG, C.; COOK, K.; FU, R.; GRIMM, A. M.; HA, K.; HENDON, H.; KITO, A.; KRISHNAN, R.; LEE, J.; LI, J.; LIU, J.; MOISE, A.; PASCALE, S.; ROXY, M. K.; SETH, A.; SUI, C.; TURNER, A.; YANG, S.; YUN, K.; ZHANG, L.; ZHOU, T. Monsoons Climate Change Assessment. **Bulletin of the American Meteorological Society**. v. 102, p. E1-E19, 2021. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0335.1>.

WCRP. *World Climate Research Programme, 2021*. Disponível em: <https://www.wcrp-climate.org/>. Acesso em: 10 de mai. de 2021.

WEBSTER, P. J.; MAGANA, V. O.; PALMER, T. N.; SHUKLA, J.; TOMAS, R. A.; YANAI, M.; YASUNARI, T. Monsoons: processes, predictability, and the prospects for

prediction. **Journal of Geophysical Research: Oceans**. v. 103, p. 14451–14510, 1998. <https://doi.org/10.1029/97JC02719>.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**, International Geophysics series, v. 100, 3rd ed. Academic Press, Oxford, 2011.

WILLMOTT C. J.; MATSUURA K. (2001) Terrestrial Air Temperature and Precipitation: Monthly and Annual Time Series (1950-1999) (Version 1.02) [WWW Document]. Cent. Clim. Res. Dep. Geogr. Univ. Delaware. Disponível em: <[http://climate.geog.udel.edu/~climate/html\\_pages/README.ghcn\\_ts2.html](http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/README.ghcn_ts2.html)>. Acesso em 22 de set. 2020.

YIM, SY.; WANG, B.; LIU, J. A comparison of regional monsoon variability using monsoon indices. **Climate Dynamics**. v. 43, p. 1423–1437, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1956-9>.

YIN, L., FU, R.; SHEVLIAKOVA, E. DICKINSON, R. E. How well can CMIP5 simulate precipitation and its controlling processes over tropical South America? **Climate Dynamics**. v. 41, p. 3127–3143, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1582-y>.

YONGKANG, X.; DE SALES, F.; LI, W.; MECHOSO, C.; JUANG, HM. Role of Land Surface Processes in South American Monsoon Development. **Journal of Climate**. p. 742 – 762, 2006. <https://doi.org/10.1175/JCLI3667.1>.

ZHOU, J.; LAU, K. M. Does a Monsoon Climate Exist Over South America? **Journal of Climate**. 11, 1020-1040, 1998. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011%3C1020:DAMCEO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011%3C1020:DAMCEO%3E2.0.CO;2).

ZHOU, T.; LU, J.; ZHANG, W.; CHEN, Z. The Sources of Uncertainty in the Projection of Global Land Monsoon Precipitation. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 15, 16 ago. 2020. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020GL088415>>.