



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Projeções climáticas de precipitação e temperatura na Região Metropolitana do Vale do Paraíba – SP simulados por modelos climáticos do CMIP6

Ricardo Brambila Bosco¹, María Cleofé Valverde²

¹Doutorando em Desastres, do Instituto de Ciência e Tecnologia Universidade Estadual de São Paulo e Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (UNESP/CEMADEN). Orcid: 0000-0002-4489-7150. E-mail: ricardobrb@hotmail.com

²Prof. Drª. Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do ABC (UFABC). Orcid: 0000-0003-1439-5325. E-mail: maria.brambila@ufabc.edu.br

Artigo recebido em 31/10/2021 e aceito em 17/05/2022

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo investigar as mudanças de temperatura e precipitação simuladas por modelos climáticos de alta resolução do CMIP6 (CNRM-CM6-1-HR, EC-EARTH3 e MPI-ESM1-HR) para dois cenários de emissões (SSP2 4.5, SSP5 8.5) na Região Metropolitana do Vale do Paraíba no Estado de São Paulo. A região foi dividida em quatro sub-regiões: Sub-região 1 – São José dos Campos, Sub-região 2 – Taubaté, Sub-região 3 – Guaratinguetá e Sub-região 4 – Cruzeiro. Com base nos dados observados (1961-2014) a Sub-região 1 se caracterizou como a mais quente e a menos chuvosa em relação às outras sub-regiões. A variabilidade interanual da precipitação e temperatura, mostrou para as 4 sub-regiões, tendências significativas de diminuição e aumento, respectivamente, segundo o teste de Man-Kendall. Para as projeções futuras, houve consenso nos modelos climáticos utilizados, para tendências significativas de aumento da temperatura, considerando o período 2015-2100, semelhante ao observado. A Sub-região 3 – Guaratinguetá deve apresentar o maior aquecimento de 4,8°C, em relação à climatologia simulada, para o cenário mais extremo SSP5 8.5. Em relação à precipitação, não houve consenso pelos modelos, somente o modelo MPI-ESM1-HR mostrou tendência significativa de aumento no período de 2041-2070, nas Sub-regiões 1 e 4 e para o cenário SSP2 4.5. Já para o cenário SSP5 8.5, as tendências significativas de aumento foram somente para o período 2071-2100 e para as sub-regiões 1, 3, e 4. Destaca-se que ainda a simulação da precipitação se constitui em um grande desafio, as incertezas são altas, e a validação dos modelos climáticos é sempre recomendável.

Palavras-chave: CMIP6, Mudanças climáticas, Extremos, Região Metropolitana do Vale do Paraíba.

Climate projections of precipitation and temperature in the Metropolitan Region of Vale do Paraíba- SP simulated by climate models from CMIP6

ABSTRACT:

This work aimed to investigate the temperature and precipitation changes simulated by CMIP6 high-resolution climate models (CNRM-CM6-1-HR, EC-EARTH3 and MPI-ESM1-HR) for two emission scenarios (SSP2 4.5, SSP5 8.5) in the Metropolitan Region of Vale do Paraíba in the State of São Paulo. The region was divided into four sub-regions: Sub-region 1 – São José dos Campos, Sub-region 2 – Taubaté, Sub-region 3 – Guaratinguetá and Sub-region 4 – Cruzeiro. Based on the observed data (1961-2014), Sub-region 1 was the hottest and least rainy concerning the other sub-regions. According to the Man-Kendall test, the interannual variability of precipitation and temperature showed, for the four sub-regions, significant trends of decrease and increased, respectively. For future projections, there was consensus in the climate models used, for significant trends in temperature increase, considering the period 2015-2100, similar to that observed. Sub-region 3 – Guaratinguetá should present the most significant warming of 4.8°C, concerning the simulated climatology, for the most extreme scenario SSP5 8.5. About precipitation, was no consensus by the models, and only the MPI-ESM1-HR model showed a significant tendency to increase in the period 2041-2070, in Sub-regions 1 and 4 and for the SSP2 4.5 scenario. As for the SSP5 8.5 scenario, the significant increasing trends were only for 2071-2100 and sub-regions 1, 3, and 4. It is noteworthy that the simulation of precipitation is still a considerable challenge uncertainty is high, and validation of climate models is always recommended.

Keywords: CMIP6, Climate change, Extremes, Metropolitan Region of Vale do Paraíba.

Introdução

A expansão urbana nas regiões de grande crescimento demográfico, socioeconômico e urbanístico como as regiões metropolitanas, evidencia um quadro de positividade como acesso a informações, bens e serviços, mas também de grandes desafios, por exemplo, ordenamento do território, passivos ambientais, dentre outros.

A sociedade brasileira experimentou um intenso processo de urbanização, especialmente na segunda metade do século XX, onde em 1940 a população que vivia nas cidades era de um pouco menos de 12,5 milhões de pessoas (que corresponde a aproximadamente 31% do total da população do país); em 2000, esse número chega a 138 milhões, correspondendo a 81,2% e em 2017 chega a 160 milhões de habitantes, correspondendo a 84,4% da população brasileira (Maricato e Colosso, 2020 p. 278).

Segundo o Censo de 2010 realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, a região Sudeste é a mais urbanizada do país, com uma taxa de 92,9%, com destaques para os estados do Rio de Janeiro e São Paulo com os maiores graus de urbanização, sendo de 96,7% e 95,9%, respectivamente (CENSO DEMOGRÁFICO IBGE, 2010).

Estudos afirmam que, embora eventos extremos de tempo e clima, como chuvas intensas, secas, entre outros, possam fazer parte de uma variabilidade natural, os mesmos podem causar perturbações e impactos significantes nas cidades, no ambiente e na sociedade, mesmo em regiões com maior capacidade de adaptação econômica e social, como nas grandes capitais do Brasil (Nobre et al., 2011; Cavalcanti et al., 2017). Estes autores sustentam também que devido ao aquecimento global, originado pelas mudanças climáticas, a frequência e a intensidade dos extremos de precipitação aumentaram no mundo, e que as áreas urbanas em rápido crescimento, especialmente nos países em desenvolvimento, provavelmente sofrerão impactos diferenciados dessas mudanças, devido aos seus fatores político-econômicos (Cavalcanti et al., 2017).

A intensidade e frequência das mudanças do clima, e também a capacidade dos grupos sociais para lidar e/ou superar as adversidades causadas pelos impactos, são fatores relevantes na avaliação dos extremos, informando os riscos socioambientais envolvidos e preparando medidas de mitigação e adaptação, e consequentemente, tornando a sociedade menos vulnerável (TURNER II et al., 2003; IPCC, 2014a).

As áreas urbanas na América Latina são pontos críticos de vulnerabilidade a inundações, ondas de calor, deslizamentos de terra e outros perigos que se espera que a mudança climática agrave (NOBRE et al., 2011). Alguns autores esclarecem que no Brasil, os efeitos de chuvas intensas e com período de curta duração - que estão entre os eventos extremos mais destrutivos – que podem causar inundações e deslizamentos de terra, em qualquer estação sazonal, com destaque para a região sudeste do país, constituindo uma ameaça potencial a população, infraestruturas e ao ambiente (Marengo & Alves, 2012; Valverde, 2017; Marengo et al., 2020).

Os riscos de ameaças existentes, como inundações, deslizamentos de terra, ondas de calor e limitações de fornecimento de água potável, tendem a aumentar, devido às mudanças intensas no ciclo hidrológico, causadas pelo aquecimento global (PBMC, 2016, p. 3).

O recente relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças do Clima (AR6 *Climate Change 2021: The Physical Science Basis - IPCC*) – lançado em agosto de 2021 (IPCC, 2021) é claro em afirmar que as mudanças projetadas para os extremos de clima serão maiores em frequência, com cada incremento adicional de aquecimento. Isto é, um evento extremo que ocorria a cada 10 anos, para um cenário de aquecimento com anomalia de 1,5 °C poderia ocorrer com uma frequência de até quatro vezes a mais a cada 10 anos, como seria o caso das ondas de calor (IPCC, 2021).

No Brasil a região Sudeste tem sido alvo de diversos estudos que focam a detecção das alterações climáticas, principalmente no que se refere à precipitação e temperatura, isso porque alterações no contexto das mudanças climáticas, dessas variáveis, podem afetar diretamente o abastecimento de água nas cidades (Calado e Valverde, 2020), a agricultura (Assad et al., 2013) e o setor hidrelétrico (Vasquez Arroyo et al., 2021).

Ainda, as grandes variabilidades espaciais do comportamento da chuva e da temperatura influenciadas pela conformação geográfica, hidrológica e geológica das cidades, fazem com que os impactos sejam diferenciados. Por esse motivo os estudos regionais adquirem alto grau de importância e relevância nos meios urbanos.

Segundo Reboita et al. (2022) a região do sudeste brasileiro é uma das regiões com maior nível de incertezas em relação as projeções climáticas, pois enquanto modelos como o modelo regional ETA, operacionalizado no CPTEC/INPE, prevê redução de precipitação no verão, o modelo regional RegCM4 indica aumento.

A área de estudo do presente trabalho é a Região Metropolitana do Vale do Paraíba (RMVP), no estado de São Paulo, sendo que nessa região ainda são poucos os estudos que focam as variabilidades e os extremos de precipitação e temperatura em um contexto de mudança climática. No entanto, essas informações são importantes, uma vez que a RMVP se destaca de outras, no estado de São Paulo por ser uma região industrial e de prestação de serviços, demandante e consumidora de energia, pelo que grandes mudanças na temperatura ou precipitação colocariam em perigo essas demandas, impactando diretamente nos setores industriais e consequentemente na qualidade de vida dos habitantes.

Santos e Fisch (2016) avaliaram para o município de Taubaté, na RMVP, as mudanças na temperatura e precipitação utilizando as simulações futuras de um modelo climático do CPTEC/INPE para o período de 2011-2100. Os resultados mostraram um aumento de 3,6 °C na temperatura do ar, e um aumento de 231 mm na precipitação acumulada anual para o intervalo de tempo de 2071-2100.

Cenários futuros de precipitação, para o período de 2011-2040, nas bacias hidrográficas de Paraitinga e Paraibuna, na RMVP foram avaliados por Silva et al., (2019). Os autores investigaram as tendências futuras de precipitação através da simulação climática do modelo HadCM3/Eta, para o cenário de emissões SRES (*Special Report Emission Scenarios*) A1B do quarto relatório do IPCC. Também, utilizaram a técnica dos Quantis para determinar chuvas extremas e períodos de seca. Os resultados apontam para um aumento da precipitação, com concentração de chuvas no período de verão. Segundo a simulação do HadCM3/Eta haverá um aumento de 41,9% nas chuvas intensas e muito intensas em relação ao período histórico, com chuvas mais frequentes ocorrendo nas áreas montanhosas das bacias, indicando uma tendência de aumento de deslizamentos de terra, considerando a topografia da região. Também, os autores verificaram uma tendência de diminuição de 7,5% nos períodos de ausência de chuva, de 10 dias ou mais (SILVA et al., 2019).

Também, já foi verificada a vulnerabilidade de muitos municípios da RMVP às fortes chuvas. Brambila et al., (2019) avaliaram a vulnerabilidade socioambiental à ocorrência de deslizamentos devido a eventos de chuvas intensas, em municípios da RMVP. Foram construídos índices ambientais e socioeconômicos. Os resultados mostraram um índice muito elevado de

vulnerabilidade nas regiões de Campos do Jordão e Natividade da Serra devido, principalmente, à contribuição dos indicadores de chuva-deslizamento e socioeconômicos, respectivamente.

No contexto das grandes alterações da variabilidade climática e seus impactos causados pelas mudanças climáticas e pela vulnerabilidade socioambiental da RMVP, este trabalho tem como objetivo geral avaliar as projeções de precipitação e temperatura do ar para quatro sub-regiões da RMVP no estado de São Paulo, através da utilização de três modelos climáticos globais da fase 6 do projeto de intercomparação de modelos acoplados (sigla em inglês CMIP6, para - *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*): CNRM-CM6-1-HR, EC-EARTH3 e MPI-ESM1-HR, de acordo com os cenários *Shared Socioeconomic Pathways* 4,5 W/m² e 8,5 W/m² (SSP2 4.5 e SSP5 8.5). Concomitantemente aos dados observados, se analisarão as variabilidades, tendências e extremos projetados pelos modelos do CMIP6.

Segundo Salviano et al. (2016), a análise de tendências pode identificar mudanças no comportamento de uma determinada variável e indicar quais regiões vêm sofrendo mudanças significativas ao longo do tempo. No presente estudo serão utilizadas as variáveis de temperatura e precipitação, analisando as tendências através do método de *Mann-Kendall*, sendo que alguns autores aplicaram satisfatoriamente este método: para temperatura (Karmeshu, 2012), e para precipitação (Grosso et al., 2005; Karmeshu, 2012).

Estudos como esses, são de grande importância, pois podem identificar o grau da “ameaça”, no contexto da mudança climática, e a sua severidade, possibilitando aos tomadores de decisões serem mais assertivos nas políticas públicas que devem ser implantadas como medidas de adaptação e mitigação aos efeitos negativos das mudanças climáticas.

Neste trabalho, o objetivo é investigar as mudanças de temperatura e precipitação simuladas por modelos climáticos de alta resolução do CMIP6 (CNRM-CM6-1-HR, EC-EARTH3 e MPI-ESM1-HR) para dois cenários de emissões (SSP2 4.5, SSP5 8.5) na Região Metropolitana do Vale do Paraíba no Estado de São Paulo.

Material e métodos

Área de estudo

A Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte foi criada em 2012, através da Lei Complementar nº 1.166/12 (SÃO PAULO, 2012), e geograficamente se encontra a leste do

estado de São Paulo - SP (Figura 1), com área territorial de 16.178 km², correspondendo a 6,5% da área do Estado de São Paulo. A região é integrada por 39 municípios, composta em cinco sub-regiões, sendo quatro sub-regiões localizadas no Vale do Paraíba (denominadas aqui como sub-região 1 – São José dos Campos, sub-região 2 - Taubaté, sub-região 3 - Guaratinguetá e sub-região 4 - Cruzeiro), e outra no Litoral Norte (sub-região 5). As mesmas apresentam características sociais, econômicas e ambientais distintas, concentrando, em toda região, um pouco mais de 2,7 milhões de habitantes, segundo estimativa do IBGE para 2018, e gerou 4,8% (cerca de 98,1 bilhões de reais) do Produto Interno Bruto (PIB) paulista em 2016¹.

Neste trabalho, optou-se em analisar as quatro sub-regiões da Região Metropolitana do Vale do Paraíba, pois elas apresentam base de dados robusta e suficiente para a avaliação das simulações dos modelos do CMIP6, o mesmo não ocorrendo com a sub-região 5.

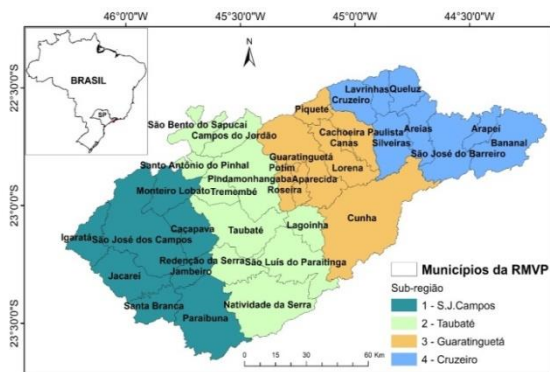


Figura 1– Localização da Região Metropolitana do Vale do Paraíba.

A sub-região 1 – São José dos Campos é composta por oito municípios, sendo São José dos Campos, Jacareí e Caçapava, situados ao longo da Rodovia Presidente Dutra, os que se apresentam como os mais dinâmicos, economicamente, dessa sub-região, agregando os ramos: automobilístico e mecânico, assim como também a produção de pesquisas científicas e tecnológicas, no campo aeroespacial. Os demais municípios ao norte (Igaratá e Monteiro Lobato) e ao sul da rodovia (Santa Branca, Jambéiro e Paraibuna) buscam incentivar o turismo rural, cultural e ecoturismo, assim como também com demandas para as pequenas culturas agrícolas e para a pecuária leiteira (EMPLASA, 2013).

A sub-região 2 – Taubaté, com 10 municípios, possui um padrão de ocupação semelhante ao da sub-região 1, sendo que os municípios de Taubaté e Pindamonhangaba, situados no eixo da Rodovia Presidente Dutra, apresentam economias mais diversificadas e dinâmicas. Taubaté destaca-se nos setores automobilístico, alimentício e químico; e Pindamonhangaba baseia sua economia na agropecuária, com incentivos ao setor industrial. Na porção norte, os municípios serranos de Campos do Jordão, Santo Antônio do Pinhal e São Bento do Sapucaí, considerados estâncias climáticas, promovem o turismo de inverno. Ao sul da rodovia, os municípios de Tremembé e São Luiz do Paraitinga, consideradas estâncias turísticas, ao lado de Redenção da Serra, Natividade da Serra e Lagoinha, são reconhecidos pela qualidade do artesanato local, festas religiosas e ecoturismo (EMPLASA, 2013).

De acordo com a Emplasa (2013), a sub-região 3 - Guaratinguetá, com nove municípios, destaca-se por abrigar cidades do turismo religioso de visitação nacional, recebendo milhares de romeiros em suas cidades religiosas, como a Estância Turística de Aparecida, a Casa de Frei Galvão em Guaratinguetá, Canção Nova em Cachoeira Paulista e em Lorena o Santuário de São Benedito. Somam-se a esses destinos, o turismo rural, cultural e o ecoturismo em Piquete e Cunha, onde o grande fluxo turístico alimenta a indústria e o comércio de *souvenirs*. Os municípios de Guaratinguetá e Lorena fundamentam seu desenvolvimento no setor industrial e nos Ensinos Superior e Tecnológico. E os municípios de Potim, Canas e Roseira com grande parte dos recursos advindos da agricultura, vêm incrementando a indústria, o comércio e o turismo.

A sub-região 4 – Cruzeiro é composta por oito municípios. Além de Cruzeiro e Lavrinhas, com economias baseadas na indústria e comércio de pequeno porte e no turismo ecológico, inclui as cidades do Vale Histórico (Queluz, Silveiras, Areias, São José do Barreiro, Arapeí e Bananal), que, no século XIX, sediaram grandes fazendas produtoras de café. Todavia, conservam toda a opulência da época, com intensa procura para o turismo rural, histórico-cultural e ecoturismo (EMPLASA, 2013).

A maior parte dos municípios da RMVP está conectada através da Rodovia Presidente Dutra, que faz a ligação entre os estados de São

¹ Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (EMTU/SP): <https://www.emtu.sp.gov.br/emtu/institucional/quem-somos/vale-do-paraiba-e-litoral-norte.fss>

Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, os estados com os maiores indicadores do Produto Interno Bruto (PIB) do país, e encontra-se entre as duas maiores metrópoles nacionais: São Paulo e Rio de Janeiro. Sua localização geográfica entre o litoral e interior do estado paulista, e as duas importantes metrópoles nacionais, tem sido apontado como uma questão relevante do “*processo de ocupação, povoamento e urbanização regional*” (EMPLASA, 2013; GOMES et al., 2018, p. 156).

A RMVP se caracteriza como uma região com um regime de precipitação peculiar devido às suas características topográficas, onde o vale é rodeado pelas serras da Mantiqueira a noroeste, com o pico mais alto atingindo 2400 m e, a Serra do Mar a sudeste, atingindo 2000 m (SAKURAGI, 2000). Segundo o autor, a localização das duas serras, cria condições propícias para a concentração de chuvas, principalmente na vertente atlântica da Serra do Mar, induzindo precipitações acumuladas anuais em mais de 3000 mm, podendo gerar eventos como deslizamentos, erosões e inundações.

Dados

Neste trabalho foram utilizadas séries mensais de dados observados de precipitação, obtidos de 294 pluviômetros distribuídos nas quatro sub-regiões, para o período de 1961 a 2019, disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA), do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) e também disponibilizados pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do estado de São Paulo (DAEE).

Para a variável temperatura, utilizou-se a séries de dados mensais para o período de 1961 a 2014, obtidos da *Climatic Research Unit* (sigla em inglês CRU), da *University of East Anglia*. Os dados do CRU encontram-se em pontos de grade e são baseados em mais de 4000 registros de estações meteorológicas distribuídas em todos os continentes (HARRIS et al., 2014), na resolução espacial de 0,5° x 0,5° de latitude/longitude.

Para as projeções futuras de precipitação e de temperatura do ar, utilizaram-se dados mensais, para o período de 2015 a 2100 - classificado por intervalos de tempo ou *time-slices* (2015-2040; 2041-2070; 2071-2100) - de três modelos climáticos globais acoplados² da fase 6 do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (sigla para CMIP6 - *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*), de boa resolução espacial para nossa área de estudo: 1) o modelo europeu CNRM-

CM6-1-HR do Centro Nacional de Pesquisa Meteorológica e Centro Europeu de Pesquisa e Formação Avançada em Cálculo Científico (CNRM-CERFACS) com alta resolução espacial de 50 km ; 2) o modelo europeu EC-EARTH3 Consórcio Europeu - Terra (EC-EARTH) com resolução espacial de 100 km; 3) o modelo alemão MPI-ESM1-HR do Instituto Max Planck de Meteorologia (MPI-M) com alta resolução espacial de 50 km (EYRING et al., 2016). Para os três modelos foram utilizados os cenários de emissões *Shared Socioeconomic Pathways* 4.5 W/m² e 8.5 W/m² (SSP2 4.5 e SSP5 8.5), que fazem parte de uma nova estrutura de cenários, a fim de facilitar a análise integrada de futuros impactos climáticos, vulnerabilidades, adaptação e mitigação (RIAHI et al., 2017).

É importante destacar que os novos cenários de emissões (SSP) elaborados para o CMIP6 são baseados em cinco narrativas (SSP1, SSP2, SSP3, SSP4 e SSP5) que descrevem desenvolvimentos socioeconômicos alternativos, incluindo desenvolvimento sustentável, rivalidade regional, desigualdade, desenvolvimento movido a combustíveis fósseis e desenvolvimento intermediário, sendo traduzidos em crescimento econômico, mudança populacional e urbanização, para consequentemente representar diferentes desafios de mitigação e adaptação (RIAHI et al., 2017).

Os cenários SSP2 e SSP5 para forçantes radiativas de 4,5W/m² e 8,5W/m², respectivamente, foram analisados neste estudo.

O cenário SSP2 descreve um caminho nas quais as tendências sociais, econômicas e tecnológicas não mudam acentuadamente dos padrões históricos, porém o desenvolvimento e o crescimento da renda prosseguem de maneira desigual, e deve enfrentar desafios médios à mitigação e adaptação. Os sistemas ambientais sofrem degradação, e permanecem os desafios para reduzir a vulnerabilidade às mudanças sociais e ambientais. O caminho intermediário de emissões em comparação com os outros SSP's apresenta uma duplicação das emissões de CO₂ ao longo do século (RIAHI et al., 2017).

Já o SSP5 está baseado em uma alta dependência de combustíveis fósseis o que resulta em maiores emissões de CO₂, e um rápido progresso tecnológico e desenvolvimento de capital humano, pelo que deve enfrentar altos desafios para mitigação e baixos desafios para adaptação devido ao desenvolvimento econômico. Ao mesmo tempo, o impulso para o

² <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>.

desenvolvimento econômico e social é associado à exploração de abundantes recursos de combustíveis fósseis e à adoção de estilos de vida intensivos em recursos e energia em todo o mundo (RIAH et al., 2017).

Metodologia

Inicialmente se analisaram o ciclo sazonal e a variabilidade interanual da precipitação e da temperatura do ar com base nos dados observados para as quatro sub-regiões da RMVP. Posteriormente se identificaram as tendências através do teste de Man Kendall que é um teste não paramétrico (Mann, 1945; Kendall, 1975) e o método de Sen (SEN, 1968). O teste Z é comparado à distribuição cumulativa normal padrão para definir se há uma tendência ou não no nível selecionado α de significância. Um valor positivo (negativo) de Z indica uma tendência crescente (decrecente). O método de Sen (estimador de inclinação Q) estima a inclinação e magnitude da tendência linear, ou seja, mudança por unidade de período (SEN, 1968; SALMI et al., 2002).

Para a identificação dos extremos da precipitação se utilizou o índice *Standardized Precipitation Index* (SPI), traduzido para o português como Índice de Precipitação Padronizado. O SPI foi desenvolvido por McKee et al. (1993) para categorizar períodos secos e úmidos, através da avaliação da sua intensidade para diferentes escalas de tempo que pode variar de 3 a 48 meses. Nesse trabalho se calculou o SPI na escala anual (24 meses). A formulação do índice SPI é baseada na função estatística de densidade e probabilidade Gama. Maiores especificações sobre as formulações podem ser encontradas em McKee et al. (1993). A partir dos valores obtidos, o SPI foi categorizado de acordo com a Tabela 1, e foi utilizado como identificador de extremos, seja para excesso ou déficit de precipitação.

Tabela 1 - Categoria e escala de SPI, segundo McKee et al. (1993), considerando apenas as associadas à padrões fora do normal.

Escalas do SPI	Categorias
≥ 2	Extremamente úmido
1,50 a 1,99	Muito (severamente) úmido
1,0 a 1,49	Moderadamente úmido
-1,0 a -1,49	Moderadamente seco
-1,5 a -1,99	Muito (severamente) seco
$\leq -2,0$	Extremamente seco

Para determinar os extremos da temperatura do ar utilizaram-se os percentis 90 (P90) e 10 (P10), utilizados para representar

limitares de extremos como recomendado pelo IPCC (IPCC, 2014b).

O P10 é o valor que identifica a décima posição das observações do conjunto, representando um valor abaixo de 10 por cento do total do conjunto de dados, indicando o extremo de ano frio, e o P90 identifica a nonagésima posição dentro do conjunto, indicando um valor limiar ou extremo de ano quente (WILKS, 2006).

A simulação dos modelos climáticos do CMIP6 foi analisada, se iniciando com as séries históricas dos modelos (CNRM-CM6-1-HR, EC-Earth3 e MPI-ESM1-HR) para o período 1961-2014, para verificar o desempenho em reproduzir o ciclo médio sazonal da chuva e da temperatura do ar observada em cada sub-região da RMVP. Para isso os dados observados de precipitação e derivados de temperatura, serviram para a validação.

As métricas utilizadas para avaliar as diferenças e incertezas dos modelos em simular o padrão observado foram o erro médio ou BIAS (Equação 1), que mede a tendência ou erro sistemático do modelo em superestimar ou subestimar essas variáveis em relação ao observado; e a Correlação de Anomalias (CA), que quantifica a correspondência entre a anomalia prevista e a anomalia observada (Equação 2). Adicionalmente se calculou a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) (Equação 3) e o desvio padrão.

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum (F - O) \quad (1)$$

$$CA = \frac{\sum \{[(F - C) - \overline{(F - C)}] (O - C) - \overline{(O - C)}\}}{\sqrt{\sum [(F - C) - \overline{(F - C)}]^2 \sum [(O - C) - \overline{(O - C)}]^2}} \quad (2)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F - O)^2} \quad (3)$$

Sendo,

F: valor simulado pelo modelo

O: valor observado.

C: valor climatológico

n: número de anos analisados

Assim, após a validação da simulação dos modelos e determinando as métricas de desempenho, procedeu-se com a correção do erro sistemático dos modelos através do método *Direct Approach* (LENDERINK, BUIHAND e DEURSEN, 2007) para remover os erros sistemáticos entre os dados observados e os dados gerados pelos modelos, e diminuir as incertezas das projeções.

Este método consiste em detectar as diferenças entre as condições observadas e as condições simuladas pelos modelos, e em seguida, aplicar essas diferenças na série projetada para o futuro (Equação 4).

$$K_{(1991-2014)}^{FC} = K_{(1991-2014)}^F \times \left(\frac{K_{(1991-2014)}^O}{K_{(1991-2014)}^C} \right) \quad (4)$$

Sendo,

K^{FC} : valor a ser corrigido da variável climática no período de avaliação;

K^F : corresponde ao valor sem correção da variável climática no período de avaliação;

K^C : representa a variável climática média mensal do modelo para o período de controle;

K^O : representa a variável climática média mensal observada para o período de controle.

Após da aplicação da métrica de correção das simulações dos modelos climáticos se encontrou o fator de correção, e este foi aplicado às projeções futuras, para o período de 2015 a 2100, das saídas dos modelos climáticos globais: CNRM-CM6-1-HR, EC-Earth3 e MPI-ESM1-HR.

As métricas de validação do histórico do modelo foram também representadas através do Diagrama de Taylor (TAYLOR, 2001) que fornece um resumo da habilidade relativa, através das métricas, com a qual vários modelos climáticos globais simulam o padrão espacial de uma variável atmosférica. Para cada modelo, três estatísticas são plotadas: o coeficiente de correlação de Pearson, o erro REQM e o desvio padrão.

Resultados e Discussões

Padrões de precipitação e temperatura

A análise dos padrões de precipitação e temperatura, para o período de 1961-2014 no presente estudo, foi realizada para as quatro sub-regiões da RMVP, através das médias mensais e anuais, com base em dados observados.

De acordo com os resultados obtidos, para a precipitação sazonal, os maiores valores médios de chuva da RMVP foram observados na estação do verão (DJF), com média entre todas as sub-regiões de 225 mm, com destaque para a sub-região 4 – Cruzeiro, que apresentou um valor médio de 242,1 mm (Figura 2b). A mesma apresentou para o mês de Janeiro, o maior valor médio de precipitação, com 270,5 mm (Figura 2a), seguido pela sub-região 2 – Taubaté, com 255,3 mm. Os menores valores médios de precipitação foram encontrados na estação de inverno (JJA), com média de 36,9 mm em toda RMVP, sendo que o

destaque ficou para a sub-região 4 – Cruzeiro, com a média de 34,1 mm (Figura 2b). Para o mês de Junho, essa sub-região registrou apenas 32,5 mm (Figura 2a).

No verão (DJF) e na primavera (SON), a sub-região 1 – São José dos Campos foi a que apresentou os menores acumulados mensais pluviométricos da área analisada, com 207,3 e 107,8 mm, respectivamente (Figura 2b). De acordo com a Figura 2a, para essa sub-região, o mês de Fevereiro registrou uma precipitação de 188,3 mm e para o mês de Setembro 71 mm, respectivamente.

Para a temperatura, os maiores valores médios foram registrados no período chuvoso (verão) e os menores na estação seca (inverno), como mostrado na Figura 3b.

Considerando toda a RMVP, observa-se que os maiores valores médios ocorrem no verão (DJF), com a temperatura média de 21,7 °C, e os menores valores no inverno (JJA), com a média de 15,7 °C.

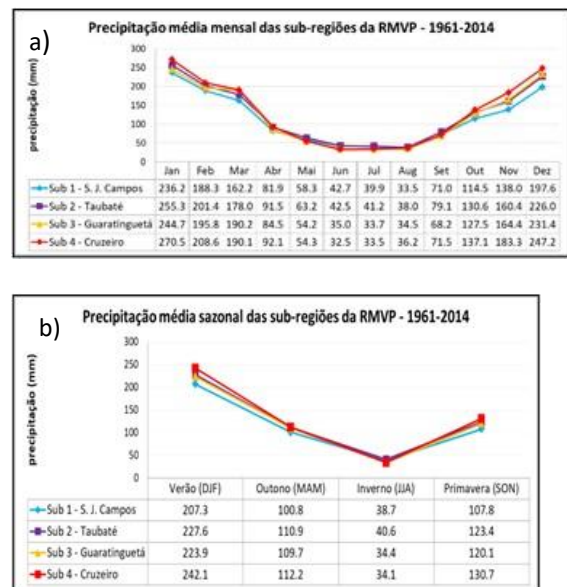


Figura 2 – Precipitação – médias: mensal (a) e sazonal (b) sub-regiões RMVP.

A sub-região 1 – São José dos Campos se apresenta pequena diferença das temperaturas médias para a estação do verão, entre as sub-regiões, registrando um valor médio de 22 °C, seguido pela sub-região 3 – Guaratinguetá com 21,9 °C e pela sub-região 4 – Cruzeiro com 21,7 °C (Figura 3b). A sub-região 1 apresentou para o mês de fevereiro o maior valor de temperatura média (22,4 °C), em toda RMVP (Figura 3b). Essa mesma sub-região também apresentou a maior média de temperatura para o inverno (JJA), com um valor de 16,1 °C (Figura 3b), entre as quatro sub-regiões, destacando o mês de Agosto que registrou 16,8 °C

(Figura 3a). A sub-região 2 – Taubaté registrou a menor temperatura média no inverno, com um valor de 15,2 °C (Figura 3b), sendo que o mês de julho, a sub-região apresentou a menor temperatura da RMVP (14,6 °C), de acordo com a Figura 3a.

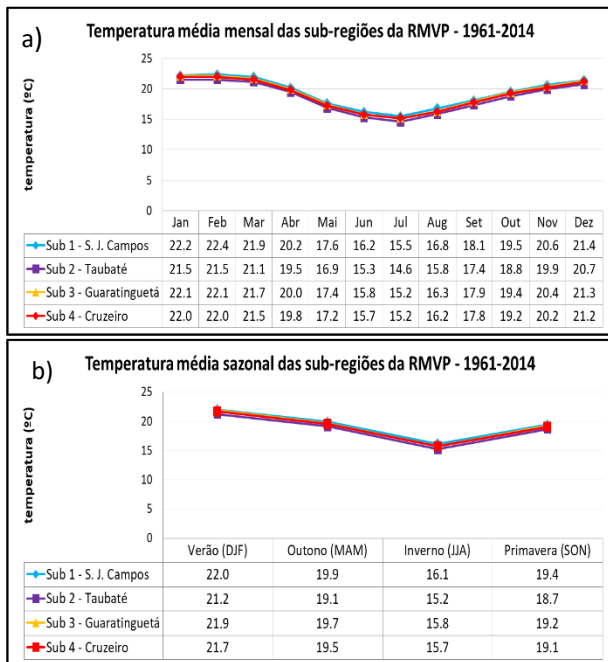


Figura 3 – Temperatura – médias: mensal (a) e sazonal (b) sub-regiões RMVP.

Variabilidades e tendências

Regoto et al. (2021) analisaram tendências sazonais e anuais de índices extremos de temperatura do ar e precipitação sobre o Brasil durante o período 1961-2018, utilizando os testes estatísticos de Curvatura de Sen e Mann-Kendall para calcular as magnitudes e avaliar a significância estatística das tendências de extremos climáticos. Os autores identificaram tendências extremas de precipitação positiva e negativa, sem significância estatística, na Região Sudeste.

As variabilidades e tendências foram avaliadas, na escala mensal e anual. A Tabela 2 mostra os parâmetros de inclinação e significância estatística, após a aplicação do teste *Mann-Kendal*

para as séries da precipitação e temperatura na escala mensal e anual.

Observa-se que na escala anual os parâmetros de *Mann-Kendal* (*Z* e *Q*) mostram tendências de diminuição da precipitação nas quatro sub-regiões, com significância estatística. A sub-região 1 – São José dos Campos apresentou tendência negativa com valor de -3,51 mm e com significância estatística de 0,001 (99,9% de confiança). A sub-região 3 – Guaratinguetá com tendência negativa de -3,09 mm e com significância a 0,01 (99%). As sub-regiões 2 – Taubaté e 3 – Cruzeiro registraram tendências negativas com valores de -2,30 e -2,26 mm, respectivamente, com significância a 0,05 (95%).

A precipitação na escala mensal apresentou diferenças nas quatro sub-regiões. A sub-região 3 – Guaratinguetá mostrou tendências negativas durante todos os meses do período chuvoso (dezembro até março), porém sem significância estatística, com exceção para o mês de Dezembro que apresentou tendência (-2,55 mm) com a confiança de 95%. Para os meses de dezembro e fevereiro, em todas as sub-regiões as tendências foram negativas, mas somente em dezembro houve significância estatística. No mês de outubro, que também apresentou tendências negativas, somente a sub-região 2 - Taubaté não apresentou significância estatística. Os meses de maio, junho e julho apresentaram tendências positivas, mas sem significância estatística.

Por outro lado, a temperatura do ar evidenciou tendências positivas de aumento, também para todas as sub-regiões com significância estatística de 0,001 (com confiança de 99,9%), para a escala anual, sendo a sub-região 1 – São José dos Campos registrou o maior valor (6,07 °C). O mesmo foi observado para a escala mensal da temperatura do ar, tendências positivas em todos os meses e para todas as sub-regiões com significância estatística, com destaque para o mês de Abril, com valores em torno de 4,40 °C, e com significância estatística de 0,001 (99,9% de confiança), conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Teste de tendência *Mann-Kendal* para a precipitação 1961-2019 e temperatura 1961-2014, em escala mensal e anual observado.

Mês	Precipitação (mm) - 1961-2019								Temperatura (°C) - 1961-2014															
	Sub1		Sub2		Sub3		Sub4		Sub1		Sub2		Sub3		Sub4									
	Z	Q	Z	Q	Z	Q	Z	Q	Z	Q	Z	Q	Z	Q	Z	Q								
janeiro	0.98	0.539	1.14	0.618	-0.14	-0.121	-0.47	-0.397	2.71	**	0.022	2.69	**	0.020	2.52	*	0.020	2.44	*	0.019				
fevereiro	-0.43	-0.249	-1.28	-0.813	-1.29	-0.871	-1.26	-0.898	3.95	***	0.030	3.82	***	0.028	3.69	***	0.027	3.53	***	0.026				
março	-0.18	-0.088	0.47	0.263	-0.64	-0.274	0.21	0.106	3.81	***	0.024	3.75	***	0.023	3.58	***	0.023	3.49	***	0.021				
abril	-0.77	-0.224	0.27	0.077	0.17	0.043	-1.03	-0.238	4.42	***	0.038	4.46	***	0.036	4.43	***	0.036	4.39	***	0.035				
maio	0.14	0.023	1.82	+	0.493	0.98	0.214	0.41	0.092	2.61	**	0.020	2.68	**	0.019	2.58	**	0.019	2.56	*	0.018			
junho	0.09	0.010	0.75	0.135	0.61	0.108	0.72	0.115	3.44	***	0.033	3.34	***	0.032	3.38	***	0.032	3.35	***	0.032				
julho	0.51	0.136	1.15	0.256	1.11	0.172	0.80	0.109	3.36	***	0.031	3.38	***	0.030	3.37	***	0.030	3.46	***	0.029				
agosto	-1.37	-0.246	-0.65	-0.122	-0.35	-0.076	-0.67	-0.138	2.40	*	0.020	2.41	*	0.018	2.28	*	0.017	2.24	*	0.016				
setembro	-0.97	-0.352	0.85	0.281	0.46	0.116	0.73	0.279	2.23	*	0.021	2.16	*	0.021	2.07	*	0.020	1.98	*	0.020				
outubro	-2.24	*	-0.788	-0.77	-0.311	-1.70	+	-0.635	-2.12	*	-0.821	3.47	***	0.037	3.31	***	0.035	3.12	**	0.034	2.95	**	0.032	
novembro	-0.92	-0.274	0.33	0.146	0.09	0.055	0.20	0.103	3.39	***	0.023	3.32	***	0.022	3.25	**	0.022	3.10	**	0.021				
dezembro	-3.06	**	-1.461	-1.94	+	-0.980	-2.55	*	-1.184	-2.13	*	-1.053	4.01	***	0.033	3.84	***	0.030	3.60	***	0.029	3.52	***	0.027
Anual	-3.51	***	-6.983	-2.30	*	-4.939	-3.09	**	-5.951	-2.26	*	-3.454	6.07	***	0.027	5.86	***	0.027	5.68	***	0.026	5.60	***	0.026

*** significância a 0,001 (99,9%)

** significância a 0,01 (99%)

* significância a 0,05 (95%)

+ significância a 0,1 (90%)

Extremos de temperatura e precipitação

Variáveis meteorológicas, especialmente a temperatura e a precipitação, estão sofrendo alterações quanto à intensidade e frequência nas últimas décadas, e podem impactar a sociedade. Esses eventos climáticos e meteorológicos extremos foram identificados por Neves de Toffolli (2022) no Estado do Paraná, região sul do Brasil, onde os resultados apontam para um padrão de aquecimento generalizado estatisticamente significativo em grande parte do estado, com aumento das temperaturas mínimas e com chuvas mais fortes e maiores intervalos de seca.

Os extremos de temperatura foram identificados através do cálculo dos percentis P10 e P90 como explicado na metodologia, e possibilitou especificar a frequência de anos considerados extremos para frio ou para quente, respectivamente. O resultado mostrou que as sub-regiões 1 – São José dos Campos e 2 – Taubaté apresentaram maior frequência de anos quentes para o período de 1961-2014, com oito registros para cada sub-região, sendo que para a primeira, foram registrados os seguintes anos e temperaturas: 2001 (20,2), 2002 (20,6), 2005 (20,1), 2007 (20,3), 2009 (20,1), 2010 (20,1), 2012 (20,3) e 2014 (20,5). Para a sub-região 2, foram registrados os mesmos anos com os seguintes valores de temperatura: 19,4, 19,8, 19,3, 19,5, 19,3, 19,3, 19,5 e 19,7. Ainda, a sub-região 1 – São José dos Campos apresentou o maior valor médio de temperatura para a estação de verão, conforme a Figura 3b (22 °C), e o menor valor de precipitação média nesta estação, de acordo com a Figura 2b, com o valor de 207,3 mm.

A sub-região 3 - Guaratinguetá apresentou a mesma frequência de anos quentes e frios. Já a sub-região 4 – Cruzeiro apresentou maior frequência de anos frios, com oito registros: 1962 (17,9), 1964 (18,0), 1968 (17,8), 1971 (18,4), 1974 (18,4), 1975

(18,4), 1976 (18,2) e 1979 (18,1), e também foi a que apresentou os maiores valores médios de precipitação mensal (Figura 2a), e também o maior valor médio de precipitação para a estação do verão (242,1 mm), de acordo com a Figura 2b.

A maior frequência de anos quentes se registrou na década de 2000, sendo comuns para todas as sub-regiões os anos de 2002, 2007 e 2009. Já nas sub-regiões 1 e 2, também foram considerados quentes os anos de 2001 e 2005. Na década de 2010, se destaca o ano de 2014 em todas as sub-regiões como um ano quente, e se tem conhecimento que nesse ano houve a maior crise hídrica no estado de São Paulo.

Para a análise dos extremos de precipitação se utilizou o índice SPI como explicado na metodologia, e de acordo com a classificação estabelecida para esse índice (Tabela 1) encontrou-se que ao longo do período analisado (1961-2019) o número de anos com classificação de seco (moderado, severo e extremo) foi maior que aqueles classificados como úmidos (moderado, severo e extremo) em todas as sub-regiões.

O número de anos com a categoria de moderadamente seco foi maior nas sub-regiões 1 – São José dos Campos e 3 – Guaratinguetá com oito anos cada, sendo que para a primeira sub-região registraram-se os seguintes valores: 1.011 mm (1963), 1.038 mm (1968), 942 mm (2010), 946 mm (2011), 960 mm (2012), 972 mm (2013), 952 mm (2017) e 1.004 mm (2019); e para a sub-região 3 foram registrados os valores: 1.044 mm (1963), 1.071 mm (1968), 1.062 mm (1984), 1.073 mm (2003), 1.095 mm (2013), 1.115 mm (2016), 1.112 mm (2018) e 1.060 mm (2019). A sub-região 2 – Taubaté com sete anos classificados como moderadamente secos: 1.110 mm (1984), 1.157 mm (2007), 1.175 mm

(2013), 1.186 mm (2016), 1.139 mm (2017), 1.120 mm (2018) e 1.141 mm (2019).

As sub-regiões 1 – São José dos Campos apresentaram dois anos com classificação extrema para úmido: 1.880 mm (1976) e 2.070 mm (1983), e para extremamente seco: 768 mm (2014) e 780 mm (2018); e sub-região 2 – Taubaté com anos extremamente úmidos: 2.023 mm (1976) e 2.131 mm (1983), e extremamente secos: 995 mm (1963) e 795 mm (2014). Porém a sub-região 4 – Cruzeiro apresentou quatro anos com classificação de extremamente secos: 942 mm (2007), 973 mm (2012), 945 mm (2014) e 927 mm (2017). O ano de 2014, categorizado como extremamente seco, esteve presente nas quatro sub-regiões, assim como os anos de 2013, 2016 e 2019 que se classificaram como moderadamente seco.

O ano de 2014 também foi considerado um ano quente, além de extremamente seco, e foi nesse ano que grande parte da região Sudeste, especificamente o estado de São Paulo, sofreu uma das mais graves crises hídricas pela falta de chuvas, que segundo Coelho et al. (2015) não ocorria desde 1981. Já no Sistema Cantareira, a diminuição das chuvas em 2014, não tinha alcançado valores extremos (abaixo do P10) desde os anos de 1968 e 1969 (CALADO et al., 2019).

Na classificação de úmido, o ano de 1983 foi considerado como extremamente úmido em todas as sub-regiões, e o ano de 1967 como moderadamente úmido. No ano de 1983 se teve a ocorrência do fenômeno El Niño, considerado forte na escala de ocorrência deste fenômeno. Já no ano de 1967 houve a ocorrência de um evento La Niña de classificação leve (CALADO et al., 2019).

Avaliação da simulação histórica (1961-2014) dos modelos climáticos

Um passo essencial para melhorar o desempenho dos modelos de mudanças climáticas é avaliar sua capacidade de representar as condições climáticas atuais, especialmente eventos extremos (XAVIER et al., 2021). Os autores avaliaram o desempenho dos modelos através do método de Mapeamento Quantílico Delta (QDM) para a correção de vies para séries anuais de precipitação máxima diária, devido à sua capacidade de corrigir vies em quantis extremos de dias úmidos. Várias medidas de ajuste, como desvio médio quadrático ou erro quadrático médio (RMSE), desvio padrão (SD), vies percentual (pbias), erro absoluto médio (MAE), teste de correlação de Pearson, teste de Willmott, foram calculados a partir dos resultados dos modelos e suas dados observados. O QDM foi capaz de corrigir praticamente todos os vieses, ajustando com sucesso

a distribuição cumulativa empírica das projeções de mudanças climáticas, e removendo o erro sistemático dos dados brutos (XAVIER et al., 2021).

Neste trabalho, foram utilizadas métricas de avaliação de desempenho como viés (Bias), Coeficiente de Correlação de Anomalias (CA), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), e método de correção Direct Approach.

A simulação da precipitação pelos três modelos climáticos (CNMR-CM6-1-HR, MPI-ESM1-HR e EC-EARTH3), em geral, conseguiu capturar a sazonalidade da precipitação observada para o período de 1961-2014, isto é, os períodos secos e chuvosos em todas as sub-regiões. A Sub-região 1- São José dos Campos (Fig. 4a) demonstra esse resultado, mas os períodos chuvosos foram superestimados, sendo que o modelo EC-EARTH3 apresentou a maior diferença. Já, os modelos MPI-ESM1-HR e CNMR-CM6-1-HR apresentaram valores mais próximos à climatologia observada, principalmente nos meses de Janeiro até Julho.

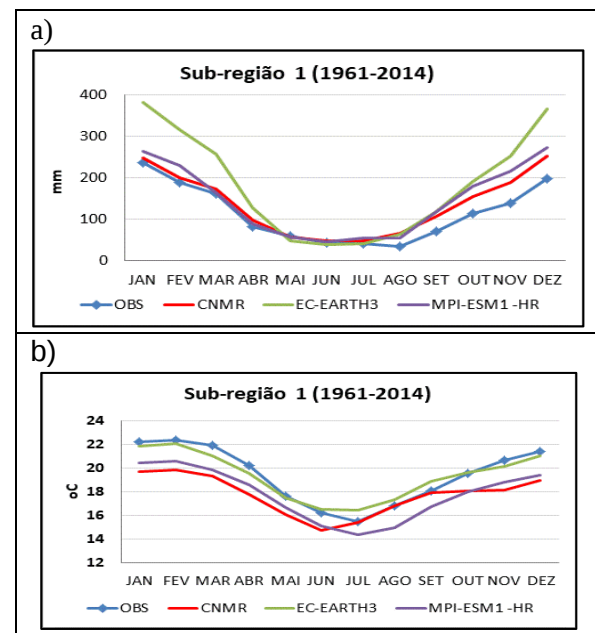


Figura 4 - Padrões de precipitação (a) e temperatura (b) de acordo com a simulação dos modelos CNMR-CM6-1-HR, MPI-ESM1-HR e EC-EARTH3 (1961-2014).

Devido às diferenças encontradas entre o observado e o simulado se calcularam as métricas de avaliação de desempenho (BIAS, CA e RMSE) e posteriormente se aplicou o método de correção *Direct Approach*, e novamente se calcularam as métricas para observar as melhorias no desempenho da simulação após a correção.

A Tabela 3 mostra os resultados para as métricas de validação, o erro sistemático (BIAS) e a CA, para a variável precipitação.

Observa-se que, o modelo EC-Earth3 foi o que gerou os maiores valores do *BIAS* para todas as sub-regiões, como foi verificado na Figura 4a, para a sub-região 1 – São José dos Campos. Porém, foi na sub-região 4 - Cruzeiro que apresentou o maior viés de 93,12 mm. A sub-região 1 – São José dos Campos apresentou o menor viés, sendo de 69,59 mm (Tabela 3).

Os modelos MPI-ESM1-HR e o CNRM-CM6-HR geraram os menores *BIAS*, estando o MPI-ESM1-HR com os mais baixos valores de 10,82 mm e 18,63 mm nas sub-regiões 2 e 4 respectivamente (Tabela 3).

Após a correção do erro realizada através do método *Direct Approach*, o viés médio dos modelos foi zero em todas as sub-regiões e a *CA* também mostrou um ligeiro aumento, sendo maior que 0,7 para os modelos EC-Earth3 e MPI-ESM1-HR nas sub-regiões 2, 3 e 4 (Tabela 3). Assim verifica-se, uma remoção do erro sistemático médio e indica boa representatividade do modelo, aproximando-se ao que foi observado através da métrica *CA*.

A simulação do ciclo sazonal da temperatura pelos modelos também foi eficaz em capturar os meses de altas temperaturas, mas os modelos CNRM-CM6-HR e MPI-ESM1-HR subestimaram os seus valores. O CNRM-CM6-HR simulou o mês mais frio em Junho e não em Julho como no observado (Figura 2b), e foi o que mais subestimou as temperaturas, isso para todas as sub-regiões, e como exemplificado na Figura 3b para a Sub-região 1- São José dos Campos.

Tabela 3 - Métricas de validação (*BIAS* e *CA*) dos modelos em relação ao observado, sem correção (original) e com correção (*Direct Approach*) para a precipitação, período 1961-2014.

Erro sistemático – Precipitação (mm)					
Modelo	BIAS	Sub1 (CA)	Sub2 (CA)	Sub3 (CA)	Sub4 (CA)
CNRM-CM6-HR	Original	22,58 (0,55)	34,18 (0,59)	34,82 (0,61)	24,63 (0,63)
	Direct	0	0	0	0
	Apr.	(0,59)	(0,62)	(0,65)	(0,67)
EC-Earth3	Original	69,59 (0,70)	71,09 (0,73)	70,06 (0,73)	93,12 (0,70)
	Direct	0	0	0	0
	Apr.	(0,70)	(0,71)	(0,73)	(0,70)
MPI-ESM1-HR	Original	31,48 (0,66)	10,82 (0,68)	24,58 (0,70)	18,63 (0,71)
	Direct	0	0	0	0
	Apr.	(0,69)	(0,71)	(0,72)	(0,72)

A Tabela 4 demonstra os valores do erro sistemático para a temperatura, e se verifica que o modelo CNRM-CM6-HR apresenta os maiores valores no cálculo dos erros, em relação aos outros

modelos analisados; as sub-regiões 3 e 4 apresentaram os maiores valores negativos, -2,38 °C e -2,02 °C, respectivamente.

O MPI-ESM1-HR, também mostrou erros negativos, mas em menor intensidade quando comparado com o CNRM-CM6-HR. Já o EC-Earth3 apresentou o *BIAS* mais baixo, principalmente nas sub-regiões 1 e 3 (Tabela 4).

Após a aplicação do método *Direct Approach* houve a remoção do erro, com um valor zero ou próximo a zero do *BIAS*, e os valores de *CA* mostraram um aumento maior, e superaram o valor de 0,85, com um valor máximo de 0,90 na simulação do EC-Earth3 para a sub-região 4- Cruzeiro após a correção (Tabela 4), o que indica uma boa representatividade.

Tabela 4 - Métricas de validação (*BIAS* e *CA*) dos modelos em relação ao observado, sem correção (original) e com correção (*Direct Appr.*) para a temperatura, período 1961-2014.

Erro sistemático – Temperatura (°C)					
Modelo	BIAS	Sub1 (CA)	Sub2 (CA)	Sub3 (CA)	Sub4 (CA)
CNRM-CM6-HR	Orig.	-1,63 (0,74)	-1,63 (0,76)	-2,38 (0,75)	-2,02 (0,77)
	Direct	0	0	-0,02	0
	Appr.	(0,85)	(0,86)	(0,85)	(0,86)
EC-Earth3	Orig.	-0,04 (0,82)	0,88 (0,82)	0,01 (0,81)	1,27 (0,86)
	Direct	0	0	0	0
	Appr.	(0,86)	(0,88)	(0,87)	(0,90)
MPI-ESM1-HR	Orig.	-1,58 (0,86)	-0,77 (0,87)	-1,06 (0,87)	-0,29 (0,86)
	Direct	0	0	0	0
	Appr.	(0,87)	(0,88)	(0,88)	(0,89)

A Figura 5 apresenta o diagrama de Taylor e mostra as métricas de validação (coeficiente de correlação de Pearson, desvio padrão e RQEM normalizado) antes e depois da correção. O diagrama para a precipitação da sub-região 1 – São José dos Campos é apresentado na Figura 5a, e observa-se claramente, como após a aplicação do método de correção, a correlação aumenta, e o desvio padrão e a REQM diminui, sendo o modelo EC-Earth3 que apresenta melhor desempenho, seguido pelo modelo MPI-ESM1-HR.

A Figura 5b mostra o diagrama para a temperatura e para a sub-região 1 – São José dos Campos, para esta variável, o melhor desempenho é observado para coeficiente de correlação de Pearson, sendo o modelo MPI-ESM1-HR, seguido por EC-EARTH3 os que apresentaram o melhor desempenho, ao igual que o valor da *CA* (Tabela 4).

Avaliação das projeções para os cenários de emissões SSP2 4.5 e SSP5 8.5 dos modelos climáticos

As projeções para os dois cenários de emissões foram ajustadas utilizando o fator de correção obtido através da aplicação do método *Direct Approach* de forma a diminuir as incertezas das projeções. Os parâmetros de tendências (Z e Q) com a significância estatística, para as séries anuais de precipitação e temperatura dos três modelos (CNRM-CM6-1-HR, MPI-ESM1-HR e EC-EARTH3) e períodos de 2015-2040, 2041-2070 e 2071-2100, para os cenários de emissões SSP2 4.5 e SSP5 8.5 são mostrados na Tabela 5.

Observa-se que para a variável precipitação, não houve consenso na tendência anual entre os modelos, nas sub-regiões de estudo. No entanto, somente o modelo MPI-ESM1-HR mostrou tendência de aumento, para o nível 0,1 de significância, no período 2041-2070 e na sub-região 1 (São José dos Campos) e 4 (Cruzeiro), para o cenário SSP2 4.5.

Já para o cenário SSP5 8.5 as tendências de aumento foram para o período 2071-2100, com nível de significância 0,05 (confiança de 95%), e incluíram também a sub-região3 - Guaratinguetá. Lembrando que na série observada, as tendências da precipitação anual com significância foram de diminuição para todas as sub-regiões analisadas.

Por outro lado, a temperatura do ar, nas quatro sub-regiões, revelou tendências positivas de aumento para os dois cenários de emissões avaliados e para os três modelos climáticos.

Precipitação Sub1 - São José dos Campos

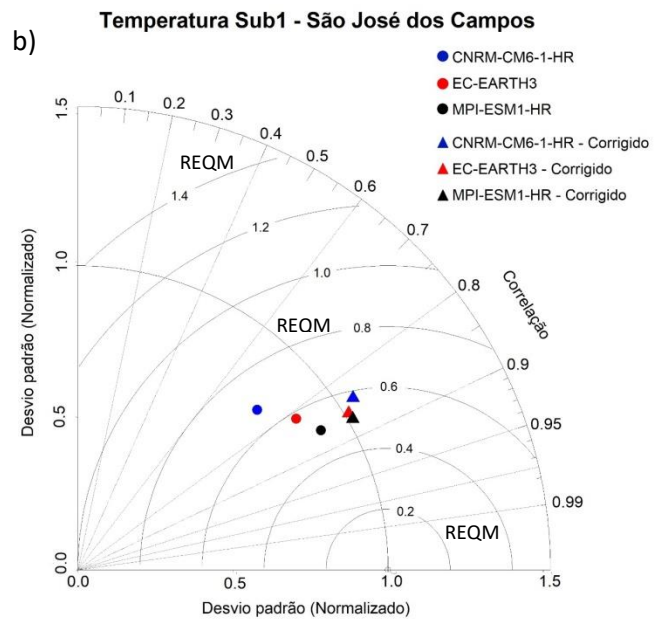
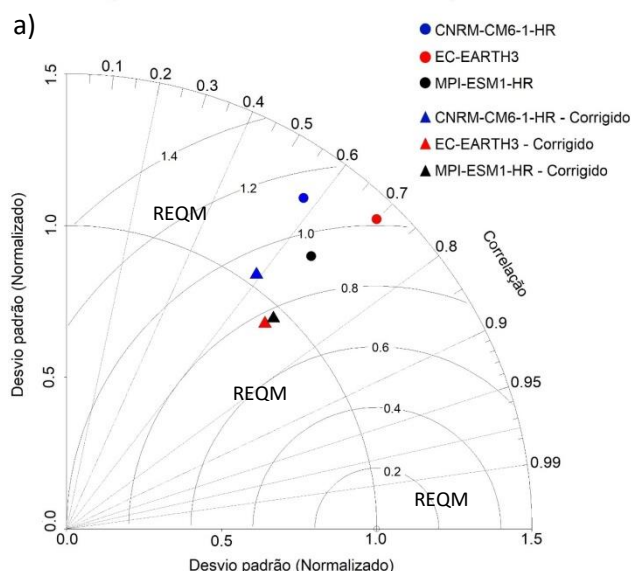


Figura 5 - Diagrama de Taylor para a sub-região 1, para a precipitação (a) e temperatura (b).

A maior parte das tendências de temperatura apresentou significância estatística, conforme mostrado na Tabela 5. No cenário SSP2 4.5, somente o modelo CNRM-CM6-1-HR apresentou as tendências positivas em todos os períodos analisados, e para diferentes níveis de significância. Porém, o modelo MPI-ESM1-HR apresentou as maiores tendências positivas (Z) com significância estatística no período 2015-2040, nas quatro sub-regiões, com destaque para a Sub-região 2 – Taubaté que registrou para o coeficiente Z o maior valor de 3,22 e Q de 0,05, seguido pela Sub-região 1- São José dos Campos, que registrou o valor de 3,17 e Q de 0,06.

No cenário SSP5 8.5 todos os modelos apresentaram tendências de aumento da temperatura com nível de significância variando entre 0,01 e 0,001, sendo o modelo EC-Earth3 que apresentou os mais altos valores de Z e Q na Sub-região 1 – São José dos Campos, nos períodos 2015-2040 e 2041-2070. Já o modelo CNRM-CM6-HR apresentou os mais altos valores de Z e Q em todas as sub-regiões e para o período 2071-2100 (Tabela 5).

A análise do SPI para as projeções futuras mostram resultados diferenciados para cada modelo e sub-região. Para o cenário SSP2 4.5 e para o futuro mais próximo (2015-2040), os modelos CNRM-CM6-1 e MPI-ESM1-HR simulam uma maior frequência de anos Moderadamente Secos, principalmente na Sub-região 4 – Cruzeiro, seguido pela sub-região 1 – São José dos Campos (CNRM-CM6-1-HR) e Sub-região 3 – Guaratinguetá (MPI-ESM1-HR). Para o período 2041-2070, só os modelos

MPI-ESM1-HR (Sub-região 2) e EC-EARTH3 (Sub-região 1) ainda mostraram uma maior frequência de anos moderadamente seco. Já para o último período 2071-2100 houve predominância tanto para anos extremamente úmidos como para secos. Enquanto as sub-regiões 1 e 2 se destacam principalmente pela maior frequência de anos extremamente úmido

(CNMR-CM6-1-HR) e moderadamente úmido (MPI-ESM1-HR), estas mesmas regiões apresentam maior frequência de anos moderadamente seco para a simulação do modelo EC-EARTH3, que inclui também a sub-região 3. O EC-EARTH3 simula maior frequência de anos moderadamente úmido e severamente úmido na Sub-região 4 – Cruzeiro.

Tabela 5 - Tendência anual da precipitação e temperatura para os cenários de emissões de cada modelo climático e para três períodos de análise (2015-2040, 2041-2070 e 2071-2100).

Modelo	Período	Precipitação (mm)								Temperatura (°C)							
		Sub1		Sub2		Sub3		Sub4		Sub1		Sub2		Sub3		Sub4	
		Z	Q	Z	Q	Z	Q	Z	Q	Z	Q	Z	Q	Z	Q	Z	Q
CNMR-CM6-1-HR (SSP245)	2015-2040	0,40	0,71	0,04	0,14	0,40	1,20	0,57	3,10	2,91	**	0,05	2,95	**	0,05	2,91	**
	2041-2070	0,14	0,98	0,00	-0,07	-0,25	-0,51	-0,07	-0,55	2,28	*	0,03	2,60	**	0,03	2,82	**
	2071-2100	-0,50	-2,49	-0,04	-0,47	-0,50	-2,65	-0,68	-3,46	2,00	*	0,04	2,00	*	0,04	2,11	*
EC-EARTH3 (SSP245)	2015-2040	-1,10	-3,98	-1,10	-2,87	-0,75	-2,18	-0,71	-3,48	1,85	+	0,03	1,50	0,03	1,32	0,03	1,41
	2041-2070	-0,86	-4,49	-0,79	-5,25	-0,93	-5,11	-0,96	-3,01	0,93	0,01	1,11	0,01	0,96	0,01	1,03	0,01
	2071-2100	1,03	5,46	1,21	7,01	1,21	6,12	1,39	5,52	1,93	+	0,03	1,86	+	0,03	1,75	+
MPI-ESM1-HR (SSP245)	2015-2040	0,88	6,35	1,01	6,11	0,26	1,55	0,62	3,29	3,17	**	0,06	3,22	**	0,05	3,09	**
	2041-2070	1,68	6,12	1,57	6,04	1,36	6,07	1,68	7,43	1,36	0,01	1,32	0,01	1,18	0,02	1,14	0,01
	2071-2100	0,00	0,09	-0,32	-1,50	-0,39	-2,39	-0,46	-2,49	0,71	0,01	0,68	0,01	0,50	0,01	0,64	0,01
CNMR-CM6-1-HR (SSP585)	2015-2040	0,04	0,27	-0,04	-1,43	-0,13	-1,79	-0,13	-1,32	3,17	**	0,05	3,35	***	0,05	3,39	***
	2041-2070	0,54	2,89	0,25	1,52	0,04	0,22	-0,32	-2,63	4,07	***	0,09	4,42	***	0,09	4,39	***
	2071-2100	1,50	4,42	1,43	5,70	1,32	6,69	1,50	7,30	5,25	***	0,07	5,35	***	0,08	5,28	***
EC-EARTH3 (SSP585)	2015-2040	0,62	3,63	0,88	3,22	0,97	3,60	0,84	2,26	3,22	**	0,05	3,13	**	0,05	2,91	**
	2041-2070	-0,71	-5,09	-1,14	-5,27	-1,03	-5,24	-1,21	-4,87	5,17	***	0,07	5,17	***	0,06	5,07	***
	2071-2100	0,68	2,17	0,50	2,61	0,39	1,67	0,25	0,61	4,53	***	0,07	4,46	***	0,07	4,50	***
MPI-ESM1-HR (SSP585)	2015-2040	-0,18	-1,22	-0,18	-1,49	-1,32	-5,35	-1,01	-5,47	3,04	**	0,05	3,04	**	0,05	3,04	**
	2041-2070	0,00	-0,07	-0,54	-1,60	-0,18	-1,02	-0,07	-0,22	5,14	***	0,07	5,07	***	0,06	5,10	***
	2071-2100	2,21	8,65	1,57	7,41	1,96	7,43	2,11	8,49	4,14	***	0,06	4,21	***	0,06	4,42	***

*** significância a 0,001 (99,9%)

** significância a 0,01 (99%)

* significância a 0,05 (95%)

+ significância a 0,1 (90%)

No cenário SSP5-8.5, se apresenta um padrão semelhante, para o futuro mais próximo, os modelos CNMR-CM6-1-HR e MPI-ESM1-HR simulando maior frequência de anos considerados moderadamente seco, porém para todas as sub-regiões, sendo o MPI-ESM1-HR o que apresentou um maior número de anos. Para o período de 2041-2070, se destaca o MPI-ESM1-HR, pois simula uma maior frequência de anos moderadamente seco para as sub-regiões 4 e 3, mas na sub-região 1 o destaque é para maior frequência de anos moderadamente úmido. Para o último período 2071-2100, as maiores frequências estão para os anos considerados moderadamente úmido, com destaque para a Sub-região 4 – Cruzeiro e severamente úmido para todas as sub-regiões e para as simulações dos modelos CNMR-CM6-1 e MPI-ESM1-HR. Não existindo nenhum ano com a categoria extremamente seco.

Os extremos de temperatura, na escala anual para as projeções utilizando os percentis P90 e P10 mostraram resultados diferenciados principalmente na frequência de anos quentes (P90) e anos frios (P10), pois embora exista uma

tendência de aumento muito bem definida, com significância estatística a frequência de anos frios e quentes nos períodos avaliados e para os dois cenários de emissões não é muito diferente.

Os valores dos percentis sofrem aumentos ao longo dos três períodos analisados, o modelo CNMR-CM6-1 apontou o maior incremento do valor do P90, entre o período de 2015-2041 e 2071-2100, oscilando entre 4,5°C (Sub-regiões 1 – São José dos Campos e 2 – Taubaté) e 4,7°C (Sub-região 3 – Guaratinguetá e 4 – Cruzeiro) para o cenário SSP5 8.5. O modelo MPI-ESM1-HR é o que evidenciou o menor incremento que oscilou entre 2,7°C (Sub-região 4 – Cruzeiro) e 2,8°C (Sub-regiões 1 – São José dos Campos, 2 – Taubaté e 3 – Guaratinguetá), também para o cenário SSP5 8.5.

Em relação à frequência de eventos de anos frios e quentes, para o cenário SSP2 4.5, para o período de 2041-2070 o modelo MPI-ESM1-HR para as Sub-região 3 – Guaratinguetá e 4 – Cruzeiro simulou o dobro no número de anos quentes quando comparados aos eventos frios. Já o modelo EC-EARTH3, apresentou uma maior frequência de

anos frios nas sub-regiões 1 – São José dos Campos e 4 – Cruzeiro. No período de 2071-2100 as diferenças entre a frequência de anos frios e quentes foi apenas de um evento, com exceção da Sub-região 4 – Cruzeiro, onde o modelo MPI-ESM1-HR simulou uma frequência de anos frios que duplica o número de anos quentes.

Para o cenário SSP5 8.5, no período de 2015-2040, a simulação do modelo MPI-ESM1-HR mostrou para as Sub-região 3 – Guaratinguetá e 4 – Cruzeiro o dobro no número de anos quentes quando comparados com os anos frios. Já no período de 2041-2070, além de apresentar um maior número de anos frios e quentes, o modelo EC-EARTH3 simulou para a sub-região 2 o dobro de número de anos frios em relação aos anos quentes. Já para a sub-região 1 – São José dos Campos o mesmo modelo simulou uma maior frequência de anos quentes em relação aos anos frios.

Nas outras sub-regiões, e pela simulação dos outros modelos a diferença entre o número de anos quentes e frios foi apenas de um.

No que se refere às anomalias de temperatura nas sub-regiões para as projeções futuras, em relação ao clima simulado pelos modelos (período de referência – 1961-2014), houve um consenso para os três modelos analisados e para os dois cenários de emissões (SSP2 4.5 e SSP5 8.5) (Figura 6). Haverá um aumento das temperaturas, que para o cenário SSP5 8.5 deve alcançar uma anomalia de 4,8°C (média dos três modelos), a mais alta, para o período de 2071-2100 na Sub-região 3 – Guaratinguetá. Por outro lado, a Sub-região 4 – Cruzeiro, segundo a simulação dos modelos, deve experimentar um aumento na temperatura um pouco menor, de 4,1°C, para o período de 2071-2100, além de mostrar maior diferença entre os modelos, mas mantendo a tendência de aumento das temperaturas.

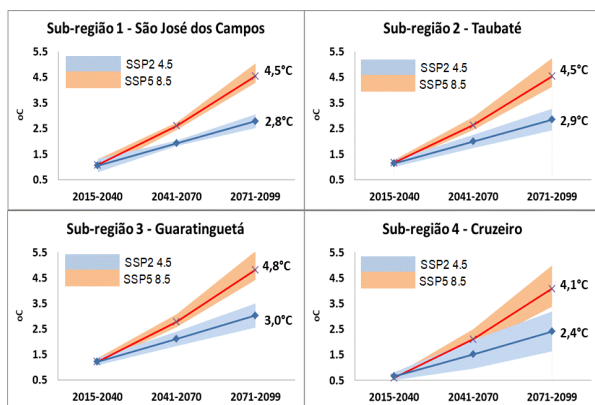


Figura 6 - Anomalias de temperatura média anual para as projeções futuras nas quatro sub-regiões,

para os períodos 2015-2040, 2041-2070 e 2071-2100, e cenários SSP2 4.5 e SSP5 8.5. A linha representa a anomalia média dos três modelos, e a área sombreada identifica a dispersão dos modelos.

As anomalias de precipitação, na escala mensal e anual para os períodos futuros foram diferentes entre os modelos analisados, não houve consenso. Para o cenário SSP2 4.5 (Figura 7), somente o modelo EC-EARTH3 SSP2 4.5 apresentou anomalia média anual positiva, tendo um aumento progressivo desde os períodos 2015-2040 e 2041-2070, para posteriormente mostrar um decaimento até o período de 2071-2100, na Sub-região 1 – São José dos Campos. Nessa mesma sub-região o modelo CNMR-CM6-1-HR, só para o período 2071-2100 mostrou a mais alta anomalia positiva. Mas, para a sub-região 4 as anomalias foram negativas, de diminuição da precipitação em relação a climatologia simulada.

Para o cenário SSP5 – 8.5 (Figura 7), o modelo EC-EARTH3 mostrou anomalias positivas para as quatro sub-regiões, sendo menores na Sub-região 4, porém com a característica de diminuição da chuva do período de 2015-2040 para 2041-2070, para depois aumentar no período de 2071-2100.

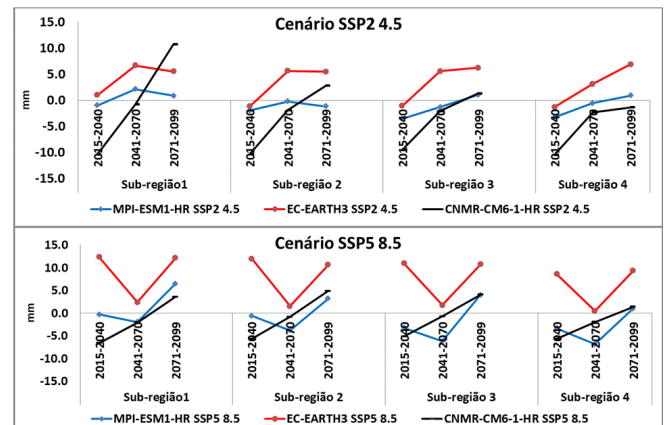


Figura 7 - Anomalias da precipitação média anual para as projeções futuras nas quatro sub-regiões, para os períodos 2015-2040, 2041-2070 e 2071-2100, e cenários SSP2 4.5 e SSP5 8.5.

As projeções climáticas de precipitação em cenários futuros nas escalas global, regional e sub-regional continuam não tendo consenso, o que ainda denota altas incertezas, este foi um assunto levantado no último relatório (AR6), as Bases Físicas do IPCC (IPCC, 2021).

Um trabalho recente de Almazroui et al. (2021) avaliou o desempenho dos 38 modelos globais acoplados do CMIP6 para a América do Sul, e examinou as projeções de precipitação e temperatura até o século XXI, considerando quatro caminhos socioeconômicos (SSP1 2.6, SSP2 4.5,

SSP3 7.0 e SSP5 8.5). Os resultados mostraram que os modelos do CMIP6 capturam com sucesso as principais características climáticas da América do Sul. No entanto, eles exibem simulações variadas na distribuição espaço-temporal da precipitação e temperatura na escala sub-regional, particularmente em altas latitudes e regiões montanhosas.

A projeção futura da precipitação, a partir de uma composição dos 38 modelos utilizados, especificamente no sudeste da América do Sul (SAS), onde se localiza a área de estudo deste trabalho, exibe um aumento, como os resultados do CMIP3 e CMIP5 já evidenciaram. Porém, se ressalta no estudo de Almazroui et al. (2021) que em algumas áreas do SAS esse aumento é consistente e significativo, o que significa que pelo menos 66% dos modelos concordam com o sinal de mudança de precipitação. No entanto, a região do Sudeste do Brasil não necessariamente está incluída nesse aumento significativo da precipitação, devido as incertezas ainda serem grandes, sobretudo quando se analisam extremos de chuva. Por esse motivo também, projeções utilizando modelos climáticos regionais têm sido utilizadas, com foco para Estados específicos ou sub-regiões como é o caso do presente estudo, onde foi evidente o não consenso dos modelos para um aumento das chuvas até o século 21.

Natividade, Garcia e Torres (2017) analisaram índices extremos climáticos de 19 modelos globais do CMIP5 para o estado de Minas Gerais e o estudo ressaltou que nos índices de extremos de chuva o resultado da modelagem mostrou aumento das condições secas (CDD) no norte de Minas Gerais no período presente e na projeção futura 2041-2070, e uma tendência de diminuição do Rx5day (máximas chuvas diárias acumuladas em cinco dias) e R95p (anos úmidos com chuvas diárias acima do percentil 95) em 2071-2100.

Utilizando modelos climáticos regionais de alta resolução espacial, Lyra et al. (2017) compararam simulações do modelo regional Eta-HadGem2-ES para as resoluções de 5 km e 20 km em três regiões metropolitanas (RM) do Sudeste do Brasil (RM de São Paulo, RM de Rio de Janeiro e RM de Santos). Os resultados demonstraram que a maior resolução espacial (5 km) apresenta melhores representações dos valores extremos, quando comparado à resolução de 20 km, para os valores observados. Os cenários de RCP 4.5 e RCP 8.5, na resolução de 5 km, mostraram redução dos extremos de excesso de precipitação (Rx1day, Rx5day e R95p) e aumento da duração de dias

secos (CDD) na maior parte da área das regiões metropolitanas.

Em contraste, as projeções das temperaturas dos modelos do CMIP6, para aumentos da temperatura na América do Sul são robustos em termos de magnitude, mesmo sob o SSP1 2.6 que é um cenário menos extremo. As mudanças futuras, em sua maioria, progridem monotonicamente do cenário de forçamento mais fraco para o mais forte, e do período de projeção de meados do século ao final do século, como observado nos resultados de Almazroui et al. (2021), e como verificado também para a área de estudo deste trabalho, as sub-regiões da RMVP, com os três modelos analisados.

Conclusões

Com base nos dados observados, a sub-região 1- São José dos Campos se caracterizou como a mais quente e a menos chuvosa em relação às outras sub-regiões. Já a Sub-região 2 apresentou, em média, as menores temperaturas. A variabilidade interanual da chuva e temperatura, mostrou para as 4 sub-regiões, tendências significativas de diminuição e aumento, respectivamente, segundo o teste de Man-Kendall.

Houve consenso em todos os modelos climáticos analisados para a série histórica, em subestimar o valor médio mensal da chuva (meses de verão). Para a temperatura do ar, os modelos CNRM-CM6-1-HR e EC-EARTH foram os que mais subestimaram as temperaturas ao longo de todos os meses. O Modelo MPI-ESM1-HR teve um bom desempenho na simulação do ciclo sazonal médio da temperatura.

Após as correções das projeções, se avaliaram as tendências para as temperaturas, e observou-se um aumento com significância estatística, e consenso para todos os modelos e cenários simulados. Nessa análise foi encontrada a maior anomalia média positiva de até 4,8°C para o cenário SSP5 8.5, para o período de 2071-2100 na sub-região 3 – Guaratinguetá. Isso pode impactar negativamente a população e o território em alguns municípios, que tem como principal fonte econômica, a agricultura. Na análise para o período de 1961-2014 já havia registrado tendência de aumento significativa estatisticamente.

No que se refere à precipitação, não houve um consenso pelas simulações dos modelos para aumento ou diminuição, seja na escala mensal ou anual de tendências, porém, para o modelo MPI-ESM1-HR houve tendência significativa de aumento, principalmente entre os períodos de 2071-2100 para o cenário SSP5 8.5, e em todas as

sub-regiões. Para os outros períodos avaliados de 2015-2040 e 2041-2070, o modelo apresentou tendências negativas ou decrescentes em todas as sub-regiões, mas sem significância estatística.

Em relação aos extremos até o final do século, a frequência de anos quentes (P90) e frios (P10) foi semelhante, apesar da tendência de aumento estatisticamente significativa ao longo do período 2015-2100. Isso sugere que as oscilações entre anos quentes e frios devem se intensificar.

Referências

- Almazroui, M., Ashfaq, M., Islam, M.N. et al., 2021. Assessment of CMIP6 Performance and Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America. *Earth Syst Environ* 5, 155–183 (2021). <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>.
- Assad, E.D., Martins, S. C., Beltrao, N. E., Pinto, H. S., 2013. Impacts of climate change on the agricultural zoning of climate risk for cotton cultivation in Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* (1977. Impressa), 48, 1-8, 2013.
- Brambila, R.B., Cardoso, A. O., Young, A. F., 2019. Aplicação de análise multivariada para a construção de indicadores ambientais na relação entre precipitação e deslizamentos. *REVISTA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS (IMPRESSA)*, 52, 44-61, 2019.
- Calado, G. G., Valverde, M. C., Baigorria, G. A., 2019. Use of Teleconnection Indices for Water Management in the Cantareira System - São Paulo - Brazil. *ENVIRONMENTAL PROCESSES*, 6, 413-431, 2019.
- Calado, G. G., Valverde, M. C., 2020. Assessing future scenarios of water availability using CMPI5 high resolution climate models - case study of the Alto Tietê Basin. *REVISTA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS (IMPRESSA)*, 55, 401-419, 2020.
- Cavalcanti, I. F. A., Nunes, L. H., Marengo, J. A., Gomes, J. L., Silveira, V. P., Castellano, M. S., 2017. Projections of Precipitation Changes in Two Vulnerable Regions of São Paulo State, Brazil. *American Journal of Climate Change*, 06, 268-293, 2017.
- CENSO DEMOGRÁFICO IBGE 2010. Notícias: primeiros resultados definitivos do Censo 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/noticias-censo.html?busca=1&id=3&idnoticia=1866&t=primeiros-resultados-definitivos-censo-2010-populacao-brasil-190-755-799-pessoas&view=noticia>>. Acesso em: mar. 2021.
- Coelho, C., Cardoso, D., Firpo, M., 2015. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. *São José dos Campos: Theoretical and Applied Climatology*. 2015.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., Taylor, K. E., 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937–1958, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>, 2016.
- Gomes, C., Reschilian, P. R., Uehara, A. Y., 2018. Perspectivas do planejamento regional do Vale do Paraíba e litoral norte: marcos históricos e a institucionalização da região metropolitana no Plano de Ação da Macrometrópole Paulista. *Revista Brasileira de Gestão Urbana (Brazilian Journal of Urban Management)*, 2018 jan./abr., 10(1), 154-171.
- EMPLASA. Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S.A. 2013. Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte Aspectos Jurídicos / Institucionais / Técnico. 2013.
- Ferreira, B. C. C., Valverde, M. C., 2022. Análise dos índices de extremos de precipitação em cenários futuros na bacia do rio Ribeira de Iguape - São Paulo. *Revista Brasileira de Meteorologia* [online]. 2022 [Acessado 23 Abril 2022], Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0102-7786370067>>. Epub 11 Abr 2022. ISSN 1982-4351. <https://doi.org/10.1590/0102-7786370067>.
- Grosso, J.D., Beduschi, C. E., Menuzzo, R., Moraes, J. M., Martinelli, L. A., 2005. Análise de séries temporais de vazão e precipitação em algumas bacias do estado de São Paulo com diferentes graus de intervenções antrópicas. *Revista Brasileira de Geociências.* , v.24, p.181 - 192, 2005.
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J., Lister, D. H., 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34, 623–642, 2014.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change (2014a). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R. and White,

- L.L. (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change (2014b). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Meyer, L.A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A. Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R. and Zhou, B. (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Karmeshu, N., 2012. Trend Detection in Annual Temperature & Precipitation using the Mann Kendall Test - A Case Study to Assess Climate Change on Select States in the Northeastern United States. Master of Environmental Studies Capstone Projects. University of Pennsylvania. Department of Earth and Environmental Science. August, 2012.
- Kendall, M. G., 1975. Rank correlation methods. London: Griffin, 1975. 202 p.
- Lenderink, G., Buishand, A., Deursen, W., 2007. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. *Hydrology and Earth System Science*, 11, -1159, 2007.
- Lyra, A. et al., 2017. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. *Theoretical And Applied Climatology*, [s.l.], 132, 1-2, p.683-683, 3 abr. 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-017-2110-0>.
- Mckee T. B., Doesken N. J., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 1993, Boston. Boston: AMS, 1993. p. 179-184.
- Mann, H. B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, Chicago, 13, 245–259, Jul. 1945.
- Marengo, J.A., Alves, L.M., 2012. The intense rainfall and floods in Rio de Janeiro. In: *State of the Climate in 2011*. Bull Am Meteorol Soc 93: S175–S177.
- Marengo, J. A., Ambrizzi, T., Alves, L. M., Barreto, N. D. J. D. C., Reboita, M., Ramos, A., 2020. Changing Trends in Rainfall Extremes in the Metropolitan Area of Sao Paulo: Causes and Impacts. *Frontiers in Climate*, 2, 3. 2020.
- Maricato, E.; Colosso, P., 2020. As cidades são centrais para o bem estar social: especificidades da produção do espaço urbano no Brasil. In: CASTRO, J. A. e POCHMANN, M. (Org.). *Brasil, estado social contra a barbárie*. 1ed. São Paulo: Fundação Perseu Abramo, 2020, p. 277-300.
- Neves de Toffoli, T., 2022. Panorama da variabilidade de temperatura e precipitação no Paraná/BR. *RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar* - ISSN 2675-6218, [S. l.], v. 3, n. 4, p. e341348, 2022. DOI: 10.47820/recima21.v3i4.1348. Disponível em: <https://recima21.com.br/index.php/recima21/article/view/1348>. Acesso em: 9 fevereiro. 2022.
- Nobre, C., Young, A., Saldiva, P., Marengo, J., Nobre, A., Ogura, A., Thomaz, O., Obregón, G., Silva, G., Ojima, R., Valverde, M. C., Silveira, A., Medeiros, G., 2011. Vulnerabilidades das megacidades brasileiras às mudanças climáticas: Região Metropolitana de São Paulo - Relatório Final.
- PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas., 2016. *Mudanças Climáticas e Cidades. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas* [Ribeiro, S.K.; Santos, A.S. (Eds.)]. PBMC, COPPE – UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 98p. ISBN: 978-85-285-0344-9.
- Regoto, P., Dereczynski, C., Chou, S. C., & Bazzanella, A. C., 2021. Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. *International Journal of Climatology*, 41(11), 5125–5142. doi:10.1002/joc.7119.
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O’neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., Samir, K.C., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., Da Silva, L. A., Smith, S., Stehfest, E., Bosetti, V., Eom, J., Gernaat, D., Masui, T., Rogelj, J., Strefler, J., Drouet, L., Krey, V., Luderer, G., Harmsen, M., Takahashi, K., Baumstark, L., Doelman, J. C., Kainuma, M., Klimont, Z., Marangoni, G., Lotze-Campen, H., Obersteiner, M., Tabeau, A., Tavoni, M., 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*.

- Volume 42, 2017, Pages 153-168, ISSN 0959-3780,
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.
- Reboita, M. S. et al., 2022. Ciclo de Vida do Sistema de Monção da América do Sul: Clima Presente e Futuro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [S.l.], v. 15, n. 1, p. 343-358, mar. 2022. ISSN 1984-2295. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/251766>>. Acesso em: 13 abr. 2022. doi:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.1.p343-358>.
- Sakuragi, J., Souza, L. H., 2000. Modelagem de brisas e circulação vale-montanha para o Vale do Paraíba e Litoral utilizando o RAMS. In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2000, Rio de Janeiro/RJ. XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro: Microservice - Microfilmagens Reproduções Técnicas Ltda., 2000.
- Salmi, T., Määttä, A., Anttila, P., Ruoho-Airola, T., Amnell, T., 2002. Makesens for detecting and estimating trends. Helsinki: Finnish Meteorological Institute, 2002.
- Salviano, M. F., Groppo, J. D., Pellegrino, G. Q., 2016. Análise de Tendências em Dados de Precipitação e Temperatura no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 1, 64-73, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620150003>.
- Santos, T. A., Fisch, G., 2016. Temperatura e precipitação: futuros cenários do município de Taubaté, SP, Brasil. *Revista Ambiente & Água*, v. 11, n. 5, p. 1068-1087, 2016. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1896>.
- SÃO PAULO (Estado). Decreto nº 1.166, de 9 de janeiro de 2012. Cria a região metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte, e dá providências correlatas. São Paulo, 62, 217-220, 2012.
- Sen, P. K., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 324, 1379-1389 p. 1968.
- Silva, R. C., Fisch, G., Santos, T. A., 2019. Future scenarios (2011-2040) of temporal and spatial changes in precipitation in the Paraitinga and Paraibuna watersheds, São Paulo, Brazil. *Revista Ambiente e Água*, 14, 1-12, 2019.
- Taylor, K. E., 2001. Summarizing Multiple Aspects of Model Performance in a Single Diagram. *Journal of Geophysical Research*, 106, 7183-7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Turner II, B. L., Kasperson, R., Matson, P., Mccarthy, J., Corell, R., Christensen, L., Selin, N., Kasperson, J., Luers, A., Martello, M., Polsky, C., Pulsipher, A., Schiller, A., 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 100. 8074-9. 10.1073/pnas.1231335100.
- Valverde, M. C., Marengo, J. A., 2010. Mudanças na circulação atmosférica sobre a América do Sul para cenários futuros de clima projetados pelos modelos globais do IPCC AR4. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 01 March 2010, Vol.25(1), pp.125-145.
- Valverde, M. C., 2017. A interdependência entre vulnerabilidade climática e socioeconômica na região do ABC Paulista. *Ambiente & Sociedade*. São Paulo 39-60, jul.-set. 2017.
- Vasquez Arroyo, E., Silva, F. T. F., Santos, A., Cordeiro, D., Marengo, J., Lucena, A., 2021. Climate impacts in the Brazilian energy security: analysis of observed events and adaptation options. *Sustentabilidade em Debate*. 11. 157-196. Doi:10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33838.
- Wilks, D. S., 2006. *Statistical Methods in the Atmospheric sciences*. 2nd Ed. London: Academic Press, 634p.
- Xavier, A. C. F., Rudke, A. P., Serrão, E. A. de O., Terassi, P. M. de B., Pontes, P. R. M., 2021. Evaluation of Satellite-Derived Products for the Daily Average and Extreme Rainfall in the Mearim River Drainage Basin (Maranhão, Brazil), *Remote Sensing*, 10.3390/rs13214393, 13, 21, (4393), (2021).
- Zákhia, E. M. S. et al., 2021. Impactos das Mudanças Climáticas em uma Bacia Hidrográfica no Sul do Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 36, n. 4, 667 681, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778636000>.