

Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura

Climate change in the São Francisco river basin: analysis of precipitation and temperature

Cleiton da Silva Silveira¹, Francisco de Assis de Souza Filho², Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins^{2,3},
Juliana Lima Oliveira³, Alexandre Cunha Costa¹, Marcio Tavares Nobrega⁴, Saulo Aires de Souza⁴ e
Robson Franklin Vieira Silva³

cleitonsilveira@unilab.edu.br; assis@ufc.br; espr.martins@gmail.com; oliveirajuu@gmail.com; cunhacos@gmail.com; marcio.nobrega@ana.gov.br; saulo.souza@ana.gov.br; robson@funceme.br

¹Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, CE, Brasil

²Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil

³Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Fortaleza, CE, Brasil

⁴Agência Nacional de Águas, Brasília, DF, Brasil

Recebido: 13/09/2015- Revisado: 13/11/2015- Aceito: 04/02/2016

RESUMO

As projeções de precipitação e temperatura dos modelos globais do Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5, utilizados no quinto relatório do Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC-AR5) são analisadas para a bacia do rio São Francisco para o período de 2011 a 2100 para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. Além disso, os modelos são avaliados quanto à representação da climatologia da precipitação no período de 1961 a 2000. Para a avaliação, os dados das estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) são utilizados. A avaliação baseia-se em dois índices de desempenho: a correlação e o erro quadrático médio. Para a análise das projeções, são calculadas as anomalias das médias anuais divididas em períodos de 30 anos (2011 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2100). Para avaliação de tendências e variabilidade são usados: a média móvel de dez anos, regressão linear e o método de Mann-Kendall-Sen. Aproximadamente 28% dos modelos analisados não representam adequadamente a sazonalidade da precipitação. Todos os modelos apresentaram tendência positiva para a temperatura, e apesar da divergência na precipitação, os mesmos projetam anomalias entre -20% e 20% em cada período de 30 anos para essa variável.

Palavras Chave: Mudanças climáticas, bacia do São Francisco e IPCC-AR5.

ABSTRACT

Precipitation and temperature projections from global models, made available through the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), and actually used in the AR5 by Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC-AR5), are assessed here for São Francisco River Basin. RCP 4.5 and RCP 8.5 are considered throughout the period 2011 to 2100. Incidentally, global models are evaluated concerning their representativity related to 1961-2000 climatology from Brazilian National Meteorological Institute (INMET) data. Two indexes were evaluated: correlation and square mean error. The analysis of projections was performed through the assessment of yearly average values of 30 years period (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100). Additionally to evaluate trends and variability it was considered 10 year moving averages, linear regression and Mann-Kendall-Sen method. Approximately 28% analyzed models do not capture the seasonal precipitation reliably. All models present positive trend for temperature, and despite of divergence on precipitation, the models projected anomalies between -20 and 20 for each time-slice for this variable.

Keywords: São Francisco basin; Climate change; IPCC-AR5.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas devem produzir grandes impactos sobre os recursos hídricos (PBMC, 2012; IPCC, 2013; IPCC, 2007(b); BANCO MUNDIAL, 2010). O aquecimento observado nas últimas décadas pode causar mudanças no ciclo hidrológico, por meio de modificações dos padrões de precipitação e evapotranspiração, o que pode impactar diretamente a umidade do solo, a reserva subterrânea e a geração do escoamento superficial (IPCC, 2007(a); IPCC, 2013). Esses aspectos associados ao aumento da demanda por água projetado para as próximas décadas (principalmente devido ao crescimento populacional e aumento da riqueza, regionalmente) poderão exercer grande pressão nos hidrossistemas brasileiros (PBMC, 2012; SALATI et al., 2008).

No Brasil, o aumento da demanda de água da irrigação pode levar à diminuição da segurança alimentar e maior vulnerabilidade dos pobres agricultores rurais, especialmente nas regiões semiáridas (PBMC, 2012). Mudanças nos padrões de escoamento nas bacias podem atingir a geração de energia hidrelétrica no país (SILVEIRA et al., 2014).

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) é o principal órgão científico internacional para as avaliações das alterações climáticas, e foi criado pelo Programa das Nações Unidas para o Ambiente (PNUA) e pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) em 1988, para fornecer visões científicas claras sobre o estado atual do conhecimento das mudanças climáticas e seus possíveis impactos socioeconômicos e ambientais (IPCC).

Desde 1988, quando foi criado o IPCC, cientistas vinculados aos principais centros de pesquisa em clima reúnem-se para publicar relatórios sobre os possíveis cenários de emissão de gases de efeito estufa na atmosfera e os impactos nas diversas variáveis climáticas. Até o momento, foram publicados cinco relatórios, os quais confirmam a projeção de aumento da temperatura média da atmosfera. Evidências de mudanças globais foram apresentadas pelo quinto relatório-AR5, em decorrência do aumento da concentração dos gases de efeito estufa a partir de atividades humanas. As concentrações de dióxido de carbono (CO₂), de gás metano (CH₄) e de óxido nitroso (N₂O) ultrapassaram os valores pré-industriais (IPCC, 2007(a); IPCC, 2013). Os indicadores de mudanças climáticas mostrados por esses relatórios foram o aumento da temperatura global, aumento do nível do mar e a redução da cobertura de gelo.

Diversos autores identificaram aumento da temperatura planetária nas últimas décadas, combinado com modificações nos campos de precipitação, devido às mudanças climáticas (MARENGO e VALVERDE, 2007; MARENGO e SOARES, 2005; NÓBREGA et al., 2011; TOMASELLA et al., 2009; MILLY et al., 2005; SILVEIRA et al., 2012; SILVEIRA et al., 2013 (a,b); SILVEIRA et al., 2014; ARNELL, 2004; ARNELL e REYNARD, 1996; BANCO MUNDIAL, 2010). Essas mudanças têm sido alvo de discussões e pesquisas científicas em todo mundo com vistas ao entendimento de sua ocorrência (IPCC, 2007(a); NOBRE, 2005), assim como a identificação e a avaliação dos possíveis impactos ambientais, sociais e econô-

micos (IPCC, 2007(b); IPCC, 2013) e a elaboração de medidas que minimizem suas consequências adversas.

Nesse contexto, estudos mostram que há divergências entre os modelos globais do *Coupled Model Intercomparison Project 5* (CMIP5) (modelos que serviram como base para elaboração do quinto relatório do IPCC), quanto às projeções de precipitação para diversas regiões do Brasil (SILVEIRA et al., 2013(a); PBMC, 2012). Especialmente no Nordeste brasileiro (NEB), região em grande parte semiárida e muito vulnerável à variabilidade climática, é necessário que as práticas de gestão de água contemplem as incertezas inerentes à mudança no clima, para que as estratégias tomadas não levem a grandes arrependimentos (SILVEIRA et al., 2013(b)).

O Rio São Francisco, um dos principais do NEB, tem papel importantíssimo no abastecimento de água para irrigação e para o consumo humano, na geração de energia (com as hidrelétricas de Paulo Afonso e Sobradinho), turismo e pesca. Dessa forma, estudos que visem identificar padrões de variabilidade e mudanças climáticas nessa região podem ser úteis para redefinir políticas de gerenciamento de recursos e tornar o sistema mais resiliente aos desafios decorrentes das mudanças climáticas.

Este estudo tem por objetivo analisar os impactos das mudanças no clima na bacia do Rio São Francisco sobre as variáveis meteorológicas precipitação e temperatura.

METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

O Brasil abriga cerca de 12% da água doce do mundo. No entanto, em algumas áreas, a escassez de água é uma questão muito séria. Por exemplo, no Nordeste do Brasil a região semiárida tem apenas 5% do total de água do Brasil, mas possui 18% do seu território total e 28% da sua população (PEREIRA e FORMIGA-JOHANSSON, 2005). Uma das mais importantes fontes de água para toda essa região é o rio São Francisco; este rio é um dos maiores do Brasil. A bacia abrange 631.133 km², que representa cerca de 7,5% da área total do Brasil e se estende por quase 2900 km. A bacia serve à múltiplos usos, desde abastecimento doméstico, abastecimento industrial e irrigação até pesca, energia hidrelétrica e transporte; virtualmente, todos os tipos de uso da água (Santos et al., 2012).

Mais de 330.000 hectares da bacia são dedicados à agricultura intensa (11% da agricultura irrigada total do Brasil). A energia hidrelétrica que é gerada ali tem um potencial maior que 10.500 MW, o que pode facilmente atender os 13 milhões de habitantes da bacia.

2.2. Dados observacionais

Com a intenção de representar as condições climáticas presentes sobre a bacia estudada para os anos de 1961 até o ano 2000, a base de dados do INMET foi utilizada conforme mostra a Figura 1.

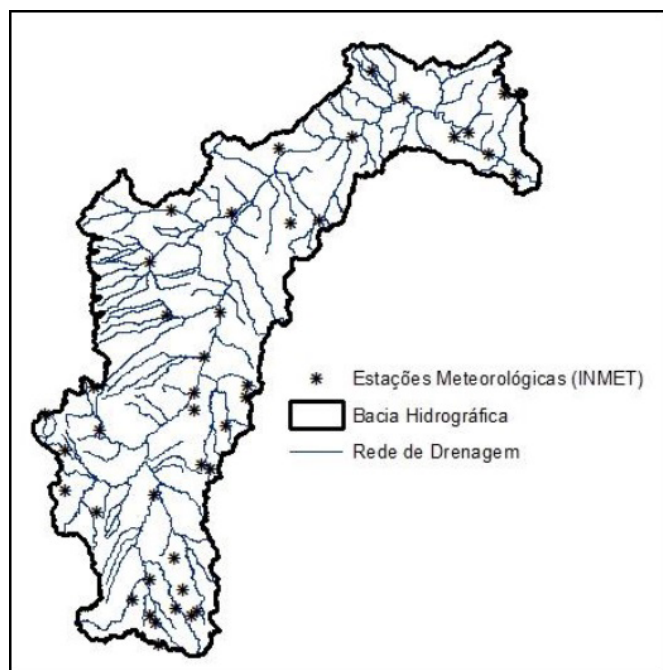


Figura 1- Bacia do São Francisco e estações meteorológica do INMET utilizadas no experimento

2.3. Modelos do IPCC

Os dados provenientes do IPCC são resultados de simulações de modelos globais de alguns centros de pesquisa que contribuem para a confecção do relatório do IPCC-AR5 (ver Tabela 1), forçadas pelas concentrações observadas de gases de efeito estufa durante o século XX e forçadas por uma concentração estimada para o século XXI.

Como parte da fase preparatória para o desenvolvimento dos novos cenários para o AR5, foram criados os chamados RCPs (*Representative Concentration Pathways*), que servem como entrada para modelagem climática e química atmosférica nos experimentos numéricos do CMIP5. Os RCPs recebem seus nomes a partir dos níveis das forçantes radiativas, conforme relatado por cada equipe de modelagem elaboradora de cada RCP. Assim, RCP-X implica em um cenário no qual a forçante radiativa de estabilização ou de pico ou ao final do século XXI corresponde a $X \text{ W.m}^{-2}$. Neste trabalho serão usados os cenários RCP4.5 e RCP8.5 para análise das projeções do século XXI.

O cenário RCP4.5 pressupõe que a forçante radiativa estabiliza pouco depois de 2100, sem ultrapassar o nível de radiação a longo prazo de $4,5 \text{ W/m}^2$. Essa projeção é consistente com a estabilização da demanda energética mundial, programas de reflorestamento fortes e políticas climáticas rigorosas. Além

Tabela 1-Lista de modelos do CMIP5 utilizados para realização do estudo

BCC-CSM1.1	Beijing Climate Center Climate System Model - version 1.1	China
MIROC5	Model for Interdisciplinary Research on Climate	Japão
HadGEM2-AO	Hadley Global Environment Model 2 – Atmosphere Ocean	Reino Unido
ACCESS1.3	Australian Community Climate and Earth System Simulator version 1.3	Austrália
CSIRO-Mk3.6.0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation Model version Mark 3.6.0	Austrália
BNU-ESM	Beijing Normal University Earth System Model	China
MPI-ESM-MR	Max-Planck-Institut für Meteorologie Earth System Model – Mixed Resolution	Alemanha
ACCESS1.0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) and Bureau of Meteorology	Austrália
MIROC-ESM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute	Japão
MIROC-ESM-CHEM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute	Japão
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques Climate Model version 5	França
MPI-ESM-LR	Max-Planck-Institut für Meteorologie – Earth System Model – Low	Alemanha
CCSM4	Community Climate System Model version 4	Estados Unidos
CMCC-CMS	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	Itália
CESM1-CAM5	Community Earth System Model – Community Atmospheric Model version 5	Estados Unidos
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute	Japão
CESM1-BGC	Community Earth System Model, version 1 – Biogeochemistry	Estados Unidos

Continua...

Tabela 1 - Continuação..

CMCC-CM	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici Climate Model	Itália
CanESM2	Canadian Earth System Model 2nd generation	Canadá
GISS-E2-H	Goddard Institute for Space Studies	Estados Unidos
INM-CM4	Institute for Numerical Mathematics Climate Model 4	Rússia
IPSL-CM5B-LR	Institut Pierre-Simon Laplace Earth System Model for the 5th IPCC report – Low Resolution	França
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace Earth System Model for the 5th IPCC report – Low Resolution	França
GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Climate Model 3	Estados Unidos
GFDL-ESM2M	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Earth System Model 2	Estados Unidos
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre -Earth System Models	Reino Unido
IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre-Simon Laplace Earth System Model for the 5th IPCC report – Medium Resolution	França

disso, sugere uma estabilização das emissões de metano associadas a um leve aumento das emissões de CO₂ até 2040 até atingir o valor alvo de 650 ppm de CO₂ equivalente na segunda metade do século XXI.

O cenário RCP8.5 sugere um crescimento contínuo da população associada a um desenvolvimento tecnológico lento, resultando em acentuadas emissões de dióxido de carbono. Este cenário é considerado o mais pessimista para o século XXI em termos de emissões de gases do efeito de estufa, sendo consistente com nenhuma mudança política para reduzir as emissões e forte dependência de combustíveis fósseis.

2.4. Avaliação da sazonalidade dos modelos no século XX

Para avaliação dos modelos é calculada a climatologia mensal média sobre a região de estudo para todos os modelos do IPCC e para as observações. Em seguida, é feita uma comparação com base em índices estatísticos para que possam ser definidos que modelos possuem melhor desempenho para a região de estudo.

As medidas de desempenho utilizadas, cujas definições estão indicadas a seguir, são: raiz do erro quadrático médio da contribuição percentual mensal em relação às chuvas anuais (RMSE_PC) e correlação (CORREL) (WILKS, 1995).

A raiz do erro quadrático médio percentual (RMSE_PC) é a raiz quadrada da média das diferenças individuais quadráticas entre a contribuição percentual mensal das chuvas modeladas nos totais anuais e a contribuição percentual mensal das chuvas observadas nos totais anuais e é definida pela equação:

$$RMSE_PC = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{100 P_i}{\sum_{j=1}^n P_j} - \frac{100 A_i}{\sum_{j=1}^n A_j} \right)^2}, \quad (1)$$

Onde *n* são os meses, *P* é previsão de cada mês e *A* a análise considerada como observação.

Valores grandes do RMSE_PC representam grandes erros nos campos previstos, e valores próximos de zero indicam uma previsão quase perfeita. Elevando ao quadrado o termo da diferença, o RMSE_PC tende a dar maior peso às grandes discrepâncias entre os campos observados e previstos.

A correlação, representada pela equação 2, pode assumir valores entre -1 e 1 que indicam, respectivamente, perfeita anticorrelação e perfeita correlação, havendo ainda a total ausência de correlação verificada com um resultado igual a zero. Este índice tem a capacidade de detectar correspondência de fase entre as séries, sendo, por construção, insensível a erros de viés.

$$CORREL = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}} \quad (2)$$

$$AVAL = \alpha_c \left(\frac{CORREL - CORREL_{MIN}}{CORREL_{MAX} - CORREL_{MIN}} \right) + \alpha_r \left(\frac{RMSE_PC_{MAX} - RMSE_PC}{RMSE_PC_{MAX} - RMSE_PC_{MIN}} \right), \quad (3)$$

Ao final do cálculo desses dois índices, é feita uma avaliação ponderada para que os modelos possam ser classificados, dada por:

tal que

$$\alpha_c + \alpha_r = 1 \quad (4)$$

Sendo $\alpha_c = 0,5$ e $\alpha_r = 0,5$, CORREL_{MIN} a menor correlação obtida entre os modelos do IPCC e CORREL_{MAX} a máxima correlação, RMSE_PC_{MAX} o máximo erro quadrático médio percentual dos modelos do IPCC e RMSE_PC_{MIN} o mínimo. A variável AVAL assume valores entre 0 e 1 que indicam, respectivamente, o pior entre os modelos avaliados e o melhor deles, segundo este critério.

2.5. Análise das Projeções

2.5.1. Cálculo das Anomalias Médias Anuais

Para o cálculo da anomalia na média anual, considerou-se a equação 5, dada pela diferença entre a média anual do cenário do século XXI e média anual do cenário histórico sobre a média anual do século XX:

$$A_{\text{anual}} = \frac{(P_{\text{XXI}}^a - P_{\text{XX}}^a)}{P_{\text{XX}}^a} \cdot 100 \quad (5)$$

Onde P_{XXI}^a é média da precipitação anual para o cenário do século XXI e P_{XX}^a é a média da precipitação anual para o cenário histórico. Enquanto para temperatura a anomalia é obtida pela diferença entre a média do período no século XXI e média no período no século XX.

2.5.2. Análise de tendência das precipitações anuais

Para analisar a tendência do século XXI, as séries de precipitações anuais dos cenários do século XXI foram padronizadas com base nas características da série do cenário histórico de 1961 a 2000. Essa padronização segue a equação 6:

$$Z = \frac{X_{\text{XXI}}^j - \bar{X}_{\text{XX}}}{\sigma_{\text{XX}}} \quad (6)$$

Onde Z é a precipitação do cenário do século XXI normalizada, X_{XXI}^j a precipitação anual dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 para um ano j , \bar{X}_{XX} a precipitação anual média do cenário

histórico na série de 1961 a 2000 e σ_{XX} o desvio padrão da série de precipitações anuais do cenário histórico.

As metodologias de avaliação de tendência/variabilidade utilizadas foram os métodos clássicos de Mann-Kendall-Sen (HIRSCH et al., 1982; BURN e ELNUR, 2002), Média Móvel de 10 anos e Regressão Linear.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Avaliação dos modelos

A maioria dos modelos apresentou correlação superior a 0,9 em relação à climatologia observada, indicando que estes modelos representam a sazonalidade da precipitação na bacia corretamente, conforme indica a Figura 2. O modelo japonês BCC-CSM1.1 apresentou correlações superiores a 0,97 e RMSE_PC inferior a 1,5%, o que o classifica como o melhor modelo segundo a avaliação proposta neste trabalho.

O modelo HadGEM-ES apresentou correlação inferior a 0,7, bem abaixo dos demais modelos, e um dos maiores RMSE_PC. Isto levou esse modelo a apresentar AVAL próximo a 0,1, indicando que o mesmo não representa adequadamente a sazonalidade da precipitação na bacia do São Francisco. Além disso, os modelos IPSL-CM5A-MR, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-LR, GFDL-ESM2M, GFDL-CM3 e IPSL-CM5B-LR apresentaram AVAL bem inferiores aos demais modelos, indicando também que estes são inferiores aos demais na representação da sazonalidade da precipitação na bacia analisada.

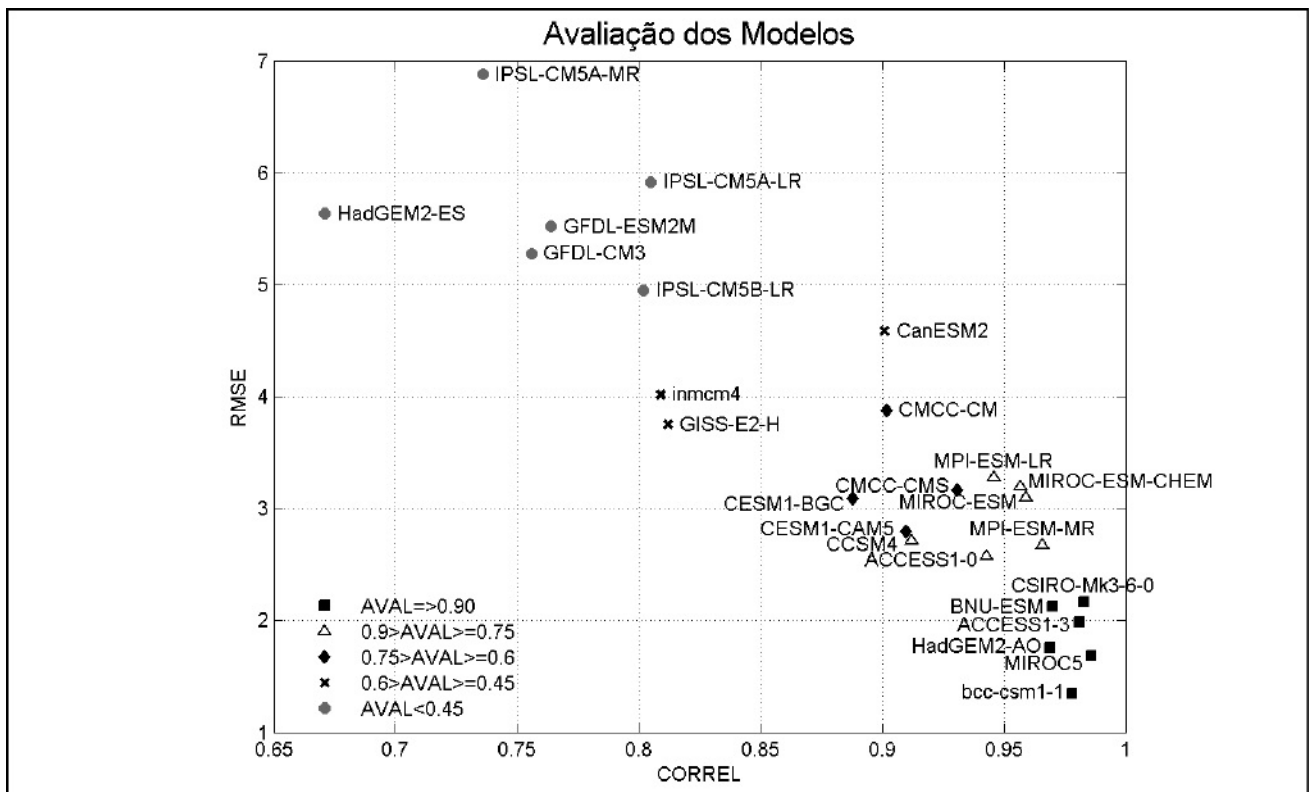


Figura 2 – Avaliação dos modelos do CMIP5 para a bacia do rio São Francisco quanto a representação da sazonalidade

3.2. Projeções Para o século XXI

Nas Figuras 3 e 4 são apresentadas as médias anuais de precipitação dos modelos do CMIP5 na bacia do rio São Francisco, em três períodos do século XXI: 2011 a 2040, 2041 a

2070 e 2071 a 2100. Os cenários RCP 4.5 e RCP8.5 são confrontados com o período de 1961 a 2000. Os modelos são dipostos em quadrantes formados pelo cruzamento das medianas das anomalias de precipitação e temperatura. Os quadrantes são formados pela combinação seco ou úmido (anomalias maiores

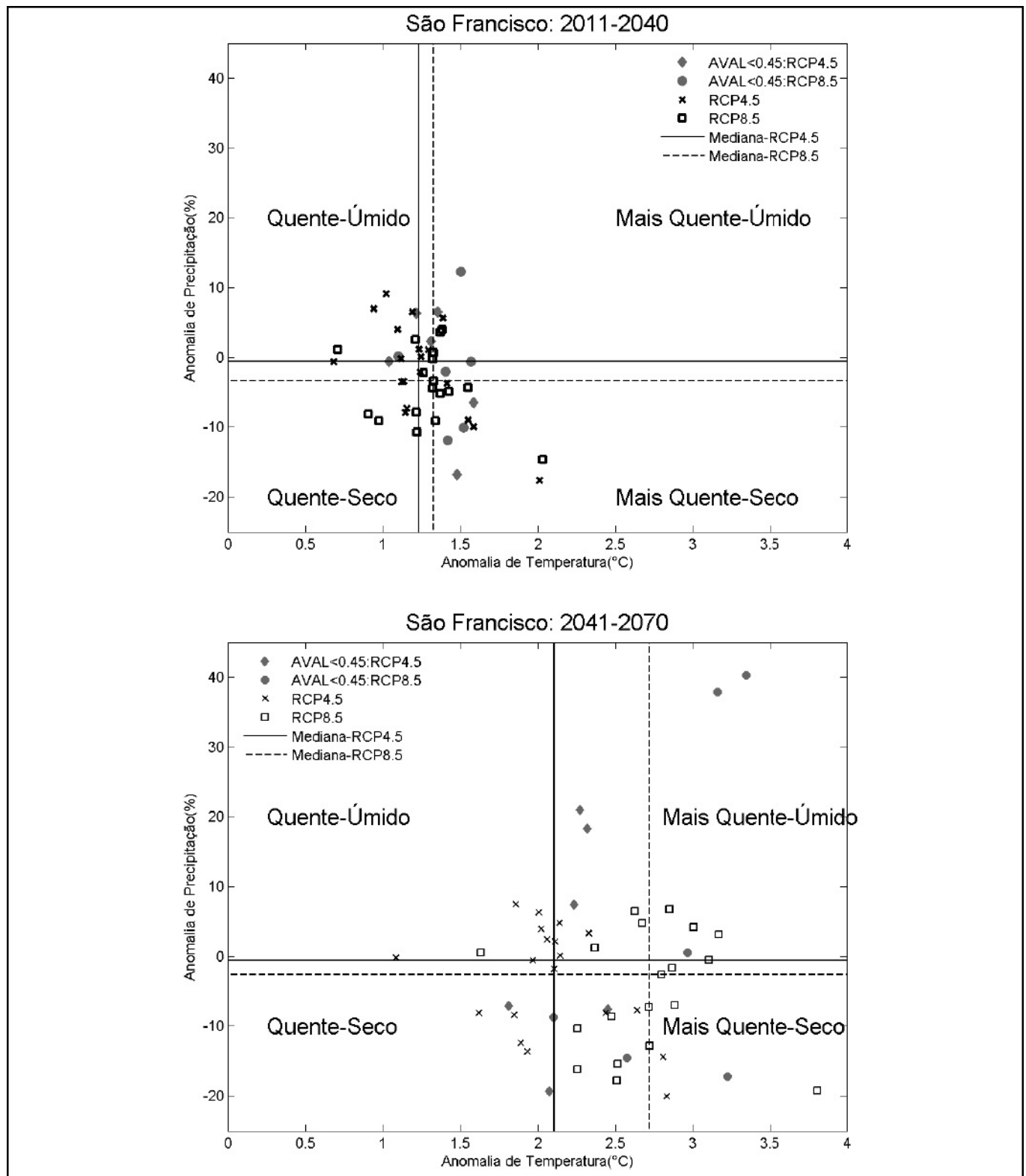


Figura 3- Anomalias de precipitação(%) e temperatura(°C) divididas em quadrantes pela intersecção das medianas das mesmas, para os cenários RCP 4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2011 a 2040 e 2041 a 2070 para a bacia do rio São Francisco.

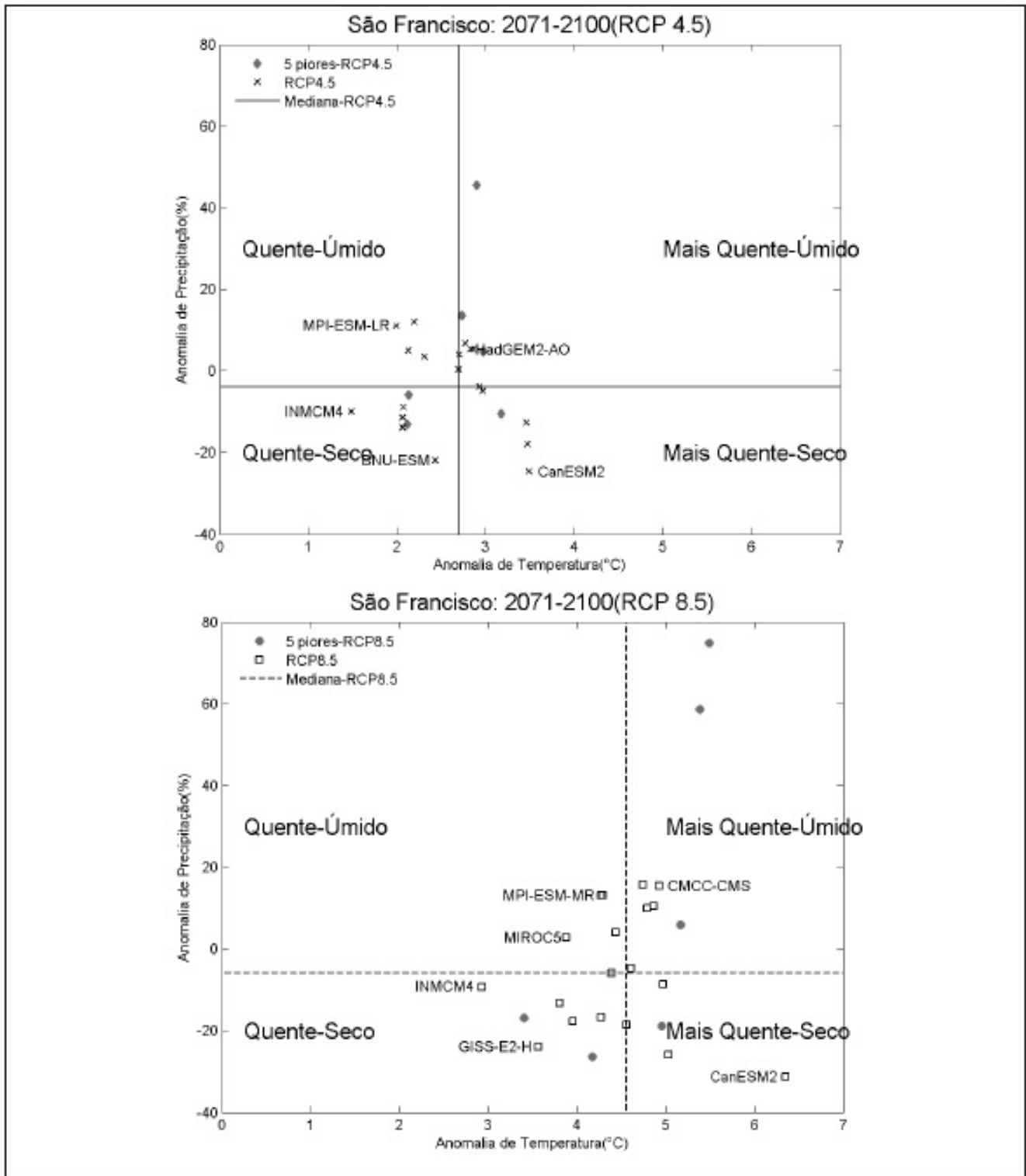


Figura 4- Anomalias de precipitação(%) e temperatura(°C) divididas em quadrantes pela intersecção das medianas das mesmas, para os cenários RCP 4.5 e RCP8.5 no período de 2071 a 2099 para a bacia do rio São Francisco.

do que a mediana da precipitação são considerados úmidos e abaixo da mediana secos) e pela combinação quente ou mais quente (anomalias maiores do que a mediana da temperatura são considerados mais quentes e abaixo da mediana quentes).

Os modelos divergem quanto ao futuro da precipitação

para ambos os cenários. Porém, concordam que a temperatura deve aumentar no período de 2011 a 2100, discordando apenas em magnitude. Para o cenário RCP8.5, os impactos na temperatura são maiores, principalmente no último período de 30 anos do século XXI, onde a anomalia de temperatura é superior a

4°C para a maioria dos modelos.

A mediana da anomalia de precipitação para os três períodos e cenários apresentou-se levemente inferior a 0%, enquanto a mediana das anomalias de temperatura foi aproximadamente 1,3°C no período de 2011 a 2040 para ambos os cenários e se deslocou na direção positiva nos demais períodos.

Para o cenário RCP 4.5, a mediana das anomalias de temperatura no período de 2041 a 2070 foi de aproximadamente 2,2°C e 2,7°C no período de 2071 a 2100. O cenário RCP 8.5 intensifica o sinal da anomalia em relação ao RCP 4.5, mostrando a mediana em 2,7°C no período de 2041 a 2070 e 4,6°C no terceiro período de 30 anos.

No período de 2011 a 2040, as projeções dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 são muito semelhantes, os modelos projetam valores de anomalia entre -20% e 10% para precipitação e a maioria dos modelos mostra aumento de 1°C a 1,5°C para temperatura. O extremo do quadrante mais quente e seco é em torno -20% abaixo da média histórica de precipitação e 2°C de anomalia de temperatura para ambos os cenários. O quadrante quente e seco apresenta extremo negativo de -10% de anomalia de precipitação e o menor valor de anomalia de temperatura é 1°C para o cenário RCP 8.5 e 1,2°C para RCP 4.5.

Os modelos do quadrante mais quente e úmido apresentam-se próximos à mediana da temperatura e as anomalias de precipitação são inferiores a 10%, exceto no caso dos modelos que apresentaram AVAL inferior a 0,45. O quadrante quente e úmido apresenta, como menor valor de anomalia de temperatura (aproximadamente 0,75°C). Neste caso, o modelo apresenta aproximadamente 0% de anomalia de precipitação para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, enquanto os modelos que representam o extremo de precipitação indicam 10% acima da média histórica, associados a um aumento de temperatura de aproximadamente 1°C.

Já no período de 2041 a 2070, as anomalias de precipitação variam entre 10% e -20%, se considerado apenas os modelos com AVAL maior que 0,45, não havendo diferenças significativas em relação aos extremos de cada quadrante para essa variável. As projeções entre os cenários divergem quanto à magnitude das anomalias temperatura dos quadrantes, conforme mostram as medianas. Enquanto as anomalias de temperatura da maioria dos modelos no cenário RCP 4.5 encontram-se entre 1,5°C e 2,5°C, para o RCP 8.5 a maioria dos modelos indicam anomalias entre 2,5°C e 3,2°C. Considerando que o aumento na temperatura contribui para o aumento da evapotranspiração potencial, é esperado que, em condições semelhantes ao cenário RCP 8.5, os impactos sobre agricultura e sobre os hidrossistemas ligados ao rio São Francisco sejam maiores, pois condições que contribuam para um cenário de déficit hídrico, ocasionariam uma demanda maior por água para irrigação.

O modelo com menores anomalias do quadrante mais quente e seco indica redução de 20% na precipitação em relação à média histórica para ambos os cenários, a anomalia de temperatura indicada por este modelo no cenário RCP 4.5 é de 2,8°C, enquanto para o RCP 8.5 é de 3,8°C. Assim como esse quadrante, os extremos do quadrante mais quente e úmido apresentam valores semelhantes de anomalia de precipitação para ambos os cenários, aproximadamente 10% de aumento,

divergindo quanto à magnitude do aumento de temperatura, enquanto os modelos do RCP 8.5 apresentam anomalias de temperaturas entre 2,7°C e 3,2°C os modelos do RCP 4.5 indicam anomalias entre 2,1°C e 2,4°C. No quadrante quente e úmido, os modelos de ambos os cenários mostram anomalias de precipitações também entre 0 e 10%, e a menor anomalia de temperatura projetada foi de 1,6°C para o RCP 8.5 e 1,1°C para o RCP 4.5. O quadrante formado pelos modelos quente e úmido indica que o cenário RCP 8.5 apresenta situações mais pessimistas de precipitação e temperatura do que RCP 4.5, com as anomalias de precipitação do primeiro grupo atingindo -20% abaixo da média histórica, enquanto o segundo grupo indica no máximo uma redução de 15%.

No período de 2071 a 2100, as anomalias de precipitação ficam entre -25% e 20%, considerando os modelos com AVAL maior que 0,45. Quanto às anomalias de temperatura, para os modelos do RCP 4.5, estas variam entre 1,5°C e 3,5°C e, para os modelos do RCP 8.5, as anomalias variam entre 3°C e 6,4°C.

Na Figura 4, são indicados os modelos que representam as situações extremas de anomalia de precipitação e temperatura em cada quadrante para o período de 2071 a 2100.

O modelo CanESM2 indica as maiores reduções de precipitação para ambos cenários, sendo o mais pessimista do quadrante mais quente e seco, indicando 3,5°C de anomalia de temperatura para o RCP 4.5 e 6,4°C para o RCP 8.5 associados a uma redução de aproximadamente 25% na precipitação. Enquanto o INMCM4 é o modelo que apresenta as menores anomalias de temperatura, sendo um dos extremos do quadrante quente e seco para ambos os cenários, sugerindo reduções de precipitação de aproximadamente 5% e aumento de temperatura de 3°C para o RCP 8.5 e 1,5°C para o RCP 4.5 nesse período. Este quadrante contém ainda os modelos que possuem menor valor de anomalia de precipitação: o BNU-ESM para o RCP 4.5 e o GISS-E2-H para o RCP 8.5.

No quadrante quente e úmido, o modelo MPI-ESM-LR é o que possui uma das maiores anomalias de precipitação positiva, associado a uma menor projeção de aumento de temperatura para o período de 2071 a 2100 para o cenário RCP 4.5: aproximadamente 10% para precipitação e 2°C para temperatura. O modelo MIROC5 apresenta a menor anomalia de temperatura deste quadrante no cenário RCP 8.5, e o MPI-ESM-MR apresenta a maior anomalia de precipitação.

No quadrante mais quente e úmido, o modelo de maior anomalia é o HadGEM2-A, para cenário RCP 4.5, e para o RCP8.5, é o CMCC-CMS.

As Figuras 5 e 6 indicam que além de haver uma discordância na magnitude das anomalias da média da variável na região, existem também divergências espaciais. Todos os modelos indicam que a temperatura deve aumentar na bacia para ambos os cenários no período de 2071 a 2100, principalmente na porção mais ao sul, onde ocorre o aproveitamento hidroelétrico da bacia.

Para o cenário RCP 4.5, os modelos sugerem um aumento entre 2°C e 2,5°C na porção norte da bacia, discordando na porção mais ao sul. Quanto à precipitação, os modelos divergem em todas as regiões da bacia. O modelo HadGEM2-AO mostra reduções na porção norte da bacia de até 20% associado a aumento no extremo sul de aproximadamente 15%.

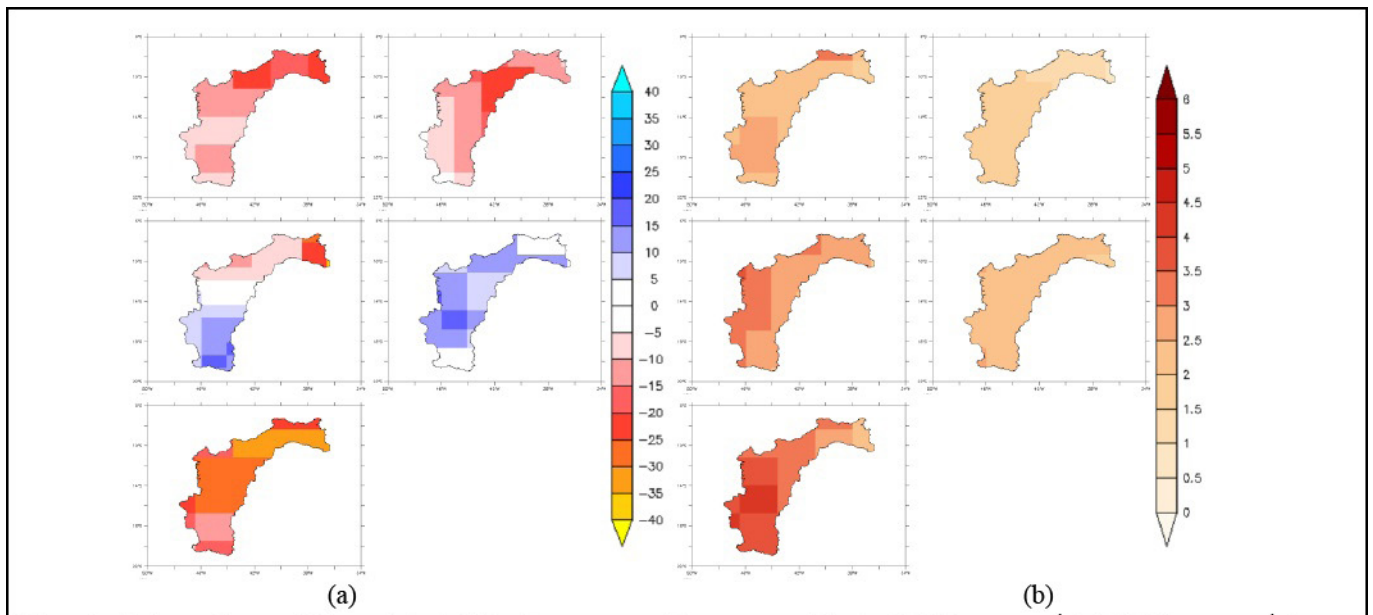


Figura 5 – (a) Anomalia espacial de precipitação(%) e (b) temperatura(°C) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP 4.5 para o período de 2071 a 2100. Na sequência de cima para baixo e da esquerda para direita: BNU-ESM, INMCM4, HadGEM2-AO, MPI-ESM-LR e CanESM2

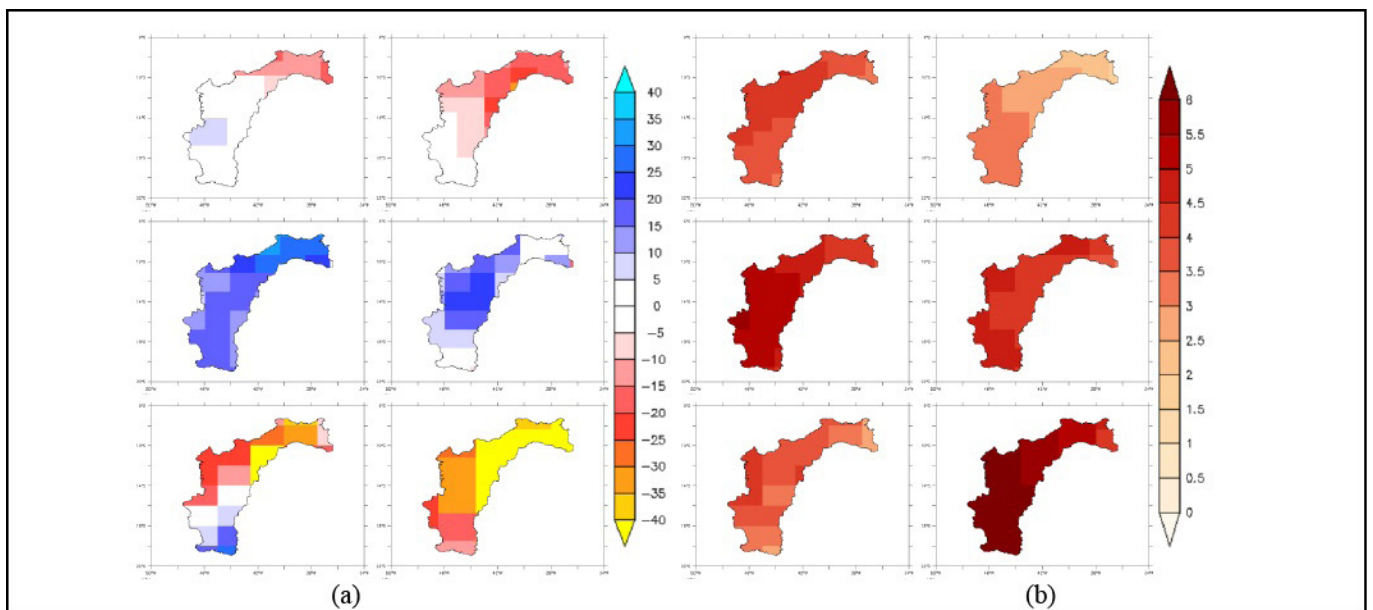


Figura 6 – (a) Anomalia espacial de precipitação (%) e (b) temperatura(°C) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP 8.5 para o período de 2071 a 2100. Na sequência de cima para baixo e da esquerda para direita: MIROC5, inmcm4, CMCC-CMS, MPI-ESM-MR, GISS-E2-H e CanESM2

Já o cenário RCP8.5 mostra maior divergência espacial entre as anomalias de temperatura e precipitação, sugerindo que, nesse cenário, há uma maior incerteza em relação ao comportamento dessas variáveis no futuro.

O modelo CanESM2 mostra redução das precipitações em toda a bacia, principalmente na porção mais ao norte da bacia, correspondente ao Baixo São Francisco, para ambos os cenários. Esta diminuição é maior em módulo para o cenário RCP8.5, superior a 40% na porção semiarida da bacia do São Francisco, o que indica que esta poderá tornar-se ainda mais seca.

3.3. Análise de Tendência

Todos os modelos do CMIP5 apresentam tendência positiva significativa, segundo o teste de Man-Kendall Sen, para a temperatura para ambos cenários na bacia do rio São Francisco, conforme indica a Figura 7. Para o cenário RCP 4.5 o conjunto de modelos indicam tendência positiva entre 0,18 e 0,35°C/década, enquanto indicam para o cenário RCP 8.5 entre 0,36 e 0,68°C por década.

Para a precipitação, a maioria dos modelos não indica

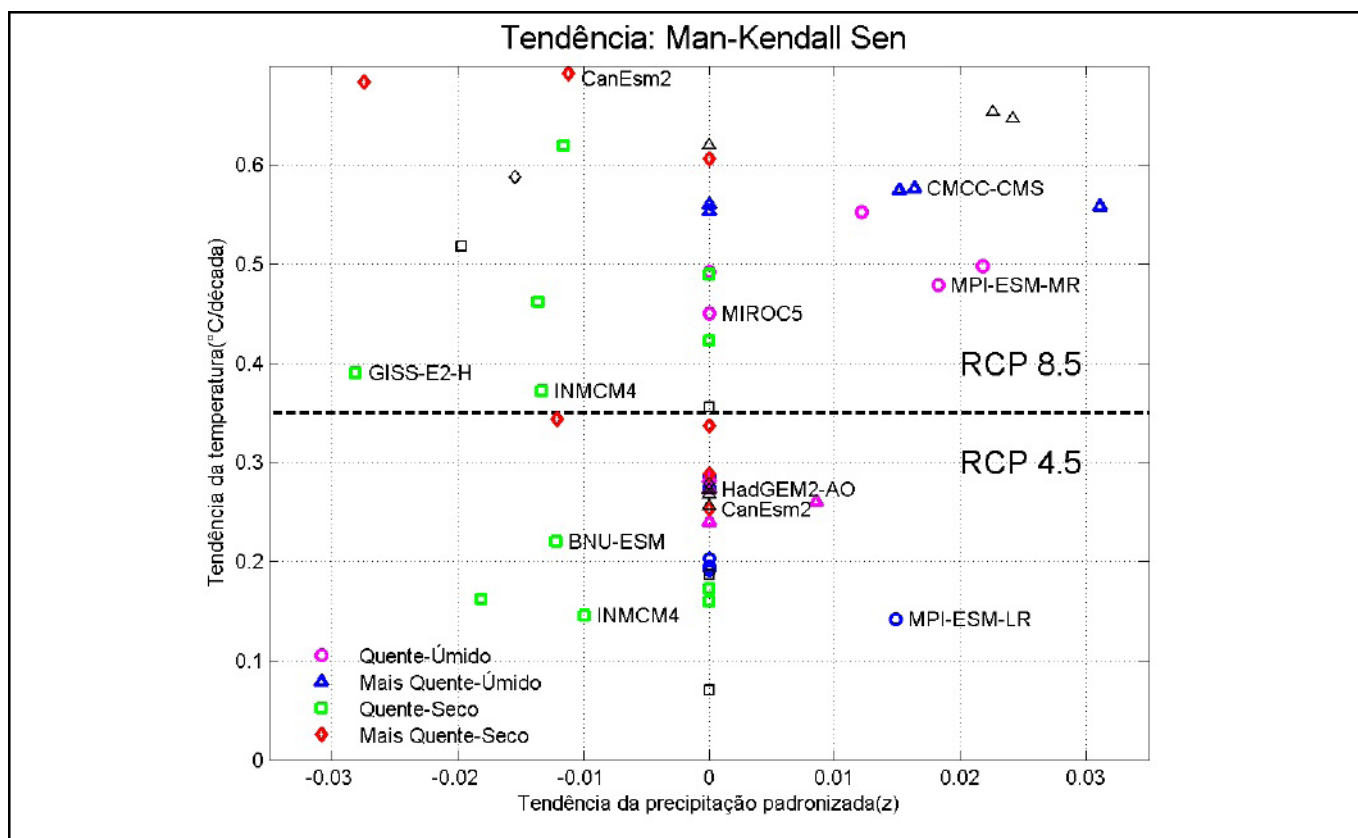


Figura 7 – Tendência segundo Man-Kendall Sen para o período de 2011 a 2009 para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 na bacia do rio São Francisco. Em preto os modelos que apresentaram $AVAL < 0,45$

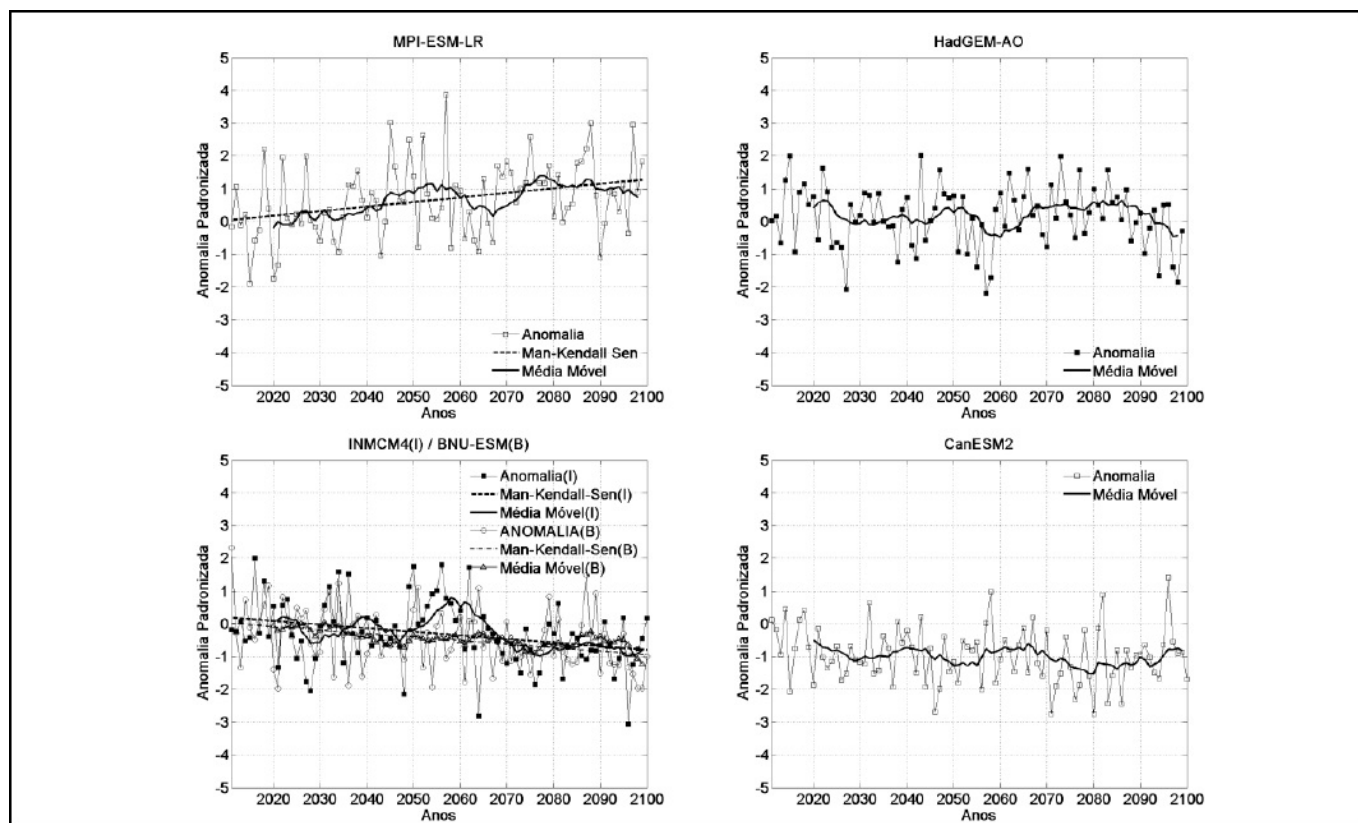


Figura 8 – Séries anuais de precipitação dos modelos BNU-ESM, INMCM4, HadGEM2-AO, MPI-ESM-LR e CanESM2 para o cenário RCP 4.5 para a bacia do rio São Francisco no período de 2011 a 2100

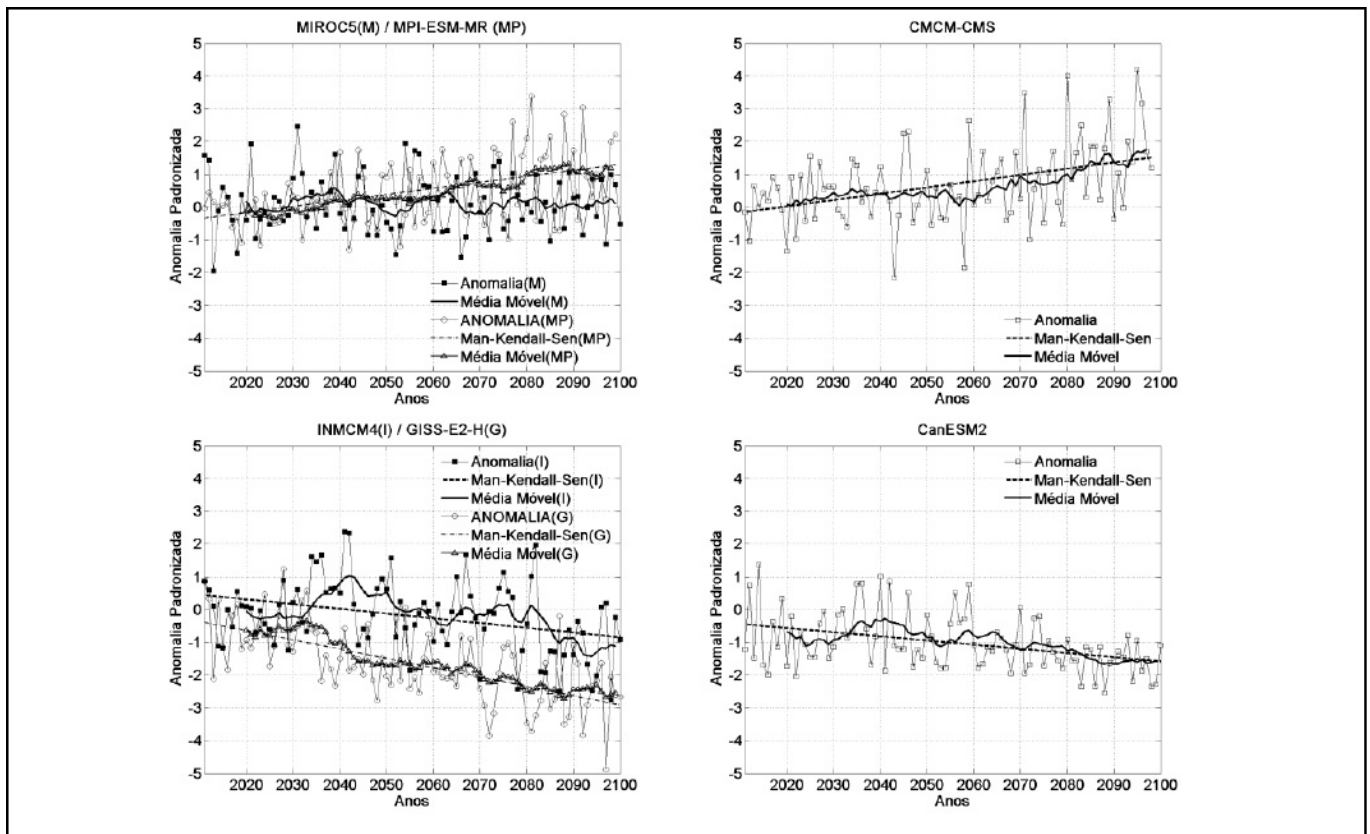


Figura 9 – Séries anuais de precipitação dos modelos MIROC5, inmcm4, CMCC-CMS, MPI-ESM-MR, GISS-E2-H e CanESM2 para o cenário RCP 8.5 para a bacia do rio São Francisco no período de 2011 a 2100

tendência significativa para o cenário RCP 4.5. Entretanto, a maioria dos modelos do quadrante quente e seco indicam tendência negativa para precipitação. Quanto ao cenário RCP 8.5, há uma dispersão muito grande entre as tendências indicadas pelos modelos, sugerindo um maior nível de incerteza associado à esse cenário para a bacia estudada.

As Figuras 8 e 9 mostram as séries anuais de precipitação dos modelos selecionados nos quadrantes da Figura 4. Tanto para o cenário RCP 4.5 quanto para RCP 8.5, os modelos indicam um aumento de anos extremos de precipitação, principalmente nos últimos anos do século XXI.

4. CONCLUSÕES

Todos os modelos apresentaram tendência positiva para a temperatura no período de 2011 a 2100 e divergem quanto o futuro das precipitações. Apesar dessa divergência, o conjunto de modelos projetam anomalias entre -20% e 20% em cada período de 30 anos para essa variável.

A avaliação proposta indicou que os modelos HadGEM-ES, IPSL-CM5A-MR, IPSL-CM5A-MR, IPSL-CM5A-LR, GFDL-ESM2M, GFDL-CM3 e IPSL-CM5B-LR não representaram bem a sazonalidade da precipitação na bacia do rio São Francisco em comparação aos demais modelos.

Os modelos do CMIP5 indicam que a temperatura na bacia do rio São Francisco deve aumentar. Esta anomalia é substancialmente maior se considerado o cenário RCP 8.5:

enquanto a maioria dos modelos indica anomalia positiva de 2°C ou mais nos últimos trinta anos do século XXI para o cenário RCP4.5, no cenário RCP 8.5, os modelos indicam anomalias superiores a 4,0°C.

O cenário RCP 8.5, além de apresentar tendência positiva superior ao cenário RCP 4.5 para temperatura, indica uma maior incerteza associada aos campos de precipitação. Isto é evidenciado pelo teste de Man-Kendall Sen, que mostra que a maioria dos modelos para cenário RCP 4.5 não indicam tendência significativa para precipitação no século XXI, enquanto para o cenário RCP 8.5 a maioria mostra tendência significativa com grande dispersão na magnitude da mesma.

Os cenários RCP 8.5 e RCP 4.5 mostram-se semelhantes no período de 2011 a 2040, as divergências entre estes passa a ser mais significativa nos períodos de 2041 a 2070 e 2071 a 2100. No último período de 30 anos, a mediana das anomalias de temperatura entre os modelos tem diferença de quase 2°C.

Nota-se uma maior amplitude de oscilações das séries no período de 2071 a 2100, indicando uma maior ocorrência de eventos extremos do que no século XX.

As divergências dos modelos do CMIP5 analisados quanto às projeções demonstram o alto nível de incerteza existente nessas projeções. Entretanto, estas informações definem uma margem dos possíveis cenários futuros de precipitação e temperatura da bacia do rio São Francisco, podendo ser usadas para adoção de políticas e gestão.

Obviamente, projeções com menos incertezas seriam mais interessantes para os tomadores de decisão, no entanto isto

não ocorre nas projeções dos modelos do CMIP5. Artificializar a redução destas incertezas pode induzir estratégias que levem àquilo que, em gerenciamento de risco, se conhece como grandes arrependimentos. Estratégias robustas precisam considerar as incertezas no nível atual de conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) e Universidade Federal do Ceará (UFC), por disponibilizarem a estrutura necessária para o desenvolvimento deste trabalho e à Agência Nacional de Águas (ANA) por torna-lo possível, através do projeto de cooperação técnica “Adaptação do Planejamento e da Operação dos Recursos Hídricos à Variabilidade e Mudanças Climáticas na Bacia Estendida do São Francisco”.

REFERÊNCIAS

ARNELL, N. W. Climate change and global water resources: SRES emission and socioeconomic scenarios. *Global Environmental*, v. 14, p. 31-52, 2004.

ARNELL, N. W.; REYNARD, N. S. The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain. *Journal of Hydrology*, v. 183, p. 397-424, 1996.

BANCO MUNDIAL. *Relatório sobre o desenvolvimento mundial de 2010: desenvolvimento e mudança climática*. São Paulo, 2010.

BURN, D. H., ELNUR, M. A. H., Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of Hydrology*. n.255, p.107-122, 2002.

HIRSCH, R. M. SLACK, J. R., SMITH, R. A., Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research* n.18, p.107-121, 1982.

IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. United Kingdom and New York, p.1535, 2013.

IPCC. *Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2007: The physical science basis*. Cambridge, p.18, 2007a.

IPCC. *Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge, p.23, 2007b.

MARENGO, J. A.; SOARES, W. R - CPTEC-INPE.. *Impacto das mudanças climáticas no Brasil e Possíveis Cenários Climáticos: Síntese do Terceiro Relatório do IPCC de 2001*. São Paulo, 29p, 2005.

MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. *Revista Multiciência*,

Campinas – São Paulo, n. 8, Maio, 2007.

MILLY, P. C. D., K. A. DUNNE e A. V. VECCHIA (2005). Global pattern of trends in streamflow e water availability in a changing climate. *Nature*, v.438, n.17, Novembro, 2005

NOBRE, C. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança no clima. In: *Brasil, Presidência da República. Núcleo de Assuntos Estratégicos. Mudança do clima: Negociações Internacionais sobre a Mudança do Clima*. Brasília, p. 147-216. 2005.

NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. *Journal of Climate*, v. 4, p. 957-988, 1991.

NÓBREGA, M.T., COLLISCHONN, W., TUCCI, C.E.M., PAZ, A.R. Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 15, p. 585–595, 2011.

TOMASELLA, J., RODRIGUEZ, D. A., CUARTAS, L. A., FERREIRA, M., FERREIRA, J. C., FERREIRA, J.C., MARENGO, J. Estudo de impacto das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos superficiais e sobre os níveis dos aquíferos na Bacia do Rio Tocantins. *CCST/INPE*, Cachoeira Paulista, 2009.

PEREIRA, D. S. P. ; FORMIGA-JOHNSSON, R. M. . Descentralização da gestão de recursos hídricos em bacias nacionais no Brasil. *Revista de Gestão de Águas da América Latina*, Santiago, v. 2, n. 1, p. 53-72, 2005.

PBMC. *Sumário Executivo do Volume 1 - Base Científica das Mudanças Climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 para o 1o Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas*. Brasil, Volume Especial para a Rio+20, 34p, 2012.

SALATI, T., SCHINDLER, W., VICTORIA, D.C., SALATI, E., SOUZA, J.C.S., NOVA, N.A.V. Economia das Mudanças Climáticas no Brasil. Estimativas da Oferta de Recursos Hídricos no Brasil em Cenários Futuros de Clima. *Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável*, p80, 2008.

SANTOS, G.B. et al. Marcação e recaptura da curimatápioa (*Prochilodus costatus*) em um afluente do rio São Francisco e avaliação da necessidade de transposição de peixes na UHE Gafanhoto. In *J.M. Lopes e F.O.Silva(Org.). Transposição de peixes*. Belo Horizonte, p.35-58,2012.

SILVEIRA, C. S., SOUZA FILHO, F. A. , LOPES, J. E. G., BARBOSA, P. S. F., TIEZZI, R. O. Análise das projeções de vazões nas bacias do setor elétrico brasileiro usando dados do IPCC-AR4 para o século XXI. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 4, p. 59-71, 2014.

SILVEIRA, C. S., SOUZA FILHO, F. A. , COSTA, A. A., CABRAL, S. L. Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação

no século XX sobre a região Nordeste do Brasil, Amazônia e Bacia do Prata e análise das projeções para o cenário RCP 8.5. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 28, n. 3, p.317-330, 2013a.

SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; CABRAL, S.L. Análise das Projeções de Precipitação do IPCC-AR4 para os Cenários A1B, A2 e B1 para o Século XXI para Nordeste Setentrional do Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.18, n.2, p117-134. 2013b.

SILVEIRA, C. S., SOUZA FILHO, F. A., LÁZARO, Y.M.C., COSTA, A. A., Sales, D. C.. Sazonalidade da precipitação sobre o Nordeste Setentrional brasileiro nas simulações do IPCC-AR4. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, n. 3, p.125-134, 2012.

WILKS, D.S *Statistical Methods in the Atmospheric Science*. San Diego: Academic Press, 467 p, 1995.

Contribuição dos autores

Cleiton da Silva Silveira - Estruturação do artigo, revisão da literatura e implementação da metodologia de avaliação dos modelos;

Francisco de Assis de Souza Filho - Definição das estratégias de análise de tendência e anomalia do século XXI, revisão da literatura e revisor técnico do artigo;

Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins - Definição da análise de cluster, revisão da literatura e revisor técnico do artigo;

Juliana Lima Oliveira - Recorte das variáveis para bacia do São Francisco, cálculo da precipitação média na bacia utilizando o Thiessen para bacia, análise qualitativa dos padrões da climatologia dos modelos globais no período histórico e revisão ortográfica;

Alexandre Cunha Costa - Confecção e análise das imagens georeferenciadas para a bacia do São Francisco;

Marcio Tavares Nobrega - Descrição da região de estudo e problematização do artigo e participação na estratégia técnica em cada seção do artigo;

Saulo Aires de Souza - Descrição da região de estudo e problematização do artigo e participação na estratégia técnica em cada seção do artigo;

Robson Franklin Vieira Silva - Download dos dados dos modelos globais, montagem do banco de dados e análise da consistência das séries de dados observadas e modeladas.