

Artigo

Projeções de Vazão Afluente à Lagoa Mangueira com Base em Cenários de Mudanças Climáticas

Bruno Espinosa Tejadas¹, Juan Martin Bravo¹, Daniela Guzzon Sanagiotto¹, Rutinéia Tassi²,
David Manuel Lelinho da Motta Marques¹

¹*Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
Porto Alegre, RS, Brasil.*

²*Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal de Santa Maria,
Santa Maria, RS, Brasil.*

Recebido 27/11/2015 – Aceito 5/4/2016

Resumo

Neste trabalho é apresentada a avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre a vazão de contribuição à lagoa Mangueira, localizada no sul do Brasil, com base em projeções de precipitação de vinte Modelos Climáticos Globais (MCGs) que alimentam o modelo hidrológico IPH II. As projeções foram baseadas em dois cenários de mudanças climáticas definidos pelo IPCC que estabelecem as forçantes para que os MCGs estimem o clima futuro: A2, caracterizado pelas altas emissões e B2, caracterizado pelas baixas emissões. O MAGICC/ScenGen foi utilizado para obter as projeções de anomalias mensais de precipitação nos cenários A2/B2 em períodos futuros centrados em 2030 e 2070. As séries temporais de precipitação projetadas foram estimadas usando o método delta change. Os resultados em termos de vazão média anual mostraram que o valor médio das anomalias no horizonte próximo é parecido em ambos cenários, sendo igual a +2,86%(A2) e +2,48%(B2). Este valor aumentou no horizonte longo, com valor médio das anomalias de +16,94%(A2) e +11,83%(B2). A dispersão entre os resultados dos MCGs mostrou anomalias que podem atingir [+10%,-7%] no horizonte próximo e [+30%,-20%] no horizonte longo. Assim, embora existisse uma maior concordância nos MCGs ao aumento das vazões, é importante ressaltar a dispersão dos resultados.

Palavras-chave: mudanças climáticas, projeções de vazão, lagoa Mangueira.

Streamflow Projections at the Mangueira Lake Based on Climate Change Scenarios

Abstract

This manuscript presents the assessment of climate change impacts on the streamflow at the Mangueira lake watershed, located in Southern Brazil, based on precipitation predictions of twenty Atmospheric/Ocean General Circulation Models (AOGCMs) that feed a hydrologic model named IPH II. The projections were based on two emission scenarios of the IPCC that set the forcing conditions for the AOGCMs to estimate future climate: A2, characterized by higher emissions and B2, characterized by lower emissions. The MAGICC/ScenGen was used to obtain the projected monthly anomalies of precipitation for the scenarios A2/B2 at two future time intervals centered at 2030 and 2070. Time series of projected precipitation were estimated using the delta change approach. The results in terms of average annual flow shows that mean value of the anomalies on the near horizon resulted very similar, equal to +2.86%(A2) and +2.48%(B2). This statistic increased on the long horizon, with a mean value of the anomalies of +16.94%(A2) and +11.83%(B2). The dispersion among results of the AOGCMs showed anomalies that may reach [+10%,-7%] in the near future and [+30%,-20%], in the long horizon. Thus, although there was higher agreement between AOGCMs in increasing flows, it is important to highlight the dispersion of results.

Keywords: climate change, streamflow projections, Mangueira lake.

1. Introdução

O sistema hidrológico do Taim, localizado no sul do Brasil, tem como característica marcante a existência da associação de áreas úmidas e lagos, ecossistemas característicos e associados à produção agrícola do Estado do Rio Grande do Sul. A conservação e o uso dos recursos hídricos nesta região dependem de como os níveis d'água variam ao longo do tempo, tanto em função da variabilidade natural das variáveis hidrológicas como do uso da água para atender demandas de irrigação. A mudança climática é um elemento adicional para o qual é necessário entender seu efeito sobre estas importantes variáveis.

As projeções de variáveis globais (temperatura, gases do efeito estufa, etc.) sugerem a possibilidade da ocorrência de significativas alterações no clima e na biosfera terrestre (IPCC, 2013). Existem diversas evidências que mostram que, tanto espécies como ecossistemas, têm sofrido impactos das mudanças climáticas. As respostas biológicas vão desde mudanças na distribuição espacial e temporal das espécies individuais, até mudanças completas do regime do ecossistema (Mooij *et al.*, 2009).

As mudanças climáticas podem afetar a distribuição espacial e temporal das variáveis hidrológicas (*e.g.* precipitação, vazão, etc.), assim como a intensidade e frequência de eventos extremos (IPCC, 2007; Adam *et al.*, 2015). No caso do Sistema Hidrológico do Taim, e em particular a lagoa Mangureira, a contribuição da bacia hidrográfica representa em torno de 25%-30% do volume afluente médio anual. Eventos nesta bacia hidrográfica que alterem os totais precipitados, e em consequência, a geração do escoamento em termos de quantidade e distribuição temporal, e qualidade da água, podem promover alterações no nível d'água, hidrodinâmica e estrutura trófica da lagoa Mangureira.

A metodologia tipicamente utilizada na análise do impacto de mudanças climáticas na geração de escoamento em bacias hidrográficas é baseada no uso de projeções de variáveis do clima geradas por modelos climáticos globais (MCGs) como dados de entrada a modelos hidrológicos previamente ajustados para a região em estudo (*e.g.* Tucci e Damiani, 1994; Adam e Collischonn, 2013; Paiva *et al.*, 2011; Arroio e Mauad, 2015; Bravo *et al.*, 2014; Collischonn *et al.*, 2014; Nóbrega *et al.*, 2011).

Existem diferentes fatores que influenciam o processo de transformação da chuva em vazão, que é um processo não linear, provocando que a resposta da bacia hidrográfica, sob o efeito das alterações projetadas do clima, apenas consiga ser estimada a partir da modelagem hidrológica. Nesse sentido, modelos hidrológicos conceituais que levam em conta na sua formulação os processos físicos são considerados os mais adequados (Escarião *et al.*, 2012).

Este trabalho apresenta a estimativa das projeções de vazão afluente à lagoa Mangureira baseada em projeções de mudanças climáticas. As projeções de precipitação, geradas por um conjunto de MCGs e baseadas em dois cenários

de emissão de gases que provocam o efeito estufa (IPCC, 2000), foram utilizadas como dados de entrada a um modelo hidrológico conceitual da bacia de contribuição à lagoa Mangureira. Apesar de existirem diferentes fontes de incertezas na estimativa de projeções de vazão, *i.e.* concentrações de gases que provocam o efeito estufa, estrutura dos MCGs, estrutura do modelo hidrológico, parâmetros dos modelos, etc. tem sido observado que os MCGs representam a maior fonte de incerteza (Nóbrega *et al.*, 2011). Nesse sentido, este trabalho utilizou as projeções de 20 MCGs como dado de entrada ao modelo hidrológico na estimativa das projeções de vazões.

2. Estudo de Caso: Bacia de Contribuição à Lagoa Mangureira

O Sistema Hidrológico do Taim (SHT) está localizado entre o oceano Atlântico e a lagoa Mirim, ao sul do Estado do Rio Grande do Sul, incluindo parte dos Municípios de Santa Vitória do Palmar e de Rio Grande (Fig. 1). Na área do sistema encontra-se a Estação Ecológica do Taim (ESEC-Taim), situada na estreita faixa de terra entre o oceano Atlântico e a lagoa Mirim. Associada com o clima subtropical, esta região se distingue de outras áreas alagáveis existentes no Brasil. O SHT se reparte em três diferentes subsistemas (Marques *et al.*, 2013): (1) Subsistema Norte, composto pela lagoa Caiubá, lagoa das Flores e o banhado do Maçarico; (2) Subsistema do banhado, que inclui o banhado do Taim e as lagoas Nicola e Jacaré; (3) Subsistema Sul, formado pela lagoa Mangureira e sua bacia de contribuição.

A lagoa Mangureira é um grande lago raso com área superficial de aproximadamente 820 km², e uma profundidade média de 2,49 m e máxima de 6,5 m. O formato da lagoa é alongado na direção Norte-Sul, com um comprimento de 90 km e largura de 10 km, aproximadamente. A bacia de contribuição à lagoa Mangureira possui uma área de 417 km² e é composta por 16 sub-bacias cujos exutórios coincidem com as margens da lagoa (Fig. 1).

A região onde se insere o sistema hidrológico do Taim apresenta clima tipo Cfa, segundo a classificação de Köppen, ou seja, clima temperado com forte influência oceânica e com invernos relativamente frios, verões tépidos e precipitações regularmente distribuídas durante o ano. A temperatura média anual da região é de 17,8 °C. O mês mais quente é janeiro, com temperatura média de 22,8 °C, e o mês mais frio é julho, com temperatura média de 12,8 °C. A precipitação média anual nesta região é de aproximadamente 1200 mm, sendo abril o mês com menor total precipitado (75 mm em média, no período 1960-1990) e julho o mês com maior total precipitado (116 mm em média, no mesmo período).

A série temporal de precipitação no período atual utilizada na modelagem hidrológica foi obtida a partir da interpolação dos dados obtidos de três postos pluviométricos.

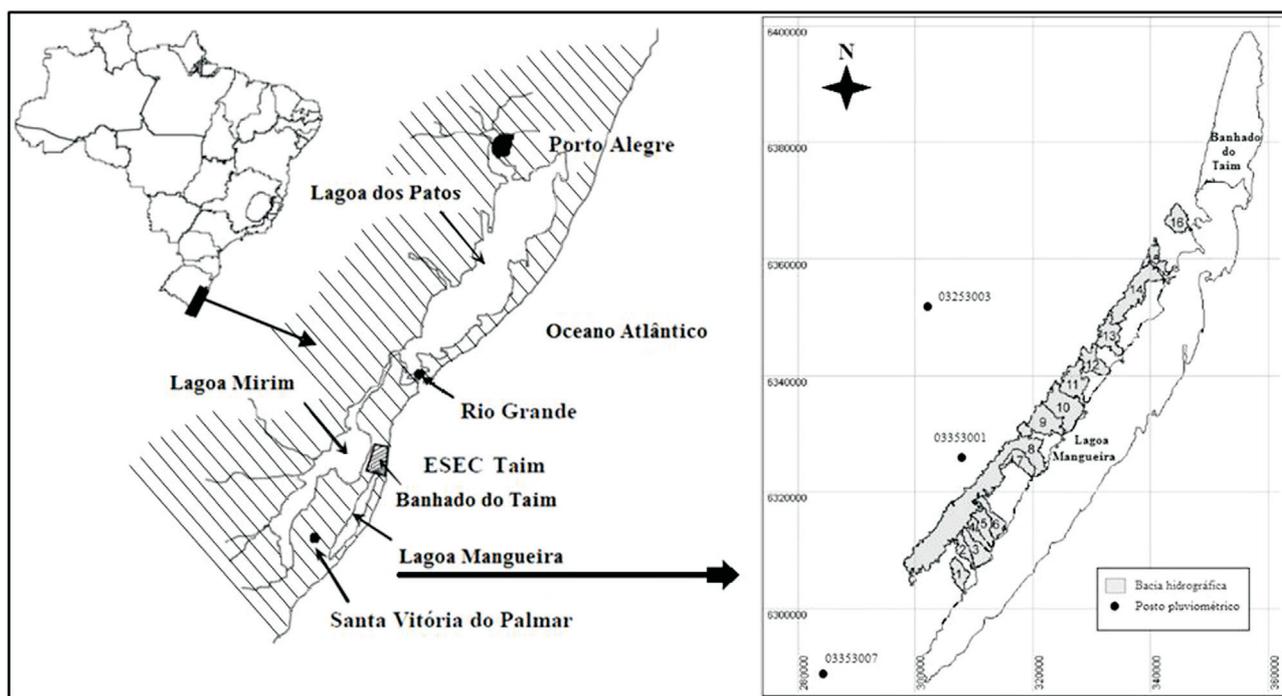


Figura 1 - Localização do Sistema Hidrológico do Taim e da lagoa Mangueira.

tricos localizados próximo da bacia de contribuição a lagoa Mangueira (Fig. 1). Estes dados foram obtidos do site Hidroweb da ANA e correspondem aos postos pluviométricos: Santa Vitória do Palmar (código 03353007); Granja Osório (código 03253003) e Arrozeira Chasqueiro (código 03353001).

3. Metodologia

O procedimento metodológico utilizado para estimar as projeções de vazão afluente à lagoa Mangueira em cenários de mudança climática é dividido em três etapas, descritas a seguir.

3.1. Cenários de emissão e estimativa de anomalias de precipitação

Quatro famílias de cenários de emissão de gases que provocam o efeito estufa foram utilizadas pelo *Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas* no Quarto Relatório de Avaliação das mudanças climáticas (AR4 - IPCC, 2007). As projeções do clima utilizadas neste trabalho são baseadas nos produtos gerados pelo AR4 considerando dois cenários: (1) Cenário A2, o qual apresenta altas emissões e (2) Cenário B2, o qual representa baixas emissões. Estes cenários de emissão fornecem as forçantes utilizadas pelos modelos climáticos globais para estimar as projeções futuras do clima.

Conforme discutido em outros trabalhos (*e.g.* Serrat-Capdevila *et al.*, 2007), no conjunto de MCGs utilizados para produzir as projeções das variáveis no futuro, alguns modelos podem ser considerados mais ou menos adequa-

dos para a região de estudo, pois as deficiências próprias ou as simplificações existentes nas suas formulações podem não considerar adequadamente todos os fenômenos meteorológicos locais. Além disso, o modelo mais adequado a ser selecionado pode variar segundo qual seja a variável analisada na comparação, por exemplo, precipitação média anual, anomalias de precipitação anual, temperaturas médias mensais, etc. Nesse sentido, Hagedorn *et al.* (2005) e Reichler e Kim (2008) têm mostrado que as previsões de longo prazo obtidas por um conjunto de modelos, como aquelas tipicamente estimadas no contexto de mudança climática, apresentam melhores resultados que aquelas obtidas considerando apenas os modelos que melhor representam a climatologia do local. Por este motivo, nesse trabalho foram utilizados 20 MCGs, com o objetivo de caracterizar a incerteza nos resultados.

As estimativas das projeções de anomalia de precipitação na região analisada foram feitas utilizando o modelo MAGICC/ScenGen, (*Model for the Assessment of Greenhouse gas Induced Climate Change/SCENario GENerator*) versão 5.3 (Hulme *et al.*, 1995; Wigley, 2008), que considera as principais diretrizes estabelecidas pelo AR4. Este modelo disponibiliza as projeções de anomalias de precipitação mensal estimadas pelos 20 MCGs apresentados na Tabela 1 nos diferentes cenários de mudanças climáticas. Para cada cenário de mudanças climáticas, projeções de anomalias para cada mês do ano foram estimadas em dois períodos de 30 anos, centrados no ano 2030 (horizonte próximo) e 2070 (horizonte longo). Assim, um total de 960 simulações foram feitas com o modelo

Tabela 1 - Modelos climáticos globais utilizados no MAGICC/ScenGen versão 5.3.

Nome ScenGen	País	Nome	Instituição
BCCRBCM2	Noruega	Bergen Climate Model, version 2	Bjerknes Centre for Climate Research (BCCR), Univ. of Bergen
CCSM-30	EU	Community Climate System Model, version 3.0	National Center for Atmospheric Research (NCAR)
CCCMA-31	Canadá	Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis's	
CNRM-CM3	França	CNRM-CM3	Centre National de Recherches Météorologiques, Météo France
CSIRO-30	Austrália	CSIRO Mark 3.0	CSIRO
MPIECH-5	Alemanha	ECHAM5/MPI-OM	Max Planck Institute for Meteorology
ECHO-G	Alemanha/Coreia	ECHO-G = ECHAM4 + HOPE-G	Meteorological Institute of the University of Bonn, Institute of KMA and Model and Data Group
FGOALS1G	China	FGOALS1.0	Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences
GFDLCM20	EU	CM2.0 - AOGCM	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - NOAA
GFDLCM21	EU	CM2.0 - AOGCM	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory - NOAA
GIS-EH	EU	GISS ModelE-H	Goddard Institute for Space Studies (GISS), NASA
GIS-ER	EU	GISS ModelE-R	Goddard Institute for Space Studies (GISS), NASA
INMCM-30	Rússia	INMCM3.0	Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Science
IPSL_CM4	França	IPSL-CM4	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)
MIROC-HI	Japão	MIROC3.2 (Model for Interdisciplinary Research on Climate)	CCSR/NIES/FRCGC
MIROCMED	Japão	MIROC3.2 (Model for Interdisciplinary Research on Climate)	CCSR/NIES/FRCGC
MRI-232 ^a	Japão	MRI-CGCM2.3.2	Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency
NCARPCM1	EU	Parallel Climate Model	National Center for Atmospheric Research NCAR
UKHADCM3	Inglaterra	HADCM3	Hadley Centre for Climate Prediction and Research
UKHADGEM	Inglaterra	Hadley Centre Global Environmental Model, version 1	Hadley Centre for Climate Prediction and Research

MAGICC/ScenGen (20 MCGs x 12 meses x 2 cenários x 2 horizontes).

3.2. Estimativa das projeções de precipitação

Na estimativa das projeções de precipitação foi utilizado o método *delta change* (Gellens e Roulin, 1998). Nesse sentido, as projeções de anomalias de cada MCGs foram utilizadas para perturbar os dados observados de precipitação diária no período de 01/01/1960 a 31/12/1990, e dessa forma obter as projeções de precipitação, utilizando o procedimento descrito a seguir.

Para estimar as projeções de precipitação ($P_{proj}(dia\ d, mês\ m, ano\ ap, MCG\ j)$) em cada período futuro e em cada cenário de emissão, foi repetido o mesmo processo em cada intervalo de tempo (diário), no período 01/01/1960 a 31/12/1990, onde foi aplicada a Eq. (1).

$$P_{proj}(d, m, ap, j) = Pobs(d, m, ao) \times \left[1 + \frac{\Delta P_{proj}(m, j)}{100} \right] \quad (1)$$

onde $Pobs(d, m, ao)$ é a precipitação diária observada (em mm) na data correspondente (d, m, ao); ΔP_{proj} é a projeção de anomalia de precipitação no mês m estimada pelo $MCG\ j$ (em %).

Através desse procedimento, com base nas projeções de anomalias de precipitação de cada MCG, foram geradas quatro séries temporais de projeções de precipitação, cada uma delas com 11.323 intervalos de tempo. Duas dessas séries correspondem à precipitação no horizonte próximo (período de 01/01/2015 a 31/12/2045), cenários A2 e B2; e duas séries correspondem à precipitação no horizonte longo (período 01/01/2055 a 31/12/2085), cenários A2 e B2. Considerando os 20 MCGs, 80 projeções de precipitação foram geradas.

3.3. Modelagem hidrológica e estimativa das projeções de vazão

O modelo hidrológico IPH II foi utilizado na modelagem da bacia de contribuição à lagoa Mangueira. O modelo IPH II é um modelo chuva-vazão conceitual, concentrado,

desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS) conforme Tucci *et al.* (1981a) e Tucci *et al.* (1981b), e composto por três algoritmos: (1) perdas por evaporação e interceptação; (2) separação do escoamento e (3) propagação dos escoamentos superficial e subterrâneo.

O algoritmo de perdas utiliza um único parâmetro (R_{max}), que reflete a capacidade de armazenamento máximo em um reservatório de perdas. O algoritmo de separação do escoamento utiliza os parâmetros I_0 , I_b e h , característicos da equação de infiltração de Horton e que dependem das características físicas/hidráulicas do solo. Os parâmetros I_0 e I_b representam as taxas de infiltração quando o solo se encontra em capacidade de campo e quando se encontra saturado, respectivamente, e h é igual a e^{-k} , sendo e a base dos logaritmos neperianos e k a constante de decaimento da curva de capacidade de infiltração.

A propagação do escoamento superficial é feita através do método de Clark, que utiliza os parâmetros tempo de concentração (tc) e o histograma tempo-área (nh). Esses dois parâmetros podem ser calibrados ou mantidos fixos, de acordo com a disponibilidade de informações de características físicas da bacia. Adicionalmente, para se levar em consideração o efeito do armazenamento na bacia, o modelo utiliza a teoria do reservatório linear simples, caracterizada pelo parâmetro K_s , que representa o tempo de retardo do escoamento superficial. Para a propagação do escoamento superficial é necessário definir também o percentual de área impermeável (A_{IMP}) na bacia hidrográfica.

A propagação do escoamento subterrâneo é realizada através do modelo do reservatório linear simples, caracterizado pelo parâmetro K_{subs} , e representa o tempo médio de esvaziamento do reservatório de escoamento subterrâneo. Além dos parâmetros acima citados, para a simulação devem ser informadas a área da bacia hidrográfica, a precipitação e a evapotranspiração potencial.

O modelo IPH II tem sido utilizado na modelagem hidrológica em um grande número de bacias hidrográficas do Brasil apresentando bons resultados. Exemplos de aplicação no contexto de mudanças climáticas também podem ser encontrados em diferentes trabalhos (*e.g.* Tucci e Damiani, 1994).

O modelo IPH II utilizado neste trabalho foi previamente ajustado à bacia de contribuição da lagoa Mangureira por Fragoso Jr. (2009), apresentando bons resultados. O ajuste do modelo foi feito com base em dados do período 2001-2007, sendo a bacia hidrográfica subdividida em 16 sub-bacias com exutórios nas margens da lagoa Mangureira. O modelo IPH II foi aplicado a cada uma delas. Como não existem dados de vazão observada nas sub-bacias, no ajuste do modelo por Fragoso Jr. (2009), os parâmetros associados à curva de infiltração foram definidos a partir de ensaios de infiltração executados no interior da bacia. Os parâmetros utilizados pelo método de Clark foram definidos a partir das características de cada sub-bacia e os restantes parâmetros estimados em função do desempenho de um modelo hidrodinâmico em ajustar os níveis da água observados na lagoa Mangureira, quando alimentado com as vazões afluentes definidas pelo modelo IPH II, precipitação direta sobre a lagoa e evaporação e considerando ainda as retiradas de água para irrigação. Considerando que o balanço de volume foi corretamente representado pelo modelo hidrodinâmico isto indicou que as entradas e saídas de água também foram bem representadas. A vazão de contribuição à lagoa Mangureira é estimada, para cada intervalo de tempo, como o somatório das vazões geradas pelas sub-bacias nesse intervalo de tempo.

A estimativa das vazões de contribuição à lagoa Mangureira, no período atual e nos horizontes futuros, foi feita conforme apresentado na Fig. 2. As vazões de contribuição à lagoa Mangureira na situação atual foram estimadas através de uma única rodada do modelo IPH II. Nessa rodada foram utilizados como dados de entrada: a série temporal

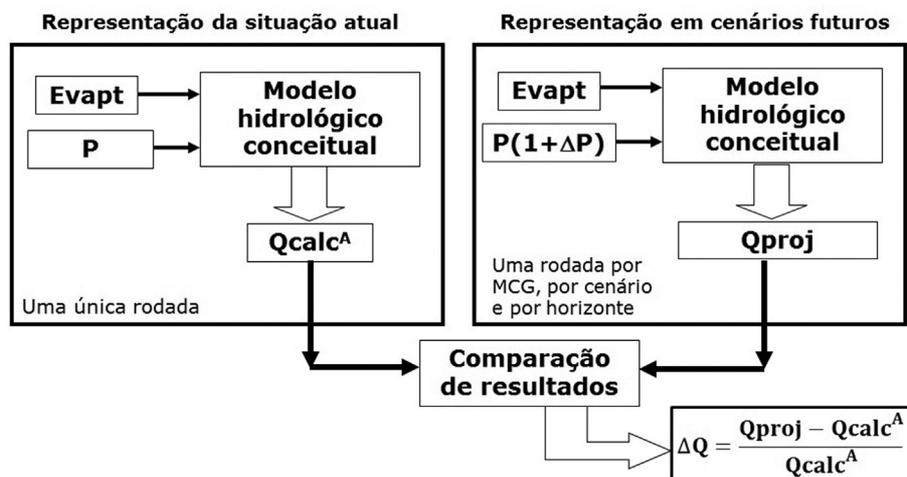


Figura 2 - Representação esquemática da metodologia utilizada.

diária de precipitação observada no período 01/01/1960 a 31/12/1990 e as normais climatológicas de evapotranspiração potencial. A série temporal diária de precipitação observada foi obtida a partir dos dados disponibilizados no sistema Hidroweb da ANA em três postos pluviométricos (Fig. 1): Santa Vitória do Palmar (03353007), Granja Osório (03253003) e Arrozeira Chasqueiro (03353003). As normais climatológicas de evapotranspiração potencial foram estimadas a partir dos dados climatológicos do posto Santa Vitória do Palmar. Posteriormente, as projeções de precipitação diária (definidas conforme apresentado no item 3.2) foram utilizadas como dados de entrada ao modelo IPH II, mantendo os restantes dados de entrada iguais à situação atual, gerando as projeções de vazão de contribuição à lagoa Mangueira. Como as projeções de cada MCG, em cada cenário e em cada horizonte foram utilizadas para gerar as projeções de vazão, o modelo IPH II foi executado 80 vezes (2 cenários x 2 horizontes x 20 MCGs).

Na comparação dos resultados (Fig. 2), séries temporais de vazões médias mensais foram estimadas com base nos resultados com intervalo diário. Para evitar a influência da condição inicial do modelo, o primeiro ano de cada série foi descartado, resultando em todos os casos (atual, horizonte próximo e horizonte longo) um período de 30 anos. No caso das projeções de vazão, três estatísticas foram estimadas a partir do conjunto de MCGs em termos absolutos e em termos de anomalia percentual: a mediana, como medida de tendência central e os percentis 10 e 90, como medidas de dispersão dos resultados. É importante ressaltar que as anomalias de vazão (ΔQ) foram estimadas pela comparação de vazões simuladas no período atual com base nos dados atuais de precipitação e de vazões simuladas no período futuro com base nas projeções de precipitação, estimadas pela perturbação da série de precipitação atual por anomalias definidas pelos MCGs.

4. Análise e discussão dos resultados

4.1. Projeções de anomalias de precipitação

Estatísticas das projeções de anomalias de precipitação média mensal na bacia de contribuição à lagoa Mangueira, para cada mês do ano, são apresentadas na Fig. 3 para os dois cenários (A2 e B2), e para os dois horizontes considerados (valor médio em um intervalo de trinta anos centrado em 2030, no horizonte próximo, e centrado em 2070, no horizonte longo). As estimativas destas anomalias foram obtidas em termos de percentagem em relação à precipitação média de cada mês.

Em termos gerais, os resultados mostram grandes anomalias projetadas, predominando as projeções de incremento de precipitação mensal, mas com uma grande dispersão entre os resultados dos vinte MCGs.

Observa-se no horizonte próximo (Figs. 3(a) e 3(b)) pouca diferença entre os resultados dos dois cenários simu-

lados, em termos das medianas e dos percentis das projeções do conjunto de MCGs. No caso do horizonte longo (Figs. 3(c) e 3(d)), as incertezas aumentam em ambos os cenários, mas com maior evidência no cenário A2 (Fig. 3(c)). As projeções no horizonte longo também apresentam uma maior discrepância entre os resultados dos dois cenários, quando comparados ao horizonte próximo.

Em todos os cenários e horizontes avaliados, a mediana das projeções do conjunto de MCGs resultou positiva, significando incrementos de precipitação, em seis meses do ano, enquanto que os meses restantes do ano apresentam anomalias negativas (diminuição da precipitação). Analisando cada mês do ano, os resultados dos MCGs foram mais contraditórios, pois alguns MCG indicam incrementos de precipitação, enquanto outros, redução da mesma. Em consequência, a incerteza associada aos resultados é grande, conforme observado nos valores do percentil 10 e do percentil 90, que representam valores de anomalias negativas e positivas em todos os cenários e horizontes avaliados. Nesse sentido, a incerteza nos resultados de anomalias de precipitação foi maior no horizonte longo, como era esperado, devido às maiores antecedências das previsões, à alta não linearidade do clima e à propagação da incerteza associada aos modelos (estrutura e parâmetros) e às condições iniciais.

Para o cenário A2 e considerando o horizonte próximo (Fig. 3(a)), as projeções de anomalias mensais de precipitação em termos de mediana dos valores dos 20 MCGs se apresentaram no intervalo -5,15% a 9,55%. Este intervalo é muito similar ao obtido no cenário B2 (Fig. 3(b)) que resultou igual a -5,45% a 9,30%. De fato, as projeções destes dois cenários não diferem muito entre si no horizonte próximo, mas as medianas das projeções do cenário B2, em valor absoluto, tendem a ser um pouco superiores às correspondentes do cenário A2, na maioria dos meses.

As projeções de anomalias para o horizonte longo possuem também uma maior dispersão entre os resultados dos MCGs. Por exemplo, no mês mais chuvoso (julho) e no cenário A2, a mediana das projeções de anomalias no horizonte próximo é -1,70% e os percentis 10 e 90 são iguais a -21,94% e 27,66% (Fig. 3(a)), respectivamente. Nesse mesmo cenário, mas no horizonte longo, a mediana das projeções de anomalias é -5,05% e os percentis 10 e 90 foram -63,73% e 80,52% (Fig. 3(c)), respectivamente. As projeções no horizonte longo apresentam também maiores diferenças entre os cenários que as observadas no horizonte próximo. No horizonte longo, a dispersão dos resultados no cenário A2 (Fig. 3(c)) é maior que no cenário B2 (Fig. 3(d)). Além disso, analisando o valor absoluto da mediana dos resultados, observa-se que o cenário A2 apresenta maiores valores em todos os meses quando comparado ao cenário B2.

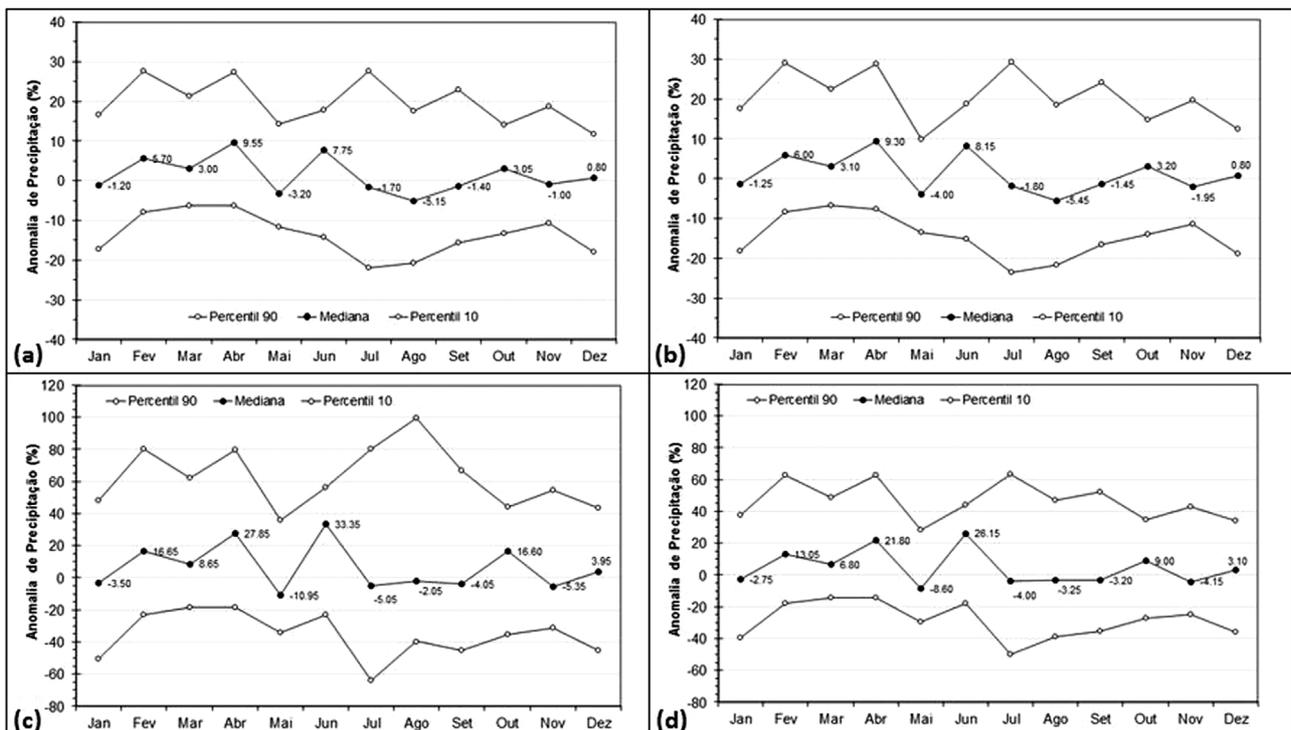


Figura 3 - Estatísticas das anomalias de precipitação mensal (%), para cada mês do ano na região em estudo, projetadas no cenário A2 (a-c) e B2 (b-d), para o horizonte próximo, centrado em 2030 (a-b) e o horizonte longo, centrado em 2070 (c-d): mediana, percentil 10 e percentil 90 do conjunto de MCG.

4.2. Projeções de vazão de contribuição à lagoa Mangueira

Uma vez estimadas as projeções de precipitação de cada MCGs, em cada cenário e em cada horizonte, estas informações foram utilizadas como dados de entrada no modelo hidrológico para estimar as projeções de vazão de contribuição à lagoa Mangueira.

Um exemplo dos resultados obtidos com cada MCG, no cenário A2 e horizonte próximo (período de 30 anos, centrado em 2030), é apresentado na Fig. 4. Em termos gerais, os resultados mostram grandes anomalias projetadas, predominando as projeções de incremento de vazão mensal, mas com uma grande dispersão entre os resultados dos 20 MCGs.

A análise dos resultados de cada MCG mostra, em todos os cenários e horizontes (*e.g.* Fig. 4 correspondente ao cenário A2 e o horizonte próximo), uma proporção aproximada de 12 MCGs apontando um sinal da anomalia, com os restantes 8 MCGs apresentando sinal contrário.

Uma comparação entre estatísticas da vazão atual e das projeções de vazão do conjunto de MCGs é apresentada nas Figs. 5 e 6, considerando ambos os cenários (A2 e B2) e ambos os horizontes futuros (próximo e longo).

Observando a Fig. 5, a mediana das projeções do conjunto de MCGs se encontra muito próxima da vazão atual em ambos os cenários e ambos os horizontes nos meses de Julho a Janeiro. Nos meses de Fevereiro a Junho se observam as maiores diferenças entre a mediana das

projeções do conjunto de MCGs e a vazão atual, sendo mais evidente no horizonte longo, em ambos os cenários (Figs. 5(c) e 5(d)).

As medidas de dispersão dos resultados dos MCGs, em termos de percentil 10% e percentil 90% das anomalias projetadas de vazão, apresentaram valores muito próximos em ambos os cenários no horizonte próximo (Fig. 6). O valor médio destes percentis foi de +25% e -18%, aproximadamente, no futuro próximo. Estas estatísticas apresentaram maiores valores no horizonte longo, com maiores incrementos em termos absolutos no cenário A2. Assim, o valor médio dos percentis 10% e percentil 90% foi igual a +79% e -42%, respectivamente, no cenário A2, enquanto que no cenário B2 foram obtidos os valores +60% e -34%, respectivamente.

Uma análise adicional dos resultados de cada MCG é apresentada na Fig. 7 em termos de anomalias de precipitação total anual (%) e de vazão média anual (%), considerando cada cenário e ambos os horizontes. Observa-se, em consequência destes resultados, que o efeito da precipitação nesta bacia hidrográfica foi amplificado nas vazões, com maiores anomalias de vazão, em valor absoluto, que anomalias de precipitação. Assim, por exemplo, uma anomalia de +10% na precipitação anual provocou uma anomalia de +15% na vazão média anual, aproximadamente, enquanto que uma anomalia de -10% na precipitação anual provocou uma anomalia de -15% na vazão média anual, aproximadamente.

Para resumir estes resultados na escala anual, os valores médios das projeções de anomalias do conjunto de MCGs foram estimados. Para ambos os cenários (A2 e B2),

no horizonte próximo, as projeções mostram que a vazão média anual aumenta em pequeno grau, 2,86% e 2,48%, associado a um aumento da precipitação anual de 2,00% e

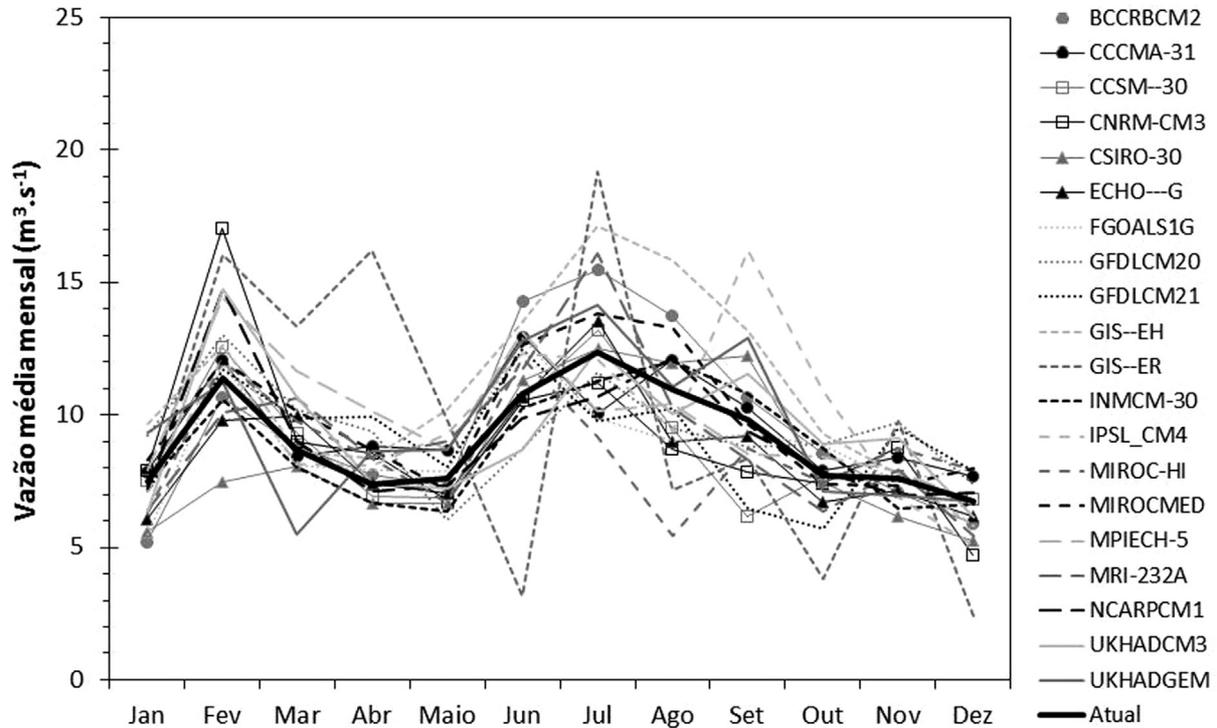


Figura 4 - Vazões médias mensais de contribuição à lagoa Mangueira em cada mês do ano, no cenário A2 e horizonte próximo (centrado em 2030) para o conjunto de MCG.

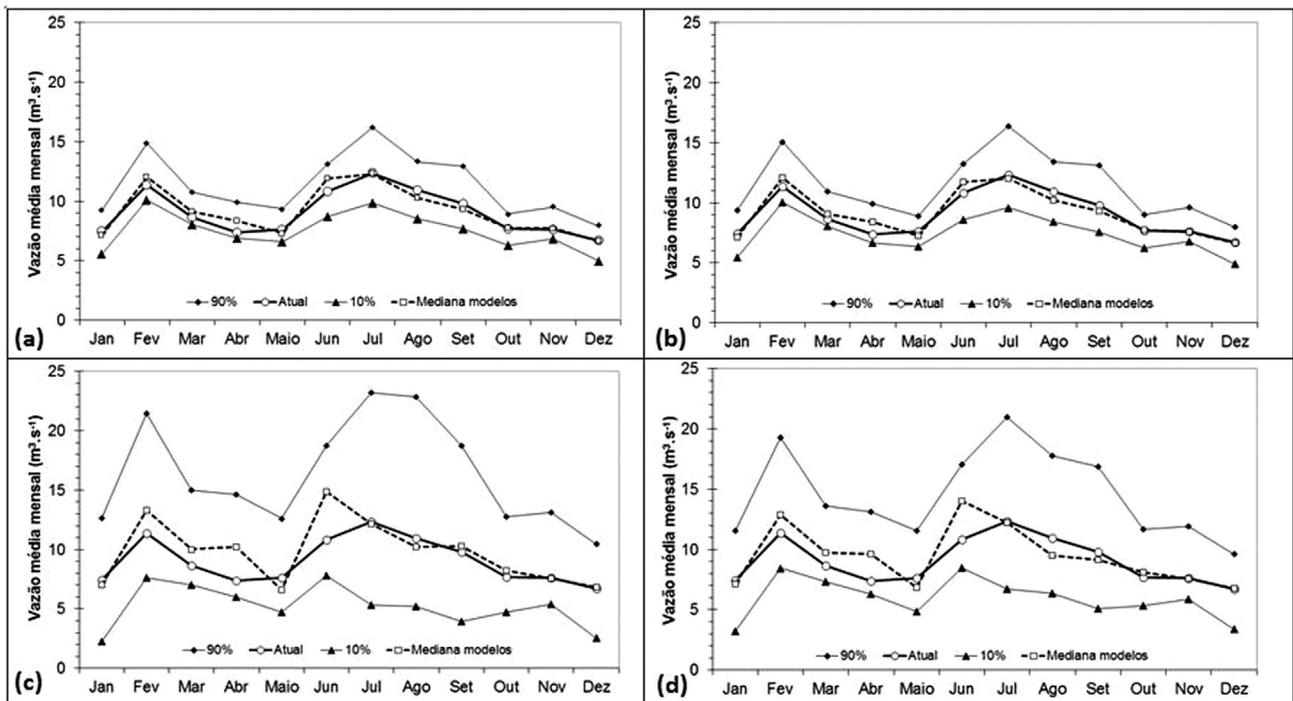


Figura 5 - Estatísticas da vazão média mensal atual e projetadas no cenário A2 (a-c) e B2 (b-d), para o horizonte próximo, centrado em 2030 (a-b) e o horizonte longo, centrado em 2070 (c-d): mediana, percentil 10 e percentil 90 do conjunto de MCG.

1,72%, respectivamente. O cenário A2 e B2 mostram maiores diferenças nos resultados anuais no horizonte longo,

mesmo que ambos projetam aumento das vazões médias anuais. O aumento da vazão média anual é maior no cenário

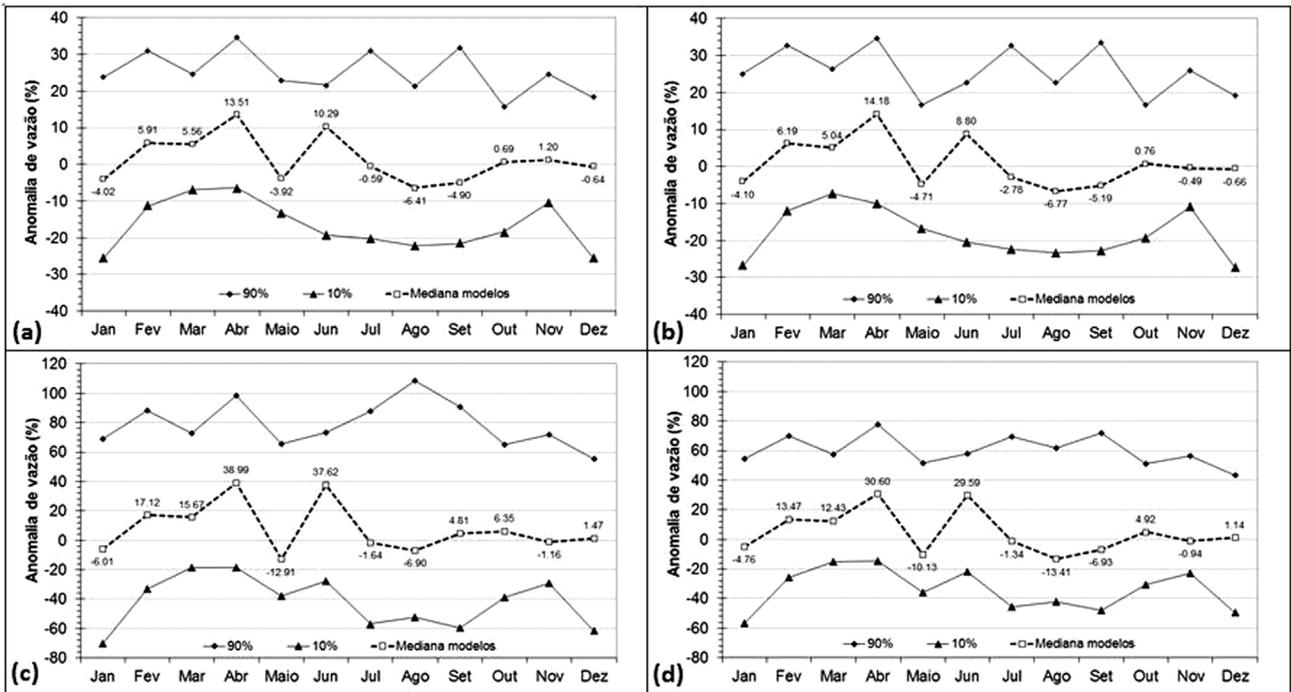


Figura 6 - Estatísticas das anomalias de vazão média mensal (%) de contribuição à lagoa Mangureira, projetadas no cenário A2 (a-c) e B2 (b-d), para o horizonte próximo, centrado em 2030 (a-b) e o horizonte longo, centrado em 2070 (c-d); mediana, percentil 10 e percentil 90 do conjunto de MCG.

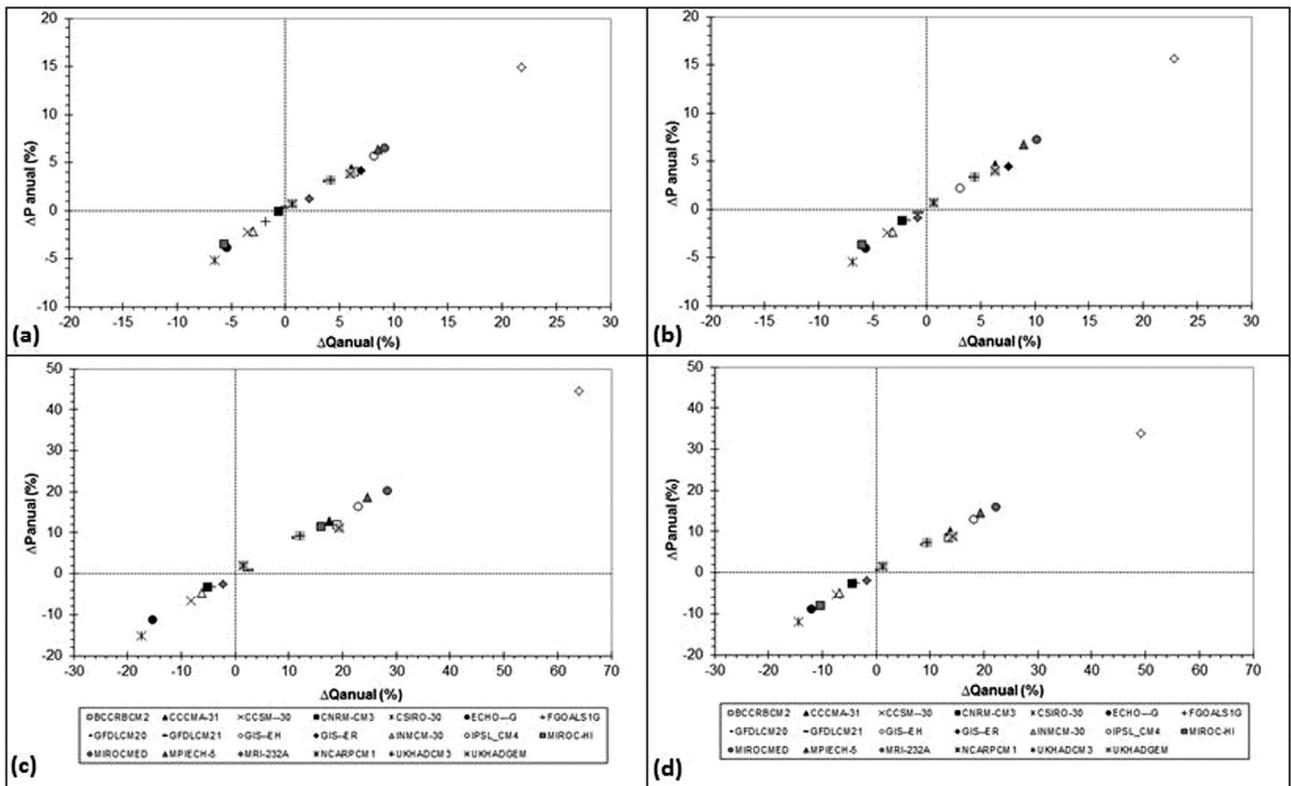


Figura 7 - Projeções de anomalias de precipitação total anual (%) vs Projeções de anomalias de vazão média anual (%), no cenário A2 (a-c) e B2 (b-d), para o horizonte próximo, centrado em 2030 (a-b) e o horizonte longo, centrado em 2070 (c-d).

A2 (16,94%), provocado por um maior aumento da precipitação anual (12%), quando comparado ao cenário B2, que apresenta um aumento da vazão de 11,83% e um aumento da precipitação anual de 8,41%.

5. Conclusões e Recomendações

Nesse trabalho são apresentados os resultados das simulações de cenários de mudança climática na estimativa das vazões que contribuem para a lagoa Mangueira, um grande lago raso localizado na região Sul do Brasil, considerando dois períodos futuros de 30 anos: o horizonte próximo, centrado no ano 2030, e o horizonte longo, centrado no ano 2070, e dois cenários de mudanças climáticas (cenários A2 e B2) do AR4.

Em termos de vazão média anual, o valor médio das anomalias no horizonte próximo resultou muito próximo em ambos os cenários, sendo igual a +2,86% e +2,48%, nos cenários A2 e B2, respectivamente. Este valor aumentou no horizonte longo, com valor médio das anomalias maior no cenário A2 (+16,94%) que no cenário B2 (+11,83%). A dispersão entre os resultados dos MCGs, em termos de anomalia da vazão média anual, mostrou anomalias que podem atingir +10% / -7% no horizonte próximo e +30%/-20%, no horizonte longo, aproximadamente.

Os resultados obtidos evidenciam que as projeções de vazão de contribuição à lagoa Mangueira são dependentes do MCG utilizado para estimar as projeções de precipitação. As anomalias de precipitação estimadas pelos MCGs nesse local possuem uma grande dispersão, com projeções de aumento ou diminuição nos períodos futuros considerados. Com base nestes dados de entrada, os resultados da modelagem hidrológica, através da qual foram estimadas as vazões, indicaram que, aproximadamente, 60% dos modelos concordaram no tipo de alteração das vazões médias mensais (acréscimo ou decréscimo).

Apesar de a metodologia utilizada apresentar limitações que restringem a análise a valores médios das vazões, sem poder analisar os valores extremos (vazões mínimas ou máximas), os resultados em termos de alterações da vazão média representam informações que subsidiam à tomada de decisão quanto ao gerenciamento destes recursos frente a cenários de mudanças climáticas.

Para dar continuidade a essa pesquisa, trabalhos futuros podem avaliar a concordância ou não das projeções de vazão estimadas neste trabalho e as obtidas com base nos novos produtos do AR5 (IPCC, 2013), e para os novos cenários de emissão denominados RCPs (caminhos representativos de concentrações). Ainda podem ser utilizados os produtos de modelos climáticos regionais na estimativa das projeções de precipitação para verificar o impacto da escala espacial na representatividade da precipitação no local.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece à UFRGS pela bolsa de iniciação científica concedida. Agradecemos ainda ao CNPq pelo apoio ao projeto de pesquisa no qual este trabalho se insere.

Referências

- ADAM, K.N.; ROGENES, P.; FAN, F.M.; COLLISCHONN, W.; BRAVO, J.M. Mudanças climáticas e vazões extremas na bacia do rio Paraná. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 999-1007. 2015.
- ADAM, K.N.; COLLISCHONN, W. Análise dos impactos de mudanças climáticas nos regimes de precipitação e vazão na bacia hidrográfica do rio Ibicuí. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 69-79. 2013.
- ARROIO Jr, P.P.; MAUAD, F.F. Simulação dos impactos das mudanças climáticas na vazão da bacia do Ribeirão do Feijão - SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 3, p. 741-751. 2015.
- BRAVO, J.M.; COLLISCHONN, W.; PAZ, A.R.; ALLASIA, D.; DOMECCO, F. Impact of projected climate change on hydrologic regime of the Upper Paraguay River basin. **Climatic Change**, v. 127, n. 1, p. 27-41, 2014.
- COLLISCHONN, W.; BRAVO, J.M.; SILVA, B.C.; RODRIGUES, D.A. Modelagem Hidrológica. In: LIMA, J.W.M.; COLLISCHONN, W.; MARENGO, J.A. (Org.). **Efeitos das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Elétrica**. 1º ed. São Paulo: Hunter, 2014, cap. 3, p. 95-143.
- ESCARIÃO, R.D.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; AZEVEDO, J.R.G.; NETO, A.R. Influência do modelo hidrológico na avaliação da sensibilidade dos recursos hídricos a cenários de mudanças climáticas em região semiárida. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 81-91. 2012.
- FRAGOSO Jr., C.R. **Modelagem tridimensional da estrutura trófica em ecossistemas aquáticos continentais rasos**. Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH-UFRGS, 2009. 199 p.
- GELLENS, D.; ROULIN, E. Streamflow response of Belgian catchments to IPCC climate change scenarios. **Journal of Hydrology**, v. 210, n. 1-4, p. 242-258. 1998.
- HAGEDORN, R.; DOBLAS-REYES, F.J.; PALMER, T.N. The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting - I. Basic concept. **Tellus**, v. 57, n. 3, p. 219-233. 2005.
- HULME, M., RAPER, S.C.B.; WIGLEY, T.M.L. An integrated framework to address climate change (ESCAPE) and further developments of the global and regional climate modules (MAGICC). **Energy Policy**, v. 23, n. 4-5, p. 347-355. 1995.
- IPCC. **Special Report on Emissions Scenarios**. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2000. 21p.
- IPCC. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, University Press, 2007. 996 p.
- IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment**

- Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge, University Press, 2013. 1535 p.
- MARQUES, D.M.L.M.; RODRIGUES, L.H.R.; FRAGOSO Jr, C.R.; CROSSETTI, L.O.; CARDOSO, L.S.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; THEY, N.G.H.; BEMVENUTI, M.A.; GARCIA, A.; VIEIRA, J.P.; CANTERLE, E.R.B.; CARDOSO, M.A.G.; BECKER, V.; PAULO, V.G.; BRAVO, J.M.; SOUZA, R.S.; RIBEIRO, C.V.; CALLEGARO, V.L.M.; SILVA, S.A.; WERNER, V.R.; ROSA, Z.M.; VILLANUEVA, A.; MORESCO, A.; CONDINI, M.V.L.; BURNS, M.D.; WURDIG, N.L. O sistema hidrológico do Taim. In: TABARELLI, M.; ROCHA, C.F.D.; ROMANOWSKI, H.P.; ROCHA, O.; LACERDA, L.D. (Org.). **PELD-CNPq: dez anos do Programa de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração do Brasil: achados, lições e perspectivas.** 1º ed. Recife: Editora Universitária UFPE, 2013, cap. 9, p. 197-221.
- MOOIJ, W.M.; DOMIS, L.N.S.; JANSE, J.H. Linking species- and ecosystem-level impacts of climate change in lakes with a complex and a minimal model. **Ecological modeling**, v. 220, n. 21, p. 3011-3020, 2009.
- 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. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 2, p. 585-595. 2011.
- PAIVA, R.C.D.; COLLISCHONN, W; SCHETTINI, E.B.C. Climate Change Impacts on Water Resources in the Quaraí River Basin. In: FUNG, C. F.; Lopez, A.; NEW, M. (Org.). **Modelling the Impact of Climate Change on Water Resources.** Willey-Blackwell, 2011, cap. 6.2, 12 p.
- REICHLER, T.; KIM, J. How Well do Coupled Models Simulate Today's Climate? **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 89, n. 3, p. 303-311. 2008.
- SERRAT-CAPDEVILA, A; VALDES, J.B.; PÉREZ, J.G.; BAIRD, K.; MATA, L.J.; MADDOCK, T. Modeling climate change impacts - and uncertainty - on the hydrology of a riparian system: The San Pedro Basin (Arizona/Sonora). **Journal of Hydrology**, v. 347, n. 1-2, p. 48-66. 2007.
- TUCCI, C.E.M.; DAMIANI, A. Potenciais Modificações Climáticas no Rio Uruguai. **Revista Brasileira de Engenharia**, Caderno de Recursos Hídricos, Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, p. 5-34. 1994.
- TUCCI, C.E.M.; SANCHEZ, J.E.O.; LOPES, M.O.S. Modelo IPH-II de simulação precipitação-vazão na bacia: alguns resultados. In: **IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS**, ABRH: Fortaleza. Anais 2, p. 83-103. 1981a.
- TUCCI, C.E.M.; SANCHEZ, J.E.O.; LOPES, M.O.S. Modelo matemático precipitação vazão IPH II. **Cadernos de Recursos Hídricos, Publicação 3**, Porto Alegre, IPH-UFRGS, 1981b. 64 p.
- WIGLEY, T.M.L. **MAGICC/SCENGEN 5.3: User Manual (version 2).** National Center for Atmospheric Research, Colorado, USA. 2008. 81 p.