

Mudanças climáticas e vazões extremas na Bacia do Rio Paraná

Climate Change and Extreme Streamflows in Paraná River Basin

Katiucia Nascimento Adam, Fernando Mainardi Fan, Paulo Rogenes Pontes,
Juan Martin Bravo e Walter Collischonn

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

katiuciapinto@yahoo.com.br, fernando.fan@bol.com.br, p.rogenes@gmail.com, jumabra@iph.ufrgs.br, collischonn@iph.ufrgs.br

Recebido: 23/11/14 - Revisado: 02/02/15 - Aceito: 12/06/15

RESUMO

A bacia do rio Paraná é um grande sistema fluvial da América Latina, com área, até confluência com o rio Iguaçu, de 800.000 km² ao longo de seis estados brasileiros (Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Mato Grosso do Sul, Paraná e Distrito Federal). Diferentes usos da água nesta região, como a geração de energia hidrelétrica (incluindo Itaipu), agricultura e abastecimento de água humano dependem do comportamento hidrológico e características climáticas da bacia. Portanto, para melhor gestão dos recursos hídricos, é importante o conhecimento dos processos hidrológicos, como o regime de vazões e suas possíveis respostas às mudanças climáticas. Este estudo apresenta o uso do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH para avaliar o impacto das mudanças climáticas sobre as vazões máximas e mínimas, em diferentes pontos de controle na bacia do rio Paraná. Projeções de variáveis climáticas, de quatro membros do modelo climático regional ETA-CPTEC, sob o cenário de emissões A1B, foram utilizadas para executar o modelo hidrológico. As vazões anuais simuladas (máximas e mínimas) foram analisadas ao longo de quatro intervalos de tempo de 30 anos (1961-1990, 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100). Os resultados mostram que os impactos sobre as vazões são altamente dependentes do membro do modelo utilizado para obter as projeções climáticas. Na maioria dos casos as vazões máximas projetadas estão dentro dos limites de incerteza em relação às séries atuais. No geral os resultados sugerem que a variabilidade natural do clima pode ser tão importante quanto a influência de mudanças climáticas.

Palavras Chave: Mudanças climáticas. Vazões extremas. Modelo climático regional. Modelo hidrológico.

ABSTRACT

The Parana River basin is a large river system in Latin America, with a drainage area of 800,000 km² until the confluence with the Iguaçu River, flowing through six Brazilian states (Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Mato Grosso do Sul, Paraná and the Federal District). Multiple water uses in this region are included hydroelectric power generation (including Itaipu), agriculture and human water supply, which depend on the hydrology and climate characteristics of the basin. To allow better water resources management, it is important to know hydrological processes, flow rates, and possible responses to climate changes. This study presents the use of the distributed hydrological model MGB-IPH to assess the impact of climate change on maximum and minimum flows at different control points in the Paraná River basin. Projections of climate variables, based on four members of the regional climate model ETA-CPTEC, under the A1B emissions scenario, were used to run the hydrological model. The simulated annual flow rates (maximum and minimum) were analyzed over four time intervals of 30 years (1961-1990, 2011-2040, 2041-2070 and 2071-2100). Results show that impacts on flow rates depend to a large extent on the member of the model used for climate projections. In most cases the projected peak flows are within the range of uncertainty regarding current series. Overall the results suggest that natural climate variability can be as important as the influence of climate change.

Keywords: Climate change. Extreme streamflows. Regional climate model. Hydrological model.

INTRODUÇÃO

Mudanças climáticas podem afetar a distribuição espacial e temporal das variáveis hidrológicas (e.g. chuva e vazão), assim como a intensidade e frequência de eventos extremos (e.g. Huntington, 2006; IPCC, 2007; Trenberth, 2011). Alterações no regime hidrológico de uma região como aumento ou redução da vazão dos rios, podem produzir danos aos ecossistemas, afetar a produção de alimentos, abastecimento de água, navegação e geração de energia (CHRISTENSEN; LETTENMAIER, 2007). Atualmente buscam-se relações que permitam entender os processos de mudanças climáticas a fim avaliar os impactos e mitigá-los.

No contexto de bacia hidrográfica a metodologia mais usual para a avaliação de tais mudanças considera a relação entre modelagem hidrológica e projeções de clima obtidas pela simulação de modelos climáticos globais (GCM's) e ou regionais (RCM's) (Mujumdar e Kumar, 2012). Neste caso tais projeções são usadas como variáveis de entrada em modelos hidrológicos a fim de quantificar os impactos sobre o regime de vazão (DIAZ-NIETO; WILBY, 2005; MINVILLE et al, 2009; TAYE; WILLEMS, 2013; BRAVO et al, 2013).

Os RCM's são modelos numéricos semelhantes aos GCM's, porém com resolução espacial mais fina, permitindo a avaliação de impactos em áreas menores e a análise mais detalhada dos impactos locais. Vários estudos acerca do uso de modelos climáticos regionais sugerem melhor desempenho nos resultados obtidos em comparação aos GCM's (e.g Kawazoe e Gutowski, 2013; Vautard et al., 2013).

Diferentes estudos sobre impactos de mudanças climáticas em bacias hidrográficas no Brasil têm utilizado como dados de entrada projeções de GCM's (e.g, Tucci e Damiani, 1994; Tomasella et al., 2008; Paiva et al., 2010; Montenegro e Ragab, 2012; Adam e Collischonn (2013), enquanto que a aplicação de modelos regionais ainda é bastante limitada. Segundo Barry e Chorley (2013) esta limitação se deve ao alto custo computacional dos RCM's, razão pela qual a maioria dos estudos de impactos de mudanças climáticas utiliza apenas projeções mensais de GCM's ou aplicam técnicas simples para derivar dados diários de precipitação dos GCM's. Dessa forma análises mais detalhadas sobre o impacto de mudanças climáticas, como vazões extremas, tornam-se limitadas ou impraticáveis.

Recentemente Arnell e Gosling (2013), com base em projeções climáticas de 21 GCM's, indicaram que há incertezas quanto ao sinal da mudança no regime de vazões para grande parte das áreas chaves para a geração de energia hidrelétrica no Brasil, incluindo a região da bacia do rio Paraná. Espera-se que o uso de um modelo regional com resolução espacial e temporal compatível com os eventos hidrológicos de bacias hidrográficas permita uma melhor representação de seu comportamento hidrológico frente a possíveis mudanças climáticas. Além do que o uso de séries diárias das variáveis climáticas, obtidas pelo RCM, permite analisar com mais precisão os eventos relacionados às vazões máximas e mínimas.

Neste contexto o presente trabalho avalia os possíveis impactos das mudanças climáticas sobre vazões extremas na bacia do rio Paraná. Foram analisadas as séries de vazões máxi-

mas e mínimas anuais em termos de magnitude e frequência de ocorrência. A modelagem dos impactos de mudanças climáticas sob o regime de vazões foi realizada com o modelo hidrológico MGB/IPH e projeções diárias do modelo regional ETA/CPTEC.

METODOLOGIA

Área de Estudo

A bacia do rio Paraná é um dos principais sistemas fluviais da América Latina. É de importância vital para a produção de energia hidrelétrica na Argentina, Brasil e Paraguai. A bacia do Alto Rio Paraná (BARP), até a barragem de Itaipu, concentra mais de 50% da capacidade hidrelétrica instalada brasileira atualmente em operação no país. Cheias ao longo do rio Paraná não são uma preocupação principal no Brasil, mas as inundações geradas na parte superior da bacia podem ter impactos sobre as cidades argentinas localizadas ao longo do Médio ou Baixo Paraná.

A área de estudo utilizada neste trabalho é apresentada na Figura 1. Os resultados serão analisados em quatro pontos de controle, todos definidos por grandes barragens hidrelétricas: UHE São Simão, UHE Água Vermelha, UHE Rosana e UHE Itaipu. A Figura 1 mostra a localização da bacia do Alto Rio Paraná e os quatro pontos de controle que estão localizados nas saídas dos maiores rios que compõem a bacia do Alto Rio Paraná: o rio Paranaíba (na UHE São Simão); do Rio Grande (na UHE Água Vermelha); o Rio Paranapanema (na UHE Rosana) e o próprio rio Paraná em Itaipu.

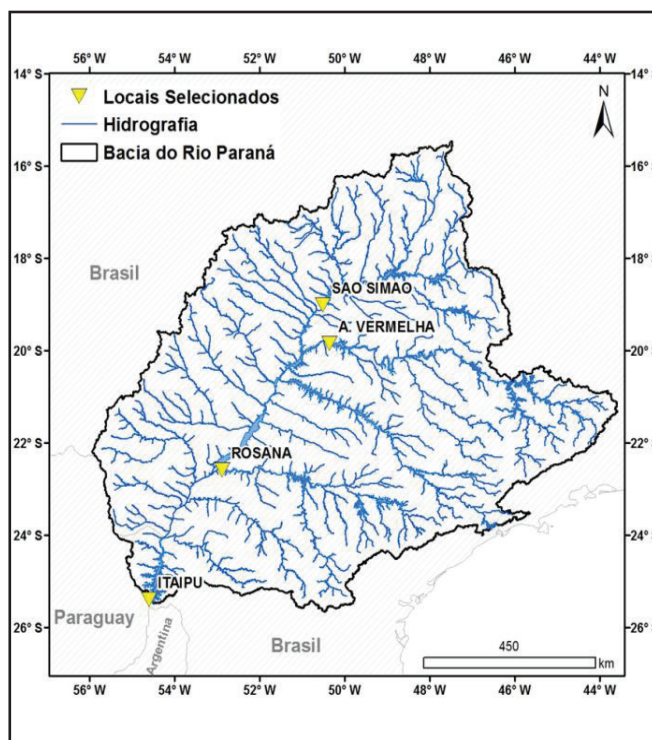


Figura 1 – Bacia hidrográfica do Rio Paraná e pontos de controle selecionados

Modelo Hidrológico MGB/IPH

O modelo hidrológico de grandes bacias MGB-IPH, descrito em Collischonn et al. (2007) e Fan e Collischonn (2014), é um modelo distribuído desenvolvido para aplicações em bacias hidrográficas com áreas tipicamente maiores que 10.000 km², sendo composto dos seguintes módulos: balanço de água no solo; evapotranspiração; escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo; e escoamento na rede de drenagem.

O MGB/IPH é um modelo distribuído no espaço, o que significa que a bacia hidrográfica é subdividida em unidades menores, definidas geomorfologicamente, e denominadas minibacias. O tipo de vegetação e uso da terra dentro de cada minibacia é categorizada dentro de uma ou mais classes utilizando a abordagem de Unidade de Resposta Hidrológica (URH). Uma URH é uma combinação única de tipo de solo e de uso da terra. Admite-se que uma dada URH tenha o mesmo comportamento hidrológico independentemente de onde esteja localizada dentro da bacia. Assim, o balanço hidrológico é calculado para cada URH de cada minibacia, e as vazões estimadas em cada URH são posteriormente somadas e propagadas até a rede de drenagem.

Neste trabalho, usamos DEM SRTM-90m (FARR et al., 2007) para obter as características topográficas. Um mapa de URH com 8 classes foi desenvolvido com base em mapas de solo (RADAMBRASIL, 1982) e vegetação (EVA et al., 2002). Os dados de precipitação e clima foram fornecidos pela Agência Nacional de Águas (ANA).

Para calibrar o modelo foram utilizados dados diários de descarga de várias estações de medição fornecidos pela ANA, bem como vazões naturalizadas obtidas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Para a calibração do modelo MGB-IPH, foram utilizados dados observados de 1960 a 1990. Com base na comparação de vazões observadas e simuladas, várias medidas de desempenho foram avaliadas (Tabela 1): Nash-Sutcliffe (NS), log-Nash-Sutcliffe (NSLog) e erro relativo de volume (AV).

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) tem um valor máximo igual a um (1), que corresponde a um ajuste perfeito entre as vazões simuladas pelo modelo e as vazões observadas. Este coeficiente tem a tendência de dar mais valor a erros nos picos das vazões. Desta forma, ajustar o modelo apenas com o objetivo de maximizar o coeficiente de Nash-Sutcliffe pode resultar em um mau ajuste nos períodos de recessão, quando a vazão é mais baixa. O coeficiente NSLog também tem valor máximo igual a 1. O objetivo de calcular o coeficiente de eficiência usando os logaritmos das vazões é que desta forma se obtém uma medida de desempenho menos sensível aos picos e mais sensível aos períodos de recessão de vazão. O erro relativo de volume é uma forma de avaliar se existe um desvio sistemático de superestimativa ou subestimativa da vazão.

Após o processo de calibração e verificação, o modelo MGB-IPH foi aplicado utilizando dados meteorológicos gerados pelo modelo ETA/CPTEC para diferentes intervalos de tempo. Como resultado, séries temporais de vazões para o clima atual (período de 1961-1990) e clima futuro (período de 2010-2100) foram obtidas. Cabe ressaltar que segundo Bayern (2014) não houve uma mudança significativa de uso de terra que implicasse

em alterações no balanço hidrológico entre o período de geração de geração dos dados (1990-2010). Dessa forma a comparação destes resultados permite avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre as vazões máximas e mínimas na BARP em cada um dos quatro pontos de controle.

Modelo Regional ETA/CPTEC

O modelo ETA-CPTEC (ETA) é um modelo climático regional (RCM) que utiliza resultados do GCM HadCM3 (POPE et al., 2000, GORDON et al., 2000), como condição de contorno. Através da parceria entre o Centro Brasileiro de tempo e Pesquisa de Clima (CPTEC), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o Met Office Hadley Centre (Mohc) o ETA foi adaptado para gerar cenários de mudanças climáticas (CHOU et al., 2011; PESQUERO et al., 2009) e as projeções das seguintes variáveis climáticas: temperatura do ar a 2 metros acima da superfície da terra (° C); temperatura do ponto de orvalho a 2 metros acima da superfície da Terra (° C); pressão atmosférica na superfície da Terra (hPa); precipitação total (mm); vento a 10 m (m/s); radiação incidente médio e de ondas curtas na superfície da terra (W/m²).

Estas variáveis foram disponibilizadas em quatro membros do modelo Eta 40 km, denominadas High (HIGH), Low (LOW), Medium (MID), e Control (CTRL), de acordo com a sensibilidade do clima em cada membro.

O período de 1961 a 1990 foi utilizado para representar o clima atual. O período de 2011 a 2099, que representa o clima do futuro no século XXI, foi dividido em três subintervalos de 30 anos cada (Futuro 1: 2011-2040; Futuro 2: 2041-2070; Futuro 3: 2071-2099). Todas as rodadas de modelos climáticos foram obtidas considerando o cenário de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) A1B.

O cenário A1B faz parte do grupo de cenários climáticos conhecidos como SRES (“Special Report on Emissions Scenarios”) presentes no quarto relatório sobre mudanças climáticas (AR4) do IPCC. Tais cenários foram agrupados de acordo com quatro projeções diferentes de emissões de gases de efeito estufa para o futuro, relacionados com aspectos de desenvolvimento social, econômico e tecnológico, crescimento populacional, preocupação com o meio ambiente e diferenças regionais. Estes grupos ou famílias de cenários são conhecidos como A1, A1B, A2 e B2. Dentre estes conjuntos de cenários, o A1B (chamado de business as usual ou BAU) é o que tem sido investigado de forma mais ampla (BARRY; CHORLEY, 2013) e apresenta uma projeção de emissões de GEE intermediárias em relação aos demais cenários.

Para a utilização de séries diárias de variáveis climáticas geradas pelo ETA foram aplicadas técnicas de remoção de viés. De acordo com Teutschbein e Seibert (2012) os modelos climáticos tendem a ter erros sistemáticos causados pela conceituação imperfeita dos fenômenos e processos que governam o clima e a influência da discretização espacial dos modelos. No presente trabalho os viés dos dados de precipitação foram removidos pela técnica do Mapeamento Quantil-Quantil (Bárdossy e Pegram, 2011). Para as demais variáveis climáticas (temperatura, velocidade do vento, radiação solar, umidade relativa do ar) foi utilizado o

método de Escalonamento Linear (LENDERINK et al., 2007).

MÉTODOS

A fim de avaliar os possíveis impactos das mudanças climáticas sobre as vazões extremas da bacia do Alto Rio Paraná, o modelo MGB/IPH foi executado em três etapas principais: 1) calibração com dados observados; 2) simulação das projeções climáticas do RCM ETA após remoção de viés. O intervalo de tempo de simulação para o clima atual foi 1961-1990 e para o clima futuro 2010-2099; 3) avaliação dos resultados em termos de mudanças na magnitude e frequência de vazões anuais máximas e mínimas.

A análise das mudanças climáticas sobre as vazões máximas e mínimas foi baseada na comparação entre os resultados da simulação hidrológica em diferentes períodos de tempo, e usando os dados dos diferentes membros. O período atual foi considerado como o período de referência, logo diferentes valores de vazões encontrados em comparação com este período representam o impacto decorrente das mudanças climáticas. É importante ressaltar que tanto as séries de vazão dos períodos futuros quanto as do período atual são oriundas das simulações do modelo ETA/CPTEC, logo, as séries observadas de clima e precipitação para a área em estudo foram utilizadas apenas para a calibração do modelo hidrológico.

A análise de vazões máximas foi realizada em termos de curvas de tempo de retorno. Assim, a magnitude de vazões máximas de vários períodos de retorno (TR), simuladas para o período atual (1961-1990) foram comparadas com três intervalos de tempos futuros: 2011-2040 (FUT1), 2041-2070 (FUT2) e 2071-2099 (FUT3). As vazões máximas anuais foram calculadas juntamente com as suas probabilidades de excedência para os períodos atuais e futuro, assumindo uma distribuição log-Pearson tipo III (CHOW et al, 1988; SHABRI 2002). Foram estabelecidos intervalos de confiança para o período atual (com um nível de confiança de 95%) para avaliar o grau de significância das variações de TR comparando diferentes membros e períodos.

No caso das vazões mínimas anuais os resultados são apresentados em termos de curva de permanência.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da calibração do modelo hidrológico são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Sumário dos resultados da calibração do MGB/IPH

Pontos de Controle	Medidas de Desempenho		
	NS	NSlog	V (%)
UHE São Simão	0,87	0,86	1,0
UHE Água Vermelha	0,94	0,94	1,7
UHE Rosana	0,95	0,93	0,8
UHE Itaipu	0,94	0,94	3,3

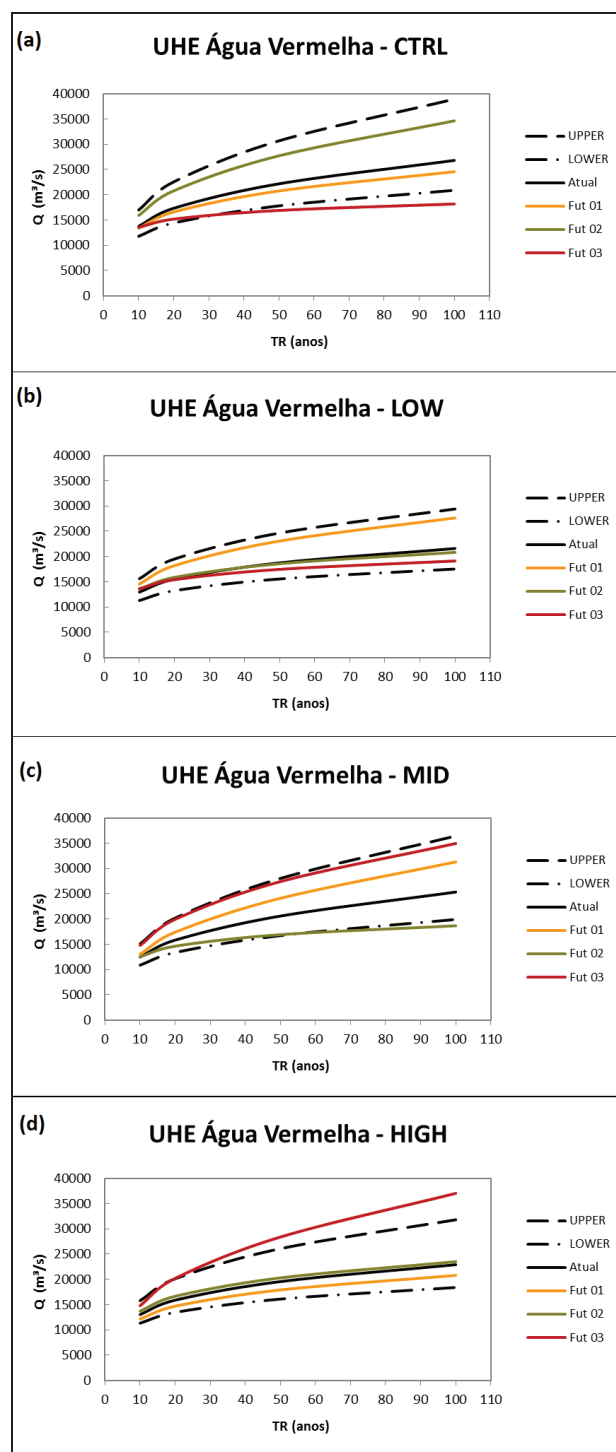


Figura 2 – Vazões máximas em função do tempo de retorno (TR) para o período atual e períodos futuros na UHE Lagoa Vermelha, membros: (a) CTRL, (b) LOW, (c) MID e (d) HIGH. A linha preta contínua representa o período atual. As linhas tracejadas representam os limites inferior e superior do intervalo de confiança de 95%

Após a calibração, o modelo hidrológico foi aplicado com os dados de entrada do modelo ETA/CPTEC, e as séries temporais foram analisadas a fim de obter os valores de vazões máximas anuais para diferentes períodos de retorno (2, 10, 50, 100 anos) e mínimos anuais representados por curvas de permanência.

Os resultados dos valores máximos de descarga vs. período de retorno são apresentados da Figura 2 à Figura 5. Neste caso os valores de máximos anuais foram ajustados pelo método de Log-Pearson III, sendo os intervalos de confiança de 95%, representados pelas linhas tracejadas e o período atual, obtido a partir dos dados de 1961 a 1990, representado pela linha preta contínua. Os demais intervalos de tempo (FUT1, FUT2 e FUT3) são representados pelas linhas coloridas. A mudança de comportamento das vazões máximas é aqui analisada pela comparação entre o período atual e períodos futuros. Valores localizados dentro do intervalo de confiança estabelecido (li-

nhas tracejadas) mostram que não há evidências suficientes para afirmar um possível aumento ou redução nos valores das vazões máximas.

A Figura 2 representa os resultados obtidos para a UHE Água Vermelha, localizada no Rio Grande, norte da BARP. De

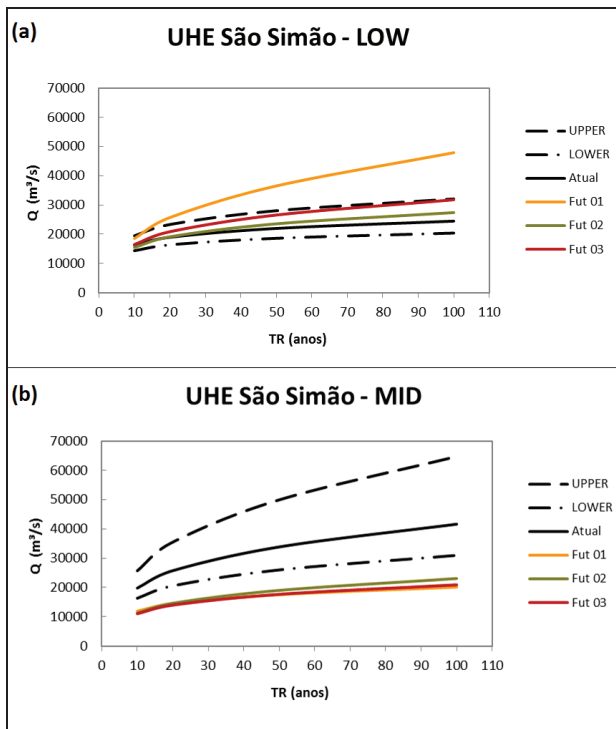


Figura 3 - Vazões máximas em função do tempo de retorno (TR) para o período atual e períodos futuros na UHE São Simão, membros: (a) CTRL e (b) LOW. A linha preta contínua representa o período atual. As linhas tracejadas representam os limites inferior e superior do intervalo de confiança de 95%

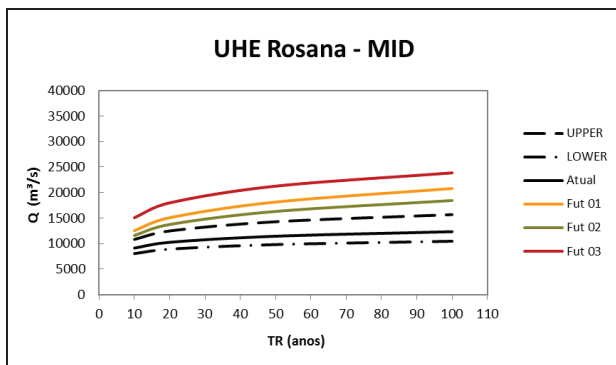


Figura 4 - Vazões máximas em função do tempo de retorno (TR) para o período atual e períodos futuros na UHE Rosana para o membro MID. A linha preta contínua representa o período atual. As linhas tracejadas representam os limites inferior e superior do intervalo de confiança de 95%

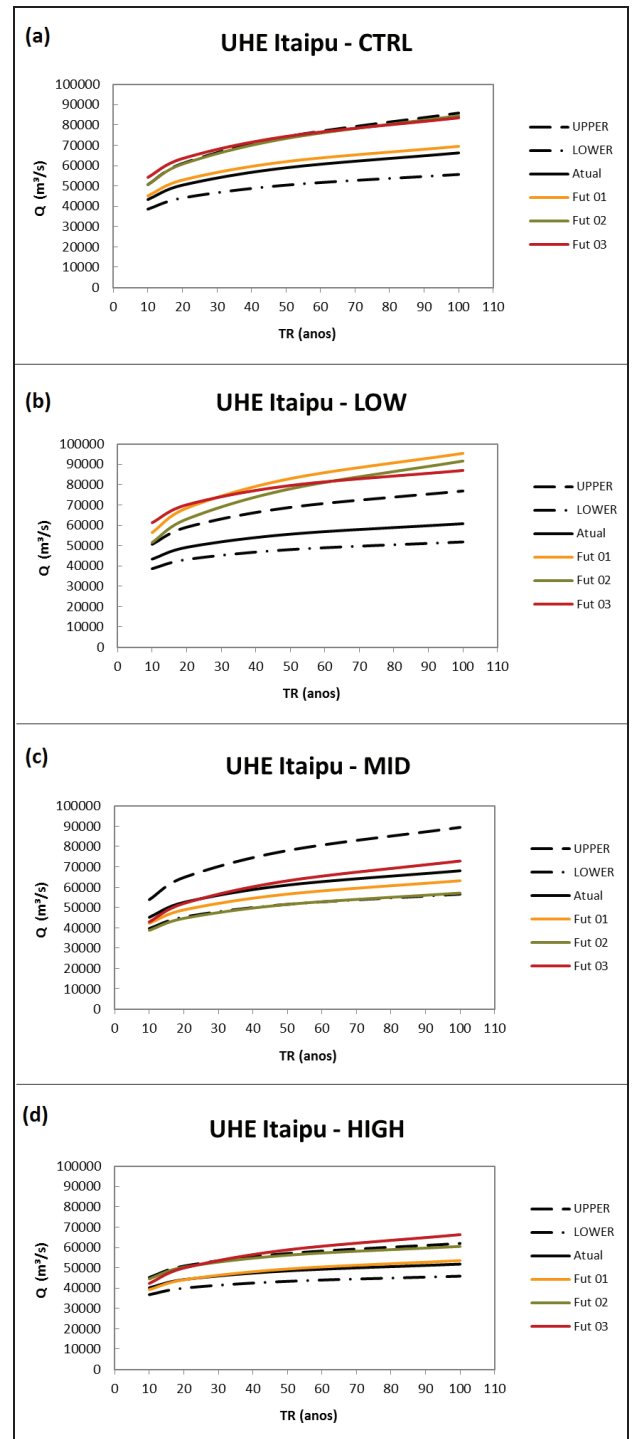


Figura 5 - Vazões máximas em função do tempo de retorno (TR) para o período atual e períodos futuros na UHE Itaipu, membros: (a) CTRL, (b) LOW, (c) MID e (d) HIGH. A linha preta contínua representa o período atual. As linhas tracejadas representam os limites inferior e superior do intervalo de confiança de 95%.

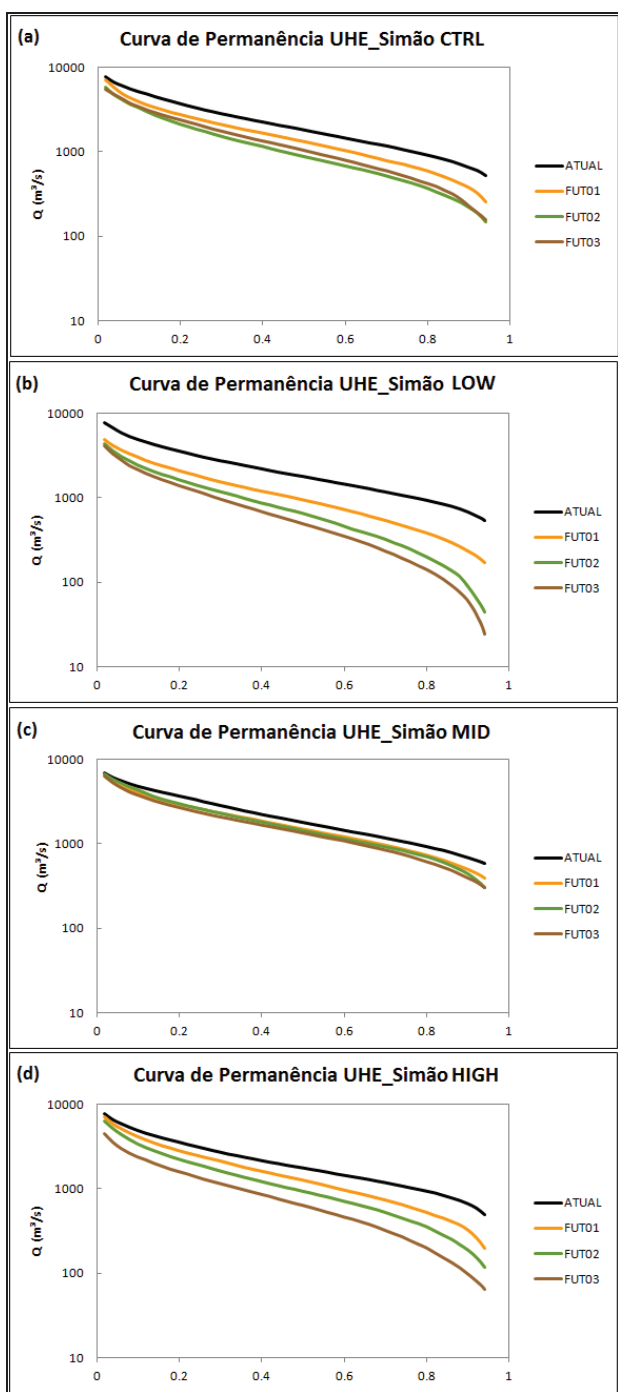


Figura 6 - Curva de Permanência UHE São Simão membros CTRL (a), LOW (b), MID (c) e HIGH (d)

acordo com os resultados observa-se que não há nenhum sinal consistente de aumento ou diminuição das vazões máximas na UHE Água Vermelha devido às alterações climáticas. O membro CTRL FUT 3 mostra redução para os valores de máximas enquanto que para este mesmo intervalo de tempo no membro HIGH ocorrerá aumento. No entanto, para a maioria dos casos e os membros, as curvas para os períodos futuros estão dentro dos limites de incerteza para o clima atual.

Resultados semelhantes para os membros CTRL e HIGH são encontrados para UHE São Simão. Já para os membros

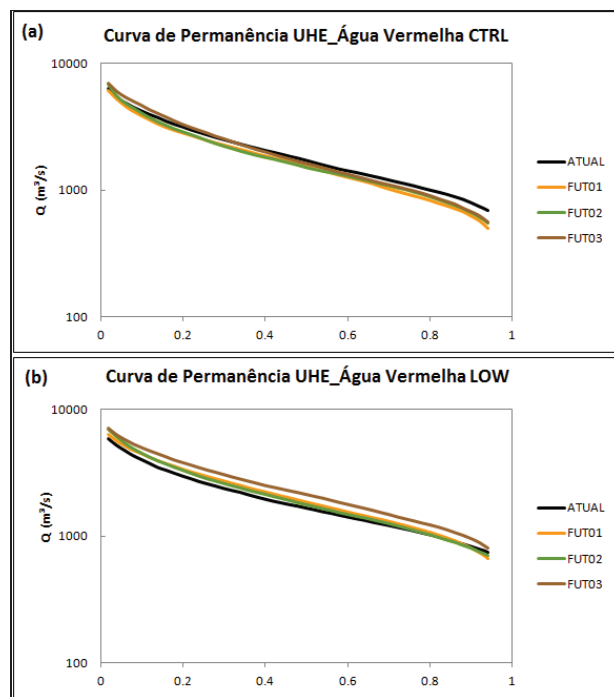


Figura 7: Curva de Permanência UHE Água Vermelha membros CTRL (a) e LOW (b).

LOW e MID as diferenças são maiores (Figura 3). De acordo com o membro MID ocorrerá redução nos valores de vazões máximas em todos os intervalos de tempo futuro. As diferenças encontradas entre os resultados das UHE água Vermelha e São Simão, ambas localizadas ao norte da BARP, sugerem a influência espacial da variabilidade climática em cada um dos pontos analisados e respectivas áreas.

Na Figura 4, UHE Rosana (sudeste da bacia do rio Paraná), os resultados são novamente importantes para o membro MID que sugere aumento das vazões para todos os intervalos futuros. No entanto, diferentemente dos resultados na UHE São Simão, os resultados obtidos com o membro MID na UHE Rosana apontam aumento (quase o dobro) das vazões máximas futuras. Os demais membros mostram que a descarga máxima poderá aumentar, porém os valores obtidos permanecem dentro do intervalo de confiança.

Na Figura 5, UHE Itaipu (exutório da BARP), observa-se que os membros CTRL e HIGH não apontam alterações significativas nas vazões máximas. Os membros LOW e MID apresentam resultados contraditórios entre si, respectivamente com elevado aumento e redução das vazões máximas no futuro. No entanto estas variações não podem ser consideradas significativas, uma vez que permanecem dentro da faixa de incerteza estabelecida na metodologia.

As Figuras 6 a 9 se referem às vazões mínimas anuais expressas em termos de curva de permanência.

A figura 6 mostra redução das vazões mínimas no UHE São Simão, sendo nos membros LOW e HIGH as maiores variações de magnitude da mudança prevista em cada um dos futuros.

Para a UHE Água Vermelha não há evidências de mudanças nas vazões mínimas. A Figura 7 mostra o resultado do membro CTRL e LOW. Observa-se que as vazões mínimas

permanecem similares ao período atual como mostra o quadro (a), já no quadro (b) se percebe um ligeiro aumento das vazões mínimas com poucas variações entre os três períodos futuros. No entanto as mudanças não são significativas. Os membros MID e HIGH têm comportamento extremamente semelhante ao CTRL.

Resultados mais significativos e divergentes são encontrados para a UHE Rosana (Figura 8). Os membros CTRL e MID apontam para aumento das vazões mínimas nos membros LOW e MID, com concordância entre os três intervalos

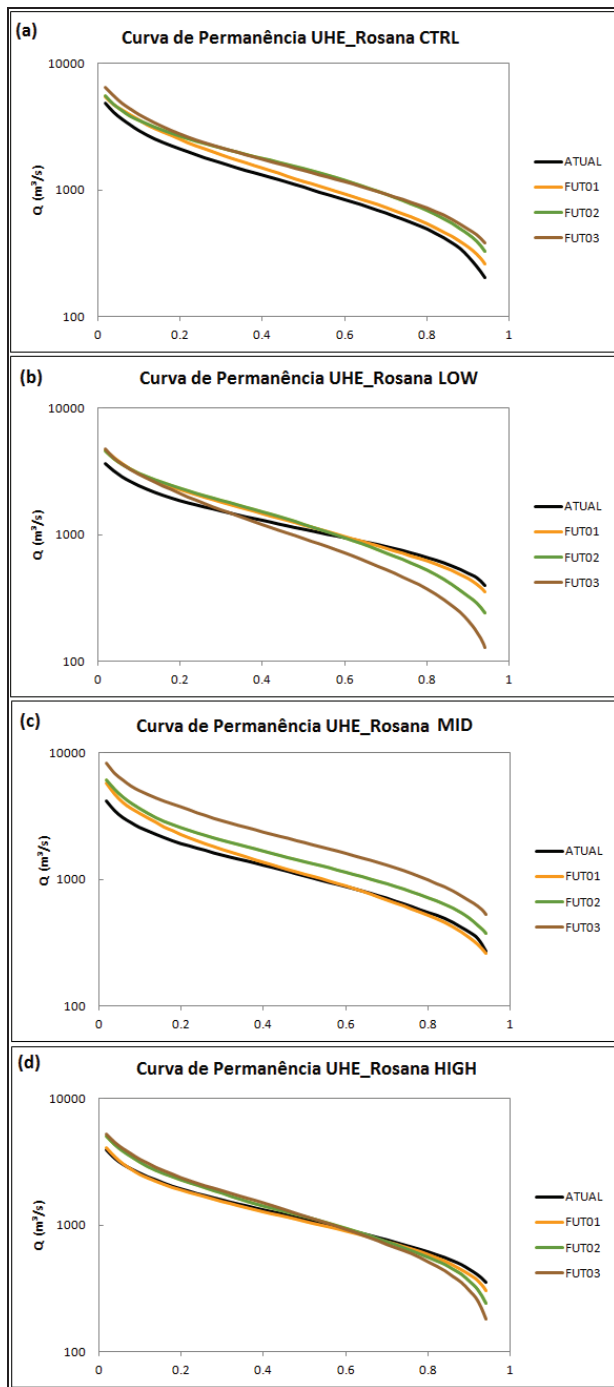


Figura 8: Curva de Permanência UHE Rosana membros CTRL (a), LOW (b), MID (c) e HIGH (d)

de tempo futuro, enquanto que nos membros LOW e HIGH isto não ocorre.

A Figura 9 representa a UHE Itaipu. Observam-se resultados bastante similares aos encontrados na UHE Água Vermelha membros CTRL e LOW. Já os membros MID e HIGH sugerem redução dos valores de mínimas. Segundo apresentado na Figura 9 as vazões referentes à Q90 e Q95 sofrerão reduções gradativas nos futuros 1, 2 e 3.

No geral os resultados sugerem que a variabilidade natural do clima pode ser mais importante do que a mudança climática oriunda dos efeitos de GEE.

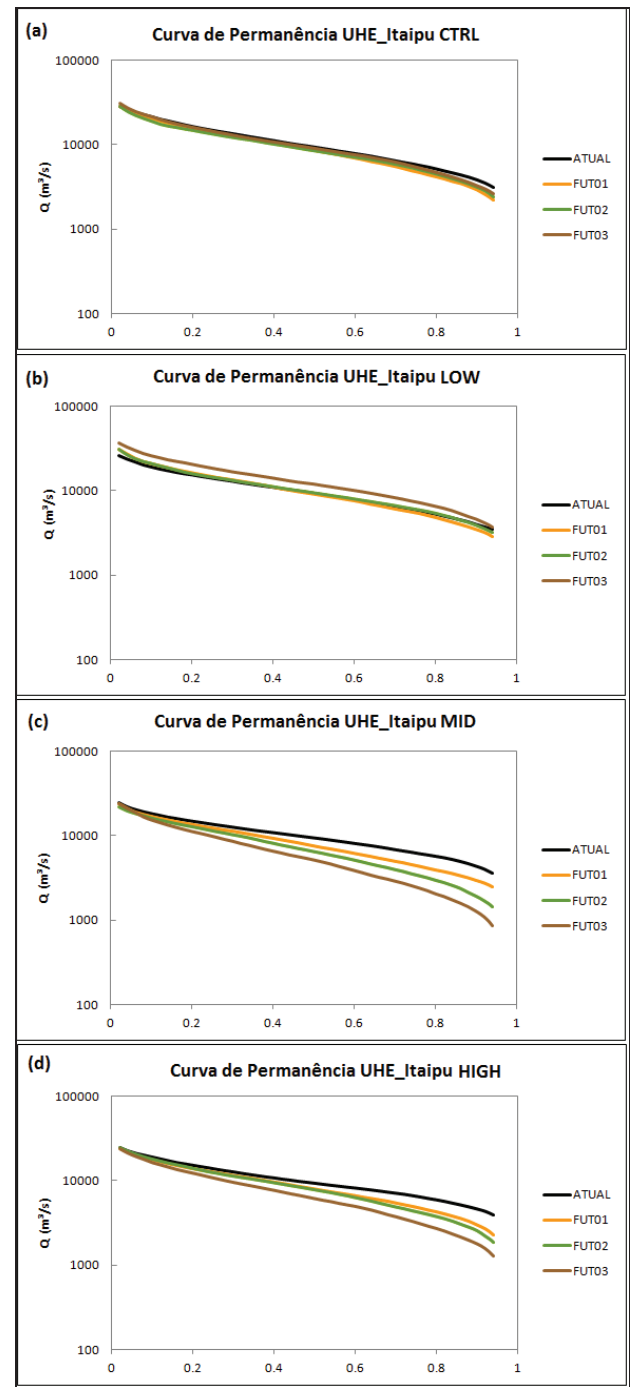


Figura 9: Curva de Permanência UHE Itaipu membros CTRL (a), LOW (b), MID (c) e HIGH (d)

CONCLUSÃO

Este estudo apresentou uma avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre as vazões máximas e mínimas na bacia do Alto Rio Paraná. O uso do modelo climático regional ETA-CPTEC, com dados climáticos diários, para avaliar vazões extremas no Brasil pode ser considerado uma inovação em comparação com estudos anteriores sobre impactos de mudanças climáticas nesta área de estudo.

Os resultados mostram que os impactos sobre as vazões são altamente dependentes do membro do modelo utilizado para obter as projeções climáticas. Para as análises de vazões máximas, em quase todos os pontos de controle, os resultados mostram discrepâncias entre a magnitude e o sinal (decréscimo ou aumento) da mudança de vazões. A exceção foi a UHE Rosana, onde se observou concordância entre os membros sugerindo aumento das vazões máximas, porém apenas o membro MID apresentou valores fora dos limites de confiança aplicados na metodologia.

Na maioria dos casos os resultados encontrados estão dentro dos limites de incerteza estabelecidos, sugerindo que a variabilidade natural é pelo menos tão importante quanto os impactos das mudanças climáticas.

Para as vazões mínimas, representadas pela curva de permanência, também é possível afirmar que o resultado é dependente do membro do modelo selecionado.

Observa-se ainda que os impactos, ou seja, as diferenças de vazão entre o período atual e futuro tendem a ser maiores quanto mais distante for o período de tempo simulado sugerindo que a incerteza aumenta com a ampliação do horizonte de tempo analisado.

Com base nos presentes resultados e conclusões, acredita-se que novos estudos, com maior número de modelos climáticos regionais possam reduzir as incertezas evidenciadas. Sendo este, portanto, o foco de próximas pesquisas na Bacia do Rio Paraná.

REFERÊNCIAS

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.

ARNELL, N. W.; GOSLING, S. N.. The impacts of climate change on river flow regimes at the global scale. *Journal of Hydrology*, v.486, p. 351-364, 2013.

BAYER, D. M. *Efeitos das Mudanças de Uso da Terra no Regime Hidrológico de Bacias de Grande Escala*. 2014. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto Alegre, 2014.

BÁRDOSSY, A.; PEGRAM, G. Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology.

Water Resources Research, v.47, doi:10.1029/2010WR009689, 2011.

BARRY, G. R.; CHORLEY, R. J. *Atmosfera, Tempo e Clima*. 9 ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2013.

BRAVO, J.M.; COLLISCHONN, W.; DA PAZ, A.R.; ALLASIA, D.; DOMECCQ, F. Impact of projected climate change on hydrologic regime of the Upper Paraguay River basin. *Climatic Change*, (DOI10.1007/s10584-013-0816-2), 2013.

CHOU, S.C.; MARENGO, J.A.; LYRA, A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J.; ALVES, L.M.; KAY, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D.; GOMES, J.L.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. *Clim Dyn*. doi:10.1007/s00382-011-1002-89, 2011.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. *Applied hydrology*. McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series, 1988.

CHRISTENSEN, N.; LETTENMAIER, D. P. A multimodel ensemble approach to assessment of climate change impacts on the hydrology and water resources of the Colorado River basin. *Hydrol Earth Syst Sci*, v. 11, p. 1417-1434, 2007.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D. G.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, p. 878-895, 2007.

DIAZ-NIETO, J.; WILBY, R. L. A comparison statistical downscaling and climate change factor methods: impacts on low flows in the river Thames, United Kingdom. *Climatic Change*, v. 69, p. 245-268, 2005.

EVA, H. D.; DE MIRANDA, E. E.; DI BELLA, C. M.; GOND, V. *A Vegetation Map of South America*. EUR20159 EN, European Commission, Luxembourg, 2002

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica". *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* (in press), 2014.

FARR, T.G.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROSEN, P.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; BURBANK, D.; OSKIN, M.; ALSDORF, D. The shuttle radar topography mission. *Rev. Geophys*. V. 45, 2007.

GORDON, C. C.; COOPER, C. A.; SENIOR, H.; BANKS, J. M.; GREGORY, T. C.; JOHNS, J. F.; MITCHELL, B.; WOOD, R. A. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transport in a version of the Hadley centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, v.16, p. 147-168, 2000.

HUNTINGTON, T. G. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal Hydrol.*, v. 319, p. 83 - 95, 2006.

- IPCC. Climate Change. Synthesis Report. *Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fourth Assessment*. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 2007.
- JUNG I.W.; BAC, D.H.; LEE, B. J. Possible change in Korea streamflow seasonality based on multi-model climate projections. *Hydrological Processes*, v. 27, p. 1033-1045. Doi: 10.1002/hyp.9215, 2013.
- KAWAZOE, S.; GUTOWSKI, W. J. Regional, Extreme Daily Precipitation in CMIP5 Simulations. *Journal of Hydrometeorology*, v. 14, p. 1228-1242, 2013.
- LENDERINK, G.; BUISSHAND, A.; VAN DEURSEN, W. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 11, n. 3, p. 1145–1159, 2007.
- MINVILLE, M., BRISSETTE, F., KRAU, S., LECONTE, R. Adaptation to climate change in the management of a Canadian water-resources system exploited for hydropower. *Water Resources Management*, v. 23, p. 2965–2986, 2009.
- MONTENEGRO, S.; RAGAB, R. Impact of possible climate and land use changes in the semi arid regions: A case study from North Eastern Brazil. *Journal of Hydrology*, v. 434–435, p. 55–68, 2012.
- MUJUMBAR, P. P.; KUMAR, D. G. *Floods in a Climate Change: Hydrologic Modeling*. Cambridge Press, UK, 2012. 178 p.
- PESQUERO, J. F.; CHOU, S. C.; NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A. Climate downscaling over South America for 1961–1970 using the Eta model. *Theoretical and Applied Climatology*, 2009.
- POPE, V.; GALLANI, M.; ROWTREE, P.; STRATTON, R. The Impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre Climate model. *Climate Dynamics*, v. 16, p. 123-146, 2000.
- RADAMBRASIL. Programa de Integração Nacional, Levantamento de Recursos Naturais. Ministério das Minas e Energia, Secretária-geral, 1982.
- PAIVA, R.C.D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a gis based approach. *Journal of Hydrology* v. 406, p. 170–181, 2010.
- SEABY, L. P.; REFSGAARD, J. C.; SONNENBORG, T.O.; STISEN, S.; CHRISTENSEN, J. H.; JENSEN, K. H. Assessment of robustness and significance of climate change signals for an ensemble of distribution based scaled climate projections. *Journal of Hydrology*, v. 486, p. 479–493, 2013.
- SHABRI, A. A comparison of plotting formulas for the Pearson Type III distributions. *J Technol*, v. 36 (C), p. 61–74, 2002.
- TAYE, M. T.; WILLEMS, P. *Influence of downscaling methods in projecting climate change impact on hydrological extremes of upper Blue Nile basin*, 2013.
- TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, v. 456-457, p. 12–29, 2012.
- TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A.; CUARTAS, L. A.; FERREIRA, M.; FERREIRA, J. C.; MARENGO, J. *Study of the climate change impacts on surface water resources and groundwater levels in the Tocantins river basin*, 2008.
- TRENBERTH, K. E. *The Impact of Climate Change and Variability on Heavy Precipitation, Floods, and Droughts*: Encyclopedia of Hydrological Sciences, 2006.
- TUCCI, C. E. M.; DAMIANI, A. Potenciais impactos das mudanças climáticas sobre a vazão do rio Uruguai. *Revista Brasileira de Engenharia – Caderno de Recursos Hídricos, ABRH*, v. 12, n. 2, 1994.
- VAUTARD, R. et al. The simulation of European heat waves from an ensemble of regional climate models within the EURO-CORDEX project. *Clim Dyn*, v. 41, p. 2555–2575, 2013. DOI 10.1007/s00382-013-1714-z.

Contribuição dos autores:

Katiucia Nascimento Adam: produção do artigo, análises estatísticas, modelagem hidrológica e geração de resultados.

Walter Collischonn: orientação de pós-graduação, orientação em pesquisa, revisão técnica.

Juan Martin Bravo: remoção de viés das projeções climáticas utilizadas, revisão técnica.

Fernando Mainardi Fan: discretização e modelagem hidrológica da bacia do Rio Paraná, calibração do modelo hidrológico MGB-IPH, revisão técnica.

Paulo Rógenes Monteiro Pontes: discretização e modelagem hidrológica da bacia do Rio Paraná, calibração do modelo hidrológico MGB-IPH, revisão técnica.