

Investigação sobre o Impacto de Mudanças Climáticas no Volume de Reservatórios para Geração de Energia

Gabriella de Sá Queen, Fábio Farias Pereira

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil
gabriella.queen@grad.ufsc.br, fabio.farias@ufsc.br

RESUMO

O presente estudo buscou investigar os potenciais impactos de mudanças climáticas no volume de cinco usinas hidrelétricas (UHEs) localizadas na bacia do rio Chopim (BRC), no estado do Paraná. A abordagem empregada baseou-se na utilização de projeções de precipitação geradas pelo modelo climático global (GCM) HadCM3 como entrada para o modelo hidrológico distribuído MGB-IPH, a fim de estimar vazões para os cenários A2 e B1, propostos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Dentre os principais resultados observados, destacou-se a considerável disparidade entre os comportamentos intra-anuais das precipitações médias mensais observadas e projetadas, com projeções até 74% menores que a média observada no mês de julho. Tal desarmonia teve grande influência nas vazões simuladas para os cenários analisados, causando reduções percentuais da Q_{95} na ordem de 80% para os pontos das UHEs. De maneira geral, verificou-se que o cenário A2 apresentou períodos de estiagem mais longos que o cenário B1, resultado que suporta a teoria que incrementos na temperatura terrestre aumentariam também a probabilidade de eventos extremos mais frequentes e intensos. Em contrapartida, o cenário A2 também proporcionou maiores valores de energia firme do que o cenário B1, indicando a possibilidade de suprir maiores demandas energéticas durante seus períodos críticos. Adicionalmente, identificou-se uma tendência do cenário B1 necessitar de reservatórios de menores volumes para garantir $1 \text{ MW}_{\text{med}}$ de energia em comparação com o cenário A2.

Palavras-chave: Projeções climáticas; Reservatórios de hidrelétricas; Modelagem numérica.

INTRODUÇÃO

Face à dificuldade em firmar acordos voltados às medidas mitigatórias relacionadas ao fenômeno das mudanças climáticas entre países, observa-se uma crescente preocupação da comunidade científica com este tema nas últimas décadas (REIS e SILVA, 2016). Visando fundamentar tais discussões, estudos recentes analisam as abundantes evidências do aumento acentuado da temperatura média do planeta, considerando a sua relação com o incremento progressivo das emissões de gases do efeito estufa ao longo dos anos (EGGLETON, 2012).

Desde o aumento da probabilidade de desastres naturais, da intensidade de eventos extremos de chuva ou de períodos prolongados de seca, cada possível efeito do aquecimento global traz consigo uma cadeia de variadas consequências naturais, sociais e econômicas (KARAMOUZ *et al.*, 2012). Diante desta situação, percebe-se a necessidade de investigações de como encarar os variados e complexos desafios impostos por este fenômeno.

Um exemplo pertinente na realidade brasileira são os efeitos das mudanças climáticas no setor de energia hidrelétrica, uma vez que esta compõe aproximadamente 61% da matriz energética do país (ANEEL, 2015a). A geração de energia hidráulica, a qual se dá a partir do fluxo de água, possui uma íntima relação com o clima e o ciclo

hidrológico (WOLFSON, 2008). Sendo assim, apresenta uma preocupante vulnerabilidade às mudanças climáticas.

Do lado da demanda, tem-se o fato de que temperaturas extremas geralmente levam a um aumento do consumo de energia elétrica, devido ao maior uso de aparelhos refrigeradores ou aquecedores (MADANI *et al.*, 2014). Do lado da oferta, períodos prolongados de seca podem acarretar em uma redução das vazões dos rios, consequentemente diminuindo o potencial hidráulico para geração de energia. Ademais, temperaturas mais elevadas também contribuem para maiores perdas por evaporação nos reservatórios das usinas hidrelétricas, constituindo ainda mais um fator dificultante nesta situação (MADANI *et al.*, 2014).

É evidente, portanto, a importância da avaliação destes potenciais impactos a fim de garantir que a demanda de energia sempre seja suprida pelo parque gerador, mesmo durante períodos críticos. Segundo GUILHON *et al.* (2007), estudos hidroclimáticos são uma ferramenta essencial para o planejamento e coordenação de operações de geração de energia hidrelétrica.

Logo, o presente estudo buscou contribuir para o avanço do conhecimento nesta área ao investigar os possíveis efeitos de mudanças climáticas no volume de cinco reservatórios utilizados para geração de energia localizados na bacia do rio Chopim (BRC), situada no estado do Paraná. Neste sentido, buscou-se alcançar três objetivos específicos: (a) analisar alterações no regime pluviométrico

da BRC a partir de projeções climáticas; (b) reproduzir os processos hidrológicos da BRC através de um modelo hidrológico distribuído; (c) gerar estimativa de vazões sob regimes pluviométricos influenciados por mudanças climáticas.

Para tanto, a abordagem adotada baseou-se na utilização do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH alimentado por projeções de precipitação geradas pelo modelo climático global (GCM) UKMO-HadCM3 para os cenários A2 e B1, propostos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Mudanças climáticas

O clima descreve as condições usuais prevalentes na atmosfera (temperatura, umidade, radiação, entre outros) e seus efeitos na superfície terrestre. Sendo assim, diferencia-se do conceito de “tempo”, o qual diz respeito às condições imediatas e locais. Enquanto o tempo pode sofrer grandes variações de dia a dia e até de hora a hora, o clima, varia em escalas temporais maiores, podendo ser caracterizado também como a expressão média do tempo (WOLFSON, 2008).

Apesar de alterações no clima não serem novidade, o conceito de “mudanças climáticas” vem ganhando cada vez mais atenção da comunidade científica. Tal fato se deve à uma série de evidências que levam à conclusão que o planeta está de fato se aquecendo em alta velocidade (EGGLETON, 2012; IPCC, 2015a).

Em especial, nota-se que este fenômeno têm sido associado à emissão de gases do efeito estufa (GEEs), como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) decorrentes da atividade humana e não apenas às suas causas naturais (ARCHER e RAHMSTORF, 2009). Apoiando esta hipótese, observa-se que em comparação com simulações climáticas que consideram apenas as forçantes naturais, simulações que incluem o aumento de emissões de GEEs oferecem resultados significativamente mais próximos dos dados observados (DESSLER, 2011).

Neste contexto, o IPCC apresenta quatro possíveis cenários de emissões de GEEs para projeções climáticas: A1, A2, B1 e B2. Tais cenários baseiam-se em possíveis linhas de desenvolvimento da humanidade até 2100, atentando-se ao fato que não existe um cenário que seja mais provável do que os outros (IPCC, 2000). Salienta-se ainda que, do ponto de vista do aumento da temperatura terrestre, o cenário B1 caracteriza-se como o mais otimista, enquanto o cenário A2 apresenta algumas das projeções mais preocupantes.

Modelagem numérica

A modelagem numérica consiste em uma ferramenta onde são empregados algoritmos e equações para tentar representar um sistema. A partir de uma boa representação de um sistema, é possível a realização de simulações sob parâmetros variáveis, de maneira que se aproximem da realidade. Sendo assim, permitem chegar a

conclusões relevantes não só para monitoramento, operação e planejamento futuro de variados setores da sociedade.

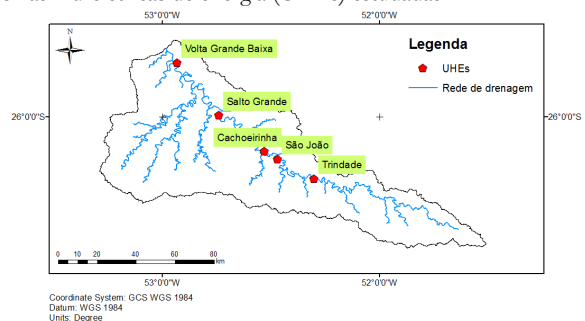
No contexto dos parques de geração hidrelétrica, é importante destacar a íntima relação entre as mudanças climáticas e o ciclo hidrológico. Logo, é útil pensar nesta interação a partir do sistema hidroclimático, o qual pode ser representado por modelos climáticos e hidrológicos, metodologia amplamente empregada em estudos que consideram o impacto da variabilidade climática nos recursos hídricos (SILVA, 2005; GUILHON *et al.*, 2007; LIMA e LALL, 2010; SANTANA *et al.*, 2011; MOHOR *et al.*, 2015).

METODOLOGIA

Área de estudo

A bacia do rio Chopim (BRC) possui área de 7.240 km² e localiza-se no estado do Paraná, entre as coordenadas de 25°38'50" S a 26°36'04" S e 51°30'40" W a 53°17'16" W. A região de estudo está inserida na bacia do rio Iguçu, unidade hidrográfica com um dos maiores parques de geração hidrelétrica no país (ANEEL, 2008). Neste contexto, destaca-se que o rio Chopim é o rio com maior densidade de pontos de geração hidrelétrica dentro da bacia mencionada, contando com cinco usinas de hidrelétricas de energia (UHEs) dispostas em cascata, como apresentado na Figura 1 (ANEEL, 2015b).

Figura 1. Mapa de localização da bacia do rio Chopim (BRC) e usinas hidrelétricas de energia (UHEs) estudadas.



O clima da região segundo a classificação de Köppen é de tipo Cfb – subtropical úmido mesotérmico, com verões frescos e sem estação seca. As temperaturas médias nos meses mais quentes são inferiores a 22°C e nos meses mais frios, inferior a 18°C, com temperatura média anual de 17°C. As médias de chuva anuais situam-se entre 1.700 e 1.800 mm (GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ, 2010).

Cerca de 99% da BRC é caracterizada por culturas cíclicas, savana gramíneo-lenhosa e vegetação secundária sem palmeiras, indicando um nível não muito elevado de cobertura vegetal (IBGE, 2012). Verifica-se também que aproximadamente 41% da área estudada é composta por latossolos, o qual apresenta uma boa capacidade de infiltração devido à sua profundidade e alta permeabilidade à água (EMBRAPA, 2006). Os outros tipos de solo

presentes na BRC consistem em nitossolos, neossolos e cambissolos.

Modelo hidrológico MGB-IPH

O modelo hidrológico distribuído MGB-IPH, desenvolvido no Instituto de Pesquisa Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e descrito em detalhe nas publicações de COLLISCHONN *et al.* (2007) e FAN e COLLISCHONN (2014), é amplamente empregado no estudo de bacias brasileiras (GUILHON *et al.*, 2007; LIMA *et al.*, 2014; ADAM *et al.*, 2015). Incorporando métodos como Penman-Monteith e Muskingum-Cunge, o MGB-IPH é composto por um conjunto de algoritmos que englobam o balanço de água no solo, a evapotranspiração, os escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo e escoamento na rede de drenagem (TUCCI *et al.*, 2003; ADAM *et al.*, 2015).

Dentre as razões para sua escolha neste estudo, pode-se citar: (1) modelo elaborado no Brasil e de código aberto, facilitando não só a compreensão dos processos e cálculos envolvidos, como também a resolução de eventuais problemas; (2) modelo elaborado para aplicações em grandes bacias (maiores que 1.000 km²) e características heterogêneas, descrição compatível com a área de estudo deste trabalho; e (3) dados de entrada facilmente obtidos por meio de órgãos públicos e revisão bibliográfica (IPH, 2015).

Tal modelo considera a variabilidade espacial dos processos hidrológicos por meio da sub-divisão da área estudada em mini-bacias e Unidades de Resposta Hidrológicas (URHs). As mini-bacias são definidas pelas áreas de drenagem de cada trecho de rio. Por sua vez, as URHs, são unidades territoriais heterogeneamente distribuídas e caracterizadas por condições similares de solo e vegetação.

O processo de discretização da bacia foi realizado por meio do programa ArcGIS, utilizando como dados brutos: (1) modelo digital de elevação do terreno, gerado por um mosaico de imagens provenientes do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e obtidos pelo site Brasil em Relevo da EMBRAPA (MIRANDA, 2005); (2) mapa de tipos de solo, também da EMBRAPA (EMBRAPA, 2001); e (3) mapa de tipos de vegetação do Projeto RADAM (IBGE, 2015).

Para a definição das URHs, os tipos de solos e vegetação presentes na área de estudo foram reclassificados a fim de que suas diferentes possíveis combinações não excedessem o limite recomendado de 5 URHs (IPH, 2015).

Adotando o potencial de escoamento superficial como parâmetro de referência para reclassificação dos tipos de solo, estes foram categorizados entre: (1) solos rasos, com alto potencial de escoamento superficial; e (2) solos profundos, com baixo potencial de escoamento superficial. Por sua vez, os tipos de vegetação foram reclassificados de acordo com suas densidades de cobertura vegetal, sendo atribuídos às categorias: (1) agricultura; ou (2) cerrado.

A descrição das URHs produzidas pela combinação dos mapas de solos e vegetação reclassificados encontram-se dispostas na Tabela 1.

Tabela 1. Descrição das URHs obtidas pelo processo de discretização da bacia, incluindo suas respectivas áreas (A_u) e percentuais da área total da BRC (A_u/A_{tot}).

URH	A_u	A_u/A_{tot}
	[km ²]	[%]
Agricultura em solos profundos	3411,6	47,1
Agricultura em solos rasos	1607,5	22,2
Cerrado em solos profundos	401,5	5,5
Cerrado em solos rasos	1819,3	25,1

A utilização do modelo MGB-IPH envolveu duas etapas: (1) validação do modelo a partir da comparação dos dados simulados e observados; e (2) simulações substituindo as séries pluviométricas históricas por projeções de chuva influenciadas por mudanças climáticas como dado de entrada.

A validação do modelo baseou-se em séries históricas de 5 estações fluviométricas, 7 estações pluviométricas e 2 estações meteorológicas localizadas na área de estudo e suas redondezas. Estes dados foram obtidos do Instituto ÁguasParaná, do site HidroWeb da Agência Nacional das Águas (ANA), e do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR), respectivamente (ANA, 2015).

Os parâmetros calibráveis do modelo foram definidos de acordo com valores encontrados em literatura para regiões semelhantes (COLLISCHONN *et al.*, 2010b; a). Com base na disponibilidade temporal dos dados fluviométricos, adotou-se o período de 1986-1990 para a verificação da adequação destes para a reprodução dos processos hidrológicos da BRC.

A avaliação da performance das simulações realizadas foi analisada segundo o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), calculado conforme a Equação (1). Tal indicador é adimensional e seus valores variam de $-\infty$ e 1, sendo este o valor ótimo. Desta forma, julga-se que quanto mais próximo de 1 o NSE obtido, melhor a performance do modelo.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (1)$$

Onde: NSE corresponde ao coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; Q_o^t corresponde à vazão observada no tempo t ; Q_m^t corresponde ao valor de vazão simulado no tempo t ; e \bar{Q}_o corresponde à média das vazões observadas.

Salienta-se que o indicador escolhido tende a dar maior importância aos picos de vazão. Sendo assim, vale citar dois outros medidores de desempenho amplamente utilizados em estudos hidrológicos: (1) o coeficiente de Nash-Sutcliffe para logaritmos (NS_{log}), o qual é menos sensível aos picos e mais sensível aos períodos de recessão de vazão; e (2) a diferença de volumes (ΔV), o qual permite a verificação da existência de desvios sistemáticos de

superestimativa ou subestimativa da vazão (TUCCI, 1998; ALLASIA *et al.*, 2006; LIMA *et al.*, 2014).

Projeções climáticas

A avaliação dos efeitos de mudanças climáticas nas vazões naturais afluentes ao complexo de reservatórios estudado baseou-se nas projeções de precipitação média mensal geradas pelo modelo climático global (GCM) UKMO-HadCM3. Desenvolvido pela instituição *Hadley Centre for Climate Prediction and Research* do Reino Unido, este modelo é composto por uma grade global de 96 x 73 células e possui resolução horizontal (latitude/longitude) de 3.8°C x 2.5°C (LIMA *et al.*, 2014). A fim de obter resultados referentes aos dois extremos do leque destas possibilidades, foram analisados os cenários B1 (menor aumento de temperatura) e A2 (maior aumento de temperatura) e os períodos de 2011-2030 e 2080-2099.

Os dados brutos das projeções climáticas foram obtidos por meio do *Data Distribution Centre* do IPCC (IPCC, 2015b), onde são disponibilizados em formato NetCDF. Sendo assim, foi elaborada uma rotina computacional no programa MATLAB para extração dos valores das células correspondentes à latitude e longitude da BRC. Com o objetivo de exportar dados em unidades compatíveis com as das séries observadas, a rotina incluiu também a conversão de unidade das projeções de kg/m².s para mm/d.

Salienta-se que, para possibilitar a entrada dos dados no modelo hidrológico, as médias mensais extraídas foram transformadas em séries diárias por meio do *Delta Change Method* (KIRONO *et al.*, 2011; SARR *et al.*, 2015), conforme a Equação (2). Assim, foram calculadas as médias mensais de cada estação pluviométrica e obtidas as diferenças percentuais entre as médias observadas e as médias projetadas para cada mês. Tais perturbações foram então aplicadas às séries observadas a fim de representar séries influenciadas por mudanças climáticas, ao mesmo tempo mantendo a variabilidade temporal observada.

$$P_i = P_{obs,i} \times \frac{\overline{P}_{GCM,m(i)}}{\overline{P}_{obs,m(i)}} \quad (2)$$

Onde: P_i corresponde à precipitação corrigida no dia i [mm/d]; $P_{obs,i}$ corresponde à precipitação observada no dia i [mm/d]; $\overline{P}_{GCM,m(i)}$ corresponde à precipitação média projetada pelo GCM para o mês m , referente ao dia i [mm/d]; e $\overline{P}_{obs,m(i)}$ corresponde à precipitação média observada no mês correspondente ao dia i [mm/d].

Avaliação dos cenários climáticos

Os potenciais impactos associados aos cenários estudados foram avaliados com base em três aspectos: (1) alterações nas vazões naturais afluentes aos reservatórios; (2) estimativa das energias firmes; e (3) volume de regularização requerido para garantia da energia firme estimada para cada cenário.

No que tange o primeiro critério citado, foram comparadas as vazões médias de longo período, máximas e mínimas para cada cenário. Adicionalmente, também foram

analisadas as vazões de permanência Q_{95} , ou seja, a vazão do curso d'água que é superada ou igualada 95% do tempo (CRUZ e TUCCI, 2008). A seleção da Q_{95} , especificamente, apoia-se no fato desta ser amplamente utilizada no planejamento de recursos hídricos, inclusive para a declaração de reserva de disponibilidade hídrica (DRDH), parte do processo de obtenção de outorga de direito de uso dos recursos hídricos para aproveitamentos hidrelétricos (ANA, 2009).

A fim de obter perspectivas do ponto energético, a energia firme (E_f) foi adotada como segundo parâmetro de avaliação dos cenários. Tal conceito diz respeito à energia média gerada pela usina ao longo do período crítico do sistema de referência do Sistema Interligado Nacional (MME, 2008). Devido à falta de informações específicas sobre cada UHE e da bacia em geral, a E_f foi calculada pelo o método recomendado para estudos preliminares que consta no Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas do MME (2007), descrito na Equação (3).

$$E_f = 0,0088 \times Hlm \times Qlm \quad (3)$$

Onde: E_f corresponde à energia firme do aproveitamento [MW_{med}]; Hlm corresponde à queda líquida média do aproveitamento [m]; Qlm corresponde à descarga líquida média do período crítico do aproveitamento [m^3/s]; e 0,0088 é um coeficiente que leva em conta a massa específica da água, a gravidade, e o rendimento da turbina e do gerador, permitindo expressar a energia em MW_{med} .

É importante destacar a diferença entre queda bruta, obtida pela diferença entre o nível de água máximo e mínimo, e a queda líquida média utilizada na Equação (3), a qual consiste na queda bruta menos as perdas de carga hidráulicas nos condutos. Não havendo disponibilidade dos dados de queda líquida dos aproveitamentos estudados, a queda líquida foi estimada adotando o valor de perdas hidráulicas equivalente a 3% da queda bruta (MME, 2007).

Ainda, devido à falta de dados em relação à descarga líquida média durante o período crítico proposto do Sistema Interligado Nacional (MME, 2008), adotou-se a vazão média de longo período (Q_{mlt}) nos cálculos da energia firme.

A escolha do volume de regularização necessário para garantia da energia firme como terceiro ângulo de avaliação buscou adicionar uma visão relacionada à demanda de área física para o reservatório. Para este fim, foi elaborada uma rotina no MATLAB para o cálculo dos volumes de regularização para os diferentes casos simulados. Foram consideradas “falhas” todos os momentos onde a vazão simulada afluente era menor que a Q_{mlt} . Assim, foi possível a identificação do maior período de estiagem segundo o hidrograma de cada cenário. O volume de regularização necessário referente à vazão Q_{mlt} foi então estimado de acordo com a área do maior polígono formado pela linha da Q_{mlt} e das vazões simuladas abaixo desta.

Limitações do estudo

Salienta-se que o presente estudo não leva em conta possíveis alterações em uso e ocupação do solo, além da alocação de usos da água ou quaisquer outras mudanças, adotando a precipitação como único parâmetro variável nas simulações. Neste sentido, nota-se que a configuração em cascata dos reservatórios estudados também é desconsiderada, simplificação que teve importante consequência nos resultados finais.

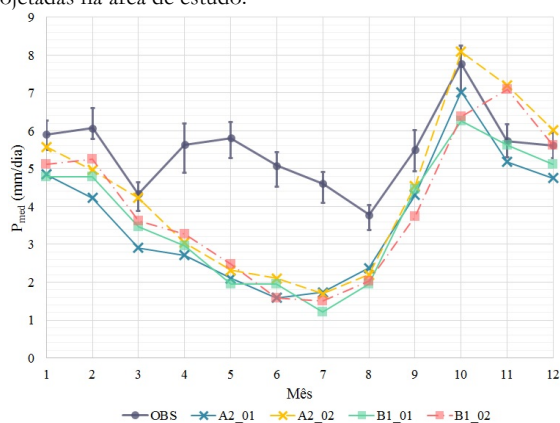
Ainda, destaca-se o fato que devido à resolução espacial do GCM HadCM3 e às dimensões da área de estudo, foram utilizados os mesmos valores de projeções de precipitação para toda a bacia. Sendo assim, atenta-se à perda da variabilidade espacial nas séries pluviométricas resultantes do processo de correção de viés previamente descrito.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Alterações no regime pluviométrico

A Figura 2 apresenta as precipitações médias mensais observadas nas estações pluviométricas da área de estudo e as médias projetadas pelo GCM UKMO-HadCM3 para os cenários A2 e B1 nos períodos de 2011-2030 e 2080-2099.

Figura 2. Médias diárias mensais de precipitação observadas e projetadas na área de estudo.



Legenda: OBS = valores médios, mínimos e máximos observados nas estações pluviométricas estudadas na área de estudo durante o período de 1988-2007; A2_01 = cenário A2 no período de 2011-2030; A2_02 = cenário A2 no período de 2080-2099; B1_01 = cenário B1 no período de 2011-2030; B1_02 = cenário B1 no período de 2080-2099.

É notável a acentuada disparidade entre as médias projetadas e as observadas entre os meses de abril e agosto. Tais alterações no regime pluviométrico da BRC indicam que os cenários de emissões de GEE estudados proporcionariam invernos consideravelmente menos chuvosos.

Ademais, percebe-se que o cenário A2_02 (período de 2080-2099) apresenta maiores precipitações médias mensais em 10 dos 12 meses do ano quando

comparado ao cenário A2_01 (período de 2011-2030). A evolução das precipitações médias mensais do cenário B1 entre os dois períodos mencionados apresenta comportamento mais complexo, não permitindo identificar uma tendência clara.

As inconsistências expostas pelos resultados obtidos ilustram as incertezas associadas ao uso de projeções de modelos climáticos globais. Dentre eles, destaca-se o fato que para os GCMs simularem vários séculos e detectarem as mudanças globais trabalham com baixas resoluções espaciais, como no caso do GCM HadCM3 (LIMA *et al.*, 2014). Dada a escala local deste estudo, verifica-se uma desarmonia entre a resolução espacial do HadCM3 e as dimensões da área de estudo. Neste sentido, vale ressaltar que as projeções dos GCM UKMO também subestimaram as precipitações observadas na avaliação de impacto de mudanças climáticas na bacia do rio Uruguai, região próxima à BRC realizada por TUCCI (1998).

Ainda, é interessante notar que o referido estudo também destaca a possibilidade de haver grandes variações entre projeções de diferentes GCMs, mesmo que sejam referentes ao mesmo cenário, para um mesmo período e no mesmo local. Logo, é possível inferir que outros GCM potencialmente apresentariam projeções mais próximas dos dados observados na BRC, tornando-se opções mais adequadas para o estudo da área em questão.

Validação do modelo hidrológico

A verificação da performance do modelo MGB-IPH na representação dos processos hidrológicos da área de estudo baseou-se no período de 1986 e 1990 e utilizou-se de valores de parâmetros calibráveis obtidos na literatura (COLLISCHONN *et al.*, 2010b; a).

Na Tabela 2 estão listadas as variações percentuais dos valores simulados em relação às vazões observadas nas estações fluviométricas analisadas, as quais encontram-se ordenadas de jusante a montante. Os dados apresentados permitem verificar reduções extremamente acentuadas nas vazões mínimas simuladas, com valores de 70% a 94% menores do que os valores observados. Ainda, destaca-se o fato de que apenas uma das cinco estações fluviométricas apresentou redução de menos de 80% da Q_{95} original.

Tabela 2. Variações percentuais dos valores simulados ($\Delta\%$) em relação às vazões médias de longo período (Q_{mlt}), mínimas (Q_{min}), máximas (Q_{max}) e de 95% de permanência (Q_{95}) das séries observadas durante o período de validação (OBS), em m^3/s .

Estação	Q_{mlt}		Q_{max}		Q_{min}		Q_{95}	
	OBS	$\Delta\%$	OBS	$\Delta\%$	OBS	$\Delta\%$	OBS	$\Delta\%$
65925000	49	-35	990	-1	0,8	-79	10,0	-86
65927000	96	-29	1356	+52	6,7	-94	16,6	-82
65955000	46	-22	615	+11	1,4	-80	3,6	-59
65960000	182	-25	2581	+17	15,3	-94	30,4	-81
65962000	204	-28	2710	+18	17,0	-94	31,8	-80

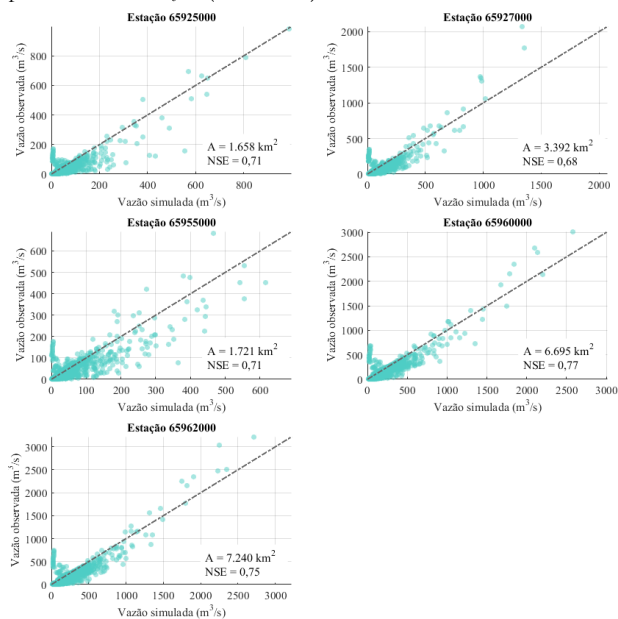
Tal variação se deve principalmente pelo fato da vazão de base ser constantemente subestimada ao longo do tempo, resultando em séries sintéticas com maior

ocorrência de vazões reduzidas. É válido mencionar que este comportamento poderia ser suavizado pelo ajuste dos parâmetros calibráveis do modelo.

Na Figura 3, podem ser observadas as nuvens de dispersão dos valores observados nas séries históricas e valores simulados pelo modelo hidrológico, além dos valores dos coeficientes de eficiência de Nash-Sutcliffe e áreas de drenagem das estações fluviométricas estudadas. Não obstante as deficiências anteriormente discutidas, constata-se que os valores de NSE variaram entre 0,68 e 0,77 nos pontos estudados, desempenho classificado como “bom” e “muito bom” por MORIASI *et al.* (2007).

Nota-se, ainda, que o modelo MGB-IPH tendeu a apresentar melhores performances nas simulações de sub-bacias com maiores áreas de drenagem, resultado também observado por ALLASIA *et al.* (2006). Todavia, dadas as especificidades dos diferentes medidores de desempenho previamente mencionadas, é importante salientar que os indicadores NS_{log} e ΔV possivelmente permitiriam identificar com mais apreço as fraquezas do modelo na reprodução dos processos hidrológicos da BRC.

Figura 3. Correlação das vazões observadas e simuladas no período de validação (1986-1990).



No que tange a análise dos hidrogramas das séries observadas e sintéticas, verificou-se que seus picos e vales eram de magnitudes desconformes, mas coincidentes no tempo. Sendo assim, a principal discrepância entre tais gráficos consistiu em um deslocamento vertical dos valores simulados em relação aos observados. Uma vez que tal deficiência não afetaria a comparação de variações percentuais entre cenários, os parâmetros calibráveis adotados foram considerados adequados para as demais simulações.

Avaliação dos cenários climáticos

A fim de facilitar a compreensão das informações expostas neste item, são utilizadas as siglas: SIM_OBS para a simulação a partir da série histórica de 1988-2007; A2_01 para a simulação referente ao cenário A2 no período 2011-2030; A2_02 para a simulação referente ao cenário A2 no período 2080-2099; B1_01 para a simulação referente ao cenário B1 no período 2011-2030; e B1_02 para a simulação referente ao cenário B1 no período 2080-2099.

Alterações nas vazões naturais afluentes

A Tabela 3 lista as vazões médias, máximas, mínimas e de 95% de permanência referentes às séries simuladas para os cenários estudados. Destaca-se que as deficiências observadas durante a etapa de validação do modelo hidrológico estão embutidas em todos os resultados apresentados, permitindo uma comparação neutra entre os diferentes cenários. Sendo assim, conclui-se que as acentuadas reduções nas vazões apresentadas em relação ao cenário SIM_OBS são majoritariamente atribuídas à variação dos dados de entrada pluviométricos.

Tabela 3. Variações percentuais das vazões médias de longo período (Q_{mlt}), máximas (Q_{max}), mínimas (Q_{min}), e de 95% de permanência (Q_{95}) das séries simuladas para os cenários climáticos A2 e B1 em relação aos valores do cenário SIM_OBS, em m^3/s .

Q _{ref}	UHE	Cenário				
		SIM_OBS	A2_01	A2_02	B1_01	B1_02
		[m^3/s]	[$\Delta\%$]	[$\Delta\%$]	[$\Delta\%$]	[$\Delta\%$]
Q _{mlt}	VGB	145,9	-74	-53	-74	-67
	SG	77,1	-74	-53	-74	-67
	CCH	50,9	-74	-53	-74	-67
	SJ	47,9	-74	-53	-74	-67
	TDD	35,3	-73	-53	-74	-68
Q _{max}	VGB	4423,5	-80	-68	-82	-72
	SG	2582,5	-73	-56	-74	-64
	CCH	1666,0	-64	-52	-69	-63
	SJ	1562,9	-66	-52	-71	-61
	TDD	1194,8	-73	-52	-72	-61
Q _{min}	VGB	0,9	-81	-72	-82	-80
	SG	0,4	-86	-78	-87	-85
	CCH	0,3	-87	-80	-88	-86
	SJ	0,3	-86	-79	-88	-86
	TDD	0,2	-88	-81	-89	-88
Q ₉₅	VGB	6,7	-84	-71	-84	-77
	SG	3,4	-80	-65	-80	-73
	CCH	2,2	-76	-63	-78	-72
	SJ	2,0	-77	-63	-79	-72
	TDD	1,5	-80	-63	-79	-72

Legenda: VGB = Volta Grande Baixa; SG = Salto Grande; CCH = Cachoeirinha; SJ = São João; TDD = Trindade.

Com base nesta dedução, é possível notar a grande sensibilidade do sistema hidrológico estudado às disparidades entre o comportamento intra-anual das projeções do modelo HadCM3 e das precipitações médias mensais observadas. Por este motivo, a análise dos resultados obtidos neste estudo focou na comparação entre

as projeções dos períodos de 2011-2030 e 2080-2099 dos cenários A2 e B1.

Salienta-se que os resultados obtidos seguem a mesma tendência de redução de vazões observada por SCHAEFFER *et al.* (2008) em estudo similar na bacia do rio Paraná. Porém, verificou-se que as reduções observadas nas vazões da BRC foram significativamente maiores. Uma possível justificativa para esta diferença consiste no fato que o estudo mencionado utilizou projeções geradas por um sistema de modelagem regional, o qual proporciona um aumento da resolução dos resultados do modelo HadCM3. Ademais, fatores como a considerável diferença entre as áreas das bacias estudadas, os cenários selecionados e os períodos de referência analisados também podem ter contribuído para as discrepâncias em questão.

Verifica-se que as mudanças percentuais em relação ao cenário SIM_OBS das vazões de referência analisadas são extremamente similares para todas as UHE de acordo com o cenário. Estes resultados se devem à perda de variabilidade espacial devido à resolução espacial do GCM utilizado, uma vez que foram utilizados os mesmos valores médios projetados para correção de viés das séries de todas as estações pluviométricas estudadas.

Os dados dispostos na Tabela 3 mostram uma tendência geral de ambos os cenários A2 e B1 apresentarem aumentos de vazão entre os períodos de 2011-2030 e 2080-2099, com variações mais modestas no caso das vazões mínimas (Q_{\min}). Entretanto, percebe-se que o cenário A2 disfruta de acréscimos consideravelmente maiores que o cenário B1 entre os períodos em questão. Tal asserção pode ser exemplificada por incrementos na faixa de 57% a 87% e 28% a 40% nas Q_{95} dos cenários A2 e B1, respectivamente. A UHE Cachoeirinha destaca-se como o aproveitamento que demonstra as menores alterações percentuais ao longo do tempo, enquanto as UHE Volta Grande Baixa e Salto Grande, situadas à montante, são as que sofrem as maiores variações percentuais nos cenários estudados.

Não obstante, dada a disposição em cascata dos reservatórios estudados, é imperativo ressaltar que caso fosse considerado o efeito da retirada d'água dos aproveitamentos a montante, esperar-se-ia impactos maiores nas UHEs situadas mais à jusante do rio Chopim. Logo, atenta-se ao fato que tal limitação torna os resultados apresentados inadequados para tomada de decisões relacionadas ao planejamento dos recursos hídricos da bacia realisticamente.

Estimativa das energias firmes

A

Tabela 4 apresenta os resultados referentes às estimativas de energia firme (E_f) de cada UHE, calculados para os diferentes cenários.

Tabela 4. Variação percentual das energias firmes calculadas para os cenários A2 e B1 em relação ao valor referente ao cenário SIM_OBS, em hm³, em MW_{med}.

UHE	Cenário				
	SIM_OBS	A2_01	A2_02	B1_01	B1_02
	[MW _{med}]	[Δ%]	[Δ%]	[Δ%]	[Δ%]
VGB	36,76	-77	-58	-77	-70
SG	27,86	-78	-59	-78	-71
CCH	27,81	-78	-60	-78	-71
SJ	36,44	-78	-60	-78	-71
TDD	11,16	-79	-61	-79	-72

Nota-se que para o período de 2011-2030, os cenários A2 e B1 apresentam praticamente a mesma variação percentual em relação a energia firme calculada para o período de 1988-2007. A análise dos valores referentes ao período de 2080-2099 mostra uma tendência de recuperação, com aumento da energia firme calculada para todas as UHE estudadas em ambos os cenários. Ainda, constata-se que o cenário A2 proporcionaria valores de energia firme de 83% a 86% maiores do que o período precedente (A2_01). Tais resultados são significativamente mais expressivos do que os aumentos proporcionados entre os mesmos dois períodos do cenário B1, os quais giram em torno de 30%.

A partir do estudo de viabilidade da UHE Volta Grande Baixa da ANEEL (ANEEL, 2003), sabe-se que o valor de energia firme real deste aproveitamento era estimado em 30,59 MW_{med}, utilizando uma vazão crítica equivalente a 155,60 m³/s. Tendo em vista que o resultado obtido apresenta um aumento de cerca de 20% da energia firme real utilizando uma vazão crítica (Q_{mt}) de 6% menor do que a citada no documento mencionado, as aproximações adotadas com relação à estimativa da queda líquida e vazão crítica utilizadas nos cálculos das energias firmes foram consideradas aceitáveis.

Volumes de regularização

A Tabela 5 apresenta os volumes de regularização dos reservatórios a fim de garantir as energias firmes calculadas para cada cenário.

Tabela 5. Variação percentual dos volumes de regularização para garantia das energias firmes calculadas para os cenários A2 e B1 em relação ao volume referente ao cenário SIM_OBS, em hm³.

UHE	Cenário				
	SIM_OBS	A2_01	A2_02	B1_01	B1_02
	[hm ³]	[Δ%]	[Δ%]	[Δ%]	[Δ%]
VGB	4974,8	-41	-27	-60	-55
SG	2664,2	-64	-1	-62	-67
CCH	1737,5	-65	-49	-64	-68
SJ	1633,8	-65	-48	-64	-68
TDD	1208,8	-66	-32	-63	-73

Analisados isoladamente, os volumes de regularização obtidos seguem a mesma tendência geral dos resultados previamente expostos, porém não oferecem conclusões relevantes. Logo, nota-se ser essencial a consideração de outros aspectos, como a energia firme e a duração de períodos críticos para uma interpretação qualitativa significativa dos dados apresentados.

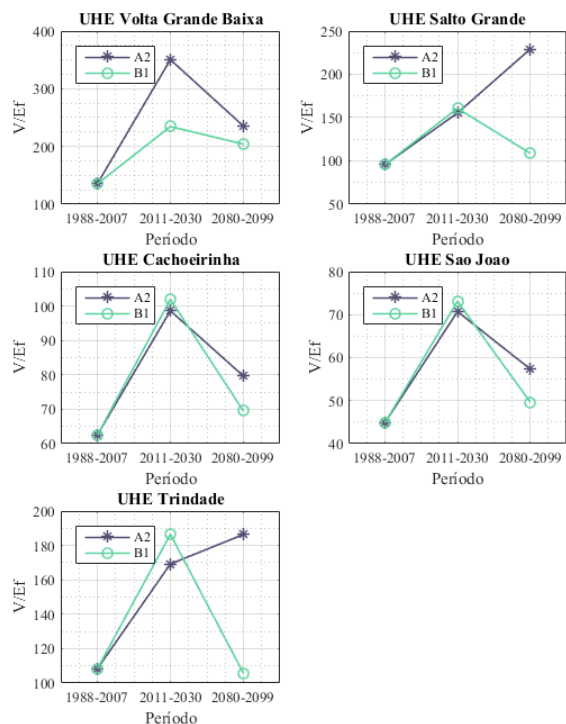
Tal asserção é corroborada de maneira mais clara pelos resultados referentes à UHE Salto Grande no cenário A2_02, o qual corresponde a uma redução de apenas 1% do volume inicial e garantiria uma energia firme 59% menor. Isto se deve à uma acentuada mudança na duração do período crítico dos cenários A2_01 e A2_02, a qual passa de 33 meses para 49 meses.

Tabela 6. Duração dos períodos críticos para as UHE estudadas, em meses.

UHE	Cenário				
	SIM_OBS	A2_01	A2_02	B1_01	B1_02
VGB	19	50	35	30	28
SG	20	33	49	35	20
CCH	20	30	26	30	20
SJ	20	30	26	30	20
TDD	19	30	35	35	19

Sendo assim, a fim de incluir os fatores mencionados na análise dos volumes calculados, a Tabela 6 traz a listagem da duração dos períodos críticos de estiagem para cada cenário e UHE estudados e suas respectivas relações volume/energia (V/E_f), índice que representa o volume necessário em hm^3 para a garantia 1 MW_{med} de energia.

Figura 4. Evolução da relação V/E_f para cada um dos períodos simulados.



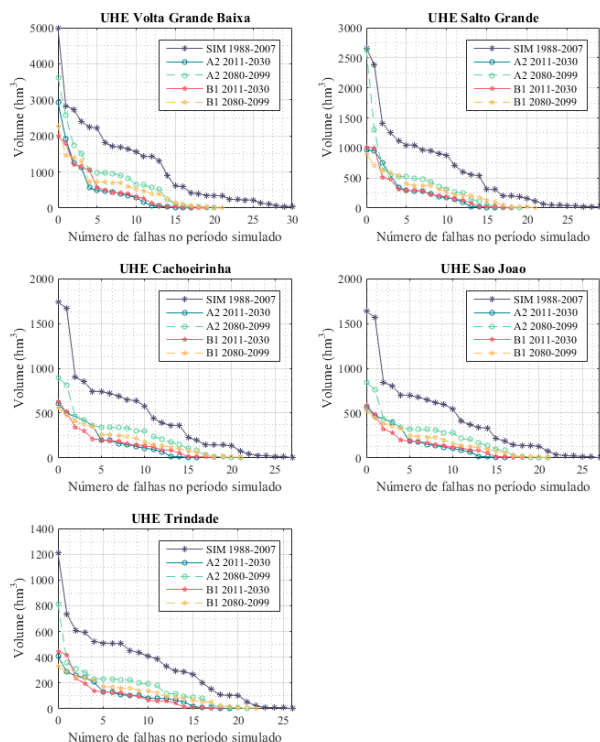
Os resultados obtidos indicam que, neste contexto, o cenário B1 é o que proporcionaria impactos mais desejáveis em comparação ao cenário A2, devido às menores relações V/E_f e variações nas durações dos períodos de estiagem. Salienta-se principalmente a diferença nos períodos de estiagem no estudo hidrológico da UHE Volta Grande Baixa, onde o cenário A2_01 apresenta duração de 50 meses, comparados aos 30 meses do cenário B1_01. Ainda, é possível observar que para todas as UHE, o cenário A2_02 acarretaria em maiores relações de V/E_f do que o cenário B1_02 (sendo assim, a fim de incluir os fatores mencionados na análise dos volumes calculados, a Tabela 6 traz a listagem da duração dos períodos críticos de estiagem para cada cenário e UHE estudados e suas respectivas relações volume/energia (V/E_f), índice que representa o volume necessário em hm^3 para a garantia 1 MW_{med} de energia.

Figura 4).

Nota-se que indicadores como a relação V/E_f podem ser de grande valia para tomada de decisões relacionadas ao planejamento da bacia. A utilização destes dados como insumo auxiliaria, por exemplo, a avaliação do benefício construir ou manter uma UHE de certo volume levando em conta não só a demanda de energia, mas também a disponibilidade de área na região.

Neste sentido, decisões deste cunho também seriam melhor amparadas pela elaboração de materiais como os gráficos apresentados na Figura 5, os quais relacionam o volume do reservatório adotado para garantia da energia firme com o número de falhas que o mesmo apresentaria em um período de 20 anos.

Figura 5. Relação do volume de regularização adotado com o número de falhas que ocorreriam no período simulado.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresentado propôs-se a investigar os possíveis impactos de mudanças climáticas nos volumes de cinco UHE localizadas na bacia do rio Chopim, inserida na bacia do rio Iguaçu, região Sul brasileira. Tal objetivo foi alcançado através: (1) da análise de alterações no regime pluviométrico da bacia projetado pelo GCM HadCM3 para os cenários A2 e B1 de emissões de GEEs; (2) da reprodução dos processos hidrológicos da bacia por meio do modelo hidrológico MGB-IPH; (3) da estimativa de vazões esperadas para as precipitações projetadas para os cenários analisados.

Dentre as principais conclusões derivadas do estudo realizado, deve-se citar a identificação de grandes disparidades entre as precipitações observadas e as projeções geradas pelo GCM HadCM3. Destaca-se principalmente o período entre os meses de abril a agosto, onde as projeções do GCM apresentaram valores até 74% menores do que os observados.

Com relação a validação do modelo hidrológico, observou-se que foi possível reproduzir de maneira satisfatória os processos hidrológicos da BRC pelo modelo MGB-IPH, apresentando valores de NSE entre 0,68 e 0,77. A partir da análise dos resultados obtidos, constatou-se que as principais deficiências das simulações realizadas foram: (1) tendência do modelo hidrológico subestimar a vazão de base da bacia constantemente; e (2) deslocamento vertical do hidrograma simulado em relação ao observado.

A avaliação dos resultados associados às simulações dos cenários climáticos fundamentou-se em três

aspectos: (1) alterações nas vazões naturais afluentes aos reservatórios; (2) estimativa das energias firmes; e (3) volume de regularização necessário para garantia da energia firme de cada cenário. Os critérios adotados permitiram ilustrar a complexidade associada à dinâmica do sistema hidroclimático global e emissões de gases de efeito estufa. Tal asserção baseia-se no fato de cada critério oferecer perspectivas diferentes acerca do problema analisado, não sendo possível apontar claras tendências quando analisados em conjunto.

Foram verificadas drásticas reduções nas vazões e valores de energia firme nas simulações referentes às projeções dos cenários A2 e B1 no período de 2011-2030 comparadas ao cenário SIM_OBS (período de 1988-2007 simulado), apesar do pequeno intervalo entre os períodos analisados. Adicionalmente, notou-se que o período de 2080-2099 proporcionou resultados mais desejáveis do que o período de 2011-2030 para ambos os cenários em geral.

Sendo a precipitação a única entrada variável nas diferentes simulações, notou-se a extrema sensibilidade do sistema à incongruência entre as projeções do GCM HadCM3 e os dados históricos. Portanto, infere-se que a utilização das projeções geradas pelo referido GCM para a estimativa das vazões dos cenários climáticos não seria a metodologia mais adequada para a área de estudo.

Apesar dos cenários A2 e B1 serem considerados “pessimista” e “otimista” do ponto de vista do aumento da temperatura terrestre, tais classificações não apresentaram correlações diretas com os resultados deste trabalho. Como exemplo, pode-se citar que o cenário A2 proporcionou valores de Q_{95} e energia firme mais próximos dos valores iniciais (SIM_OBS) a longo prazo (2080-2099), resultados mais desejáveis do que os do cenário B1.

No entanto, a análise dos períodos críticos associados à estimativa dos volumes de regularização necessários revelou um aspecto interessante da avaliação do impacto das mudanças climáticas para o planejamento dos recursos hídricos da bacia estudada. Verificou-se que, de maneira geral, o cenário A2 possui uma tendência a apresentar períodos de estiagem de maior duração do que o cenário B1. Tal resultado vai de acordo com a teoria de que maiores aumentos na temperatura global acarretariam em maiores probabilidades de eventos extremos, como estiagens e enchentes.

Face às investigações realizadas, a relação V/E_f destacou-se como fator de extrema importância no planejamento dos recursos hídricos e urbano da região, uma vez que traz consigo a subjetividade de avaliar se a utilização de uma maior área superficial vale a produção de uma dada quantidade de energia. As relações V/E_f calculadas apresentaram resultados inconclusivos, não sendo possível identificar uma tendência predominante relacionada a qual cenário permitiria garantir 1 MW_{med} de energia com o menor volume possível, ao mesmo tempo suprimindo uma demanda de energia mais próxima da demanda original.

Recomendações

Os resultados obtidos dentro do escopo deste estudo permitiram identificar novos caminhos a serem investigados para uma melhor compreensão do tema abordado. Levando em conta às incertezas pertinentes ao uso de GCMs, sugere-se o levantamento de projeções de precipitação de outros modelos climáticos globais. A comparação destes dados, por sua vez, permitiria verificar qual dos GCMs seria mais adequado para a BRC. Não obstante, deve-se frisar que a realização de um estudo similar a este utilizando projeções de modelos climáticos regionais é fortemente recomendada.

Adicionalmente, sendo possível a obtenção de mais dados referentes UHEs da bacia do rio Chopim, considera-se interessante a exploração de outros aspectos relacionados a estes empreendimentos. Alguns exemplos incluem a estimativa da própria geração de energia ou a estimativa perdas por evaporação. A partir destes estudos, seria válido também integrar projeções de população e demanda energética, visando incluir o componente humano na avaliação dos impactos de mudanças climáticas na região.

Propõe-se também a avaliação de desempenho da simulação de vazões pelos índices NSlog e ΔV , além da incorporação de informações como alterações no uso do solo ou projeções de outras variáveis climáticas neste trabalho. A ponderação de outros parâmetros ofereceria uma ideia da sensibilidade do sistema a cada um deles, proporcionando um melhor entendimento do comportamento hidrológico da bacia. Finalmente, julga-se que um estudo mais aprofundado, considerando as retiradas de aproveitamentos à montante, elucidaria de forma menos abstrata os possíveis impactos de mudanças climáticas nos empreendimentos hidrelétricos da BRC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAM, K. N.; FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W. Mudanças climáticas e vazões extremas na Bacia do Rio Paraná. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 999-1007, 2015.

ALLASIA, D. G.; SILVA, B. C. D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Large basin simulation experience in South America. Seventh IAHS Scientific Assembly, 2006, Foz do Iguaçu, Brazil. IAHS Publ.

ANA. **Manual de Estudos de Disponibilidade Hídrica para Aproveitamentos Hidrelétricos**. Brasília, DF: Agência Nacional de Águas: 45 p. 2009.

_____. HidroWeb. 2015. Disponível em: < <http://hidroweb.ana.gov.br/> >. Acesso em: setembro de 2015.

ANEEL. **UHE Volta Grande Baixa - Estudo de Viabilidade**. 2003

_____. Banco de Informações de Geração. 2015a. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm> >. Acesso em: novembro de 2015.

_____. SIGEL - Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico. 2015b. Disponível em: < <http://sigel.aneel.gov.br/sigel.html> >. Acesso em: agosto de 2015.

ARCHER, D.; RAHMSTORF, S. **The Climate Crisis: An Introductory Guide to Climate Change**. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2009.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C. D.; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, p. 878-895, 2007.

COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C. D. D.; FAN, F. M.; KAYSER, R. **Manual de Definição de Unidades de Resposta Hidrológica (Blocos) do Modelo MGB-IPH**. Porto Alegre, RS: UFRGS 2010a.

_____. **Manual de Exemplos do Modelo MGB-IPH: Rio das Almas**. Porto Alegre, RS: UFRGS 2010b.

CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 1, p. 111-124, 2008.

DESSLER, A. **Introduction do Modern Climate Change**. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

EGGLETON, T. **A Short Introduction to Climate Change**. New York and Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 246.

EMBRAPA. **Mapa de Solos do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE 2001.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, p. 243-254, 2014.

GUILHON, L. G. F.; ROCHA, V. F.; MOREIRA, J. C. Comparação de Métodos de Previsão de Vazões Naturais Afluentes a Aproveitamentos Hidroelétricos. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, p. 13-20, 2007.

IBGE. Mapas temáticos. 2015. Disponível em: < ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/vegetacao/ >. Acesso em: setembro de 2015.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Geneva, Switzerland, p.151. 2015a

_____. Data Distribution Centre. 2015b. Disponível em: < <http://www.ipcc-data.org/ar4/model-UKMO-HADCM3.html> >. Acesso em: dezembro de 2015.

IPH. MGB-IPH. 2015. Disponível em: < <https://www.ufrgs.br/hge/mgb-iph/> >. Acesso em: agosto de 2015.

KARAMOUZ, M.; NAZIF, S.; FALAHI, M. **Hydrology and Hydroclimatology: Principles and Applications**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2012.

KIRONO, D. G. C.; HENNESSY, K.; MPELASOKA, F.; KENT, D. **Approaches for generating climate change scenarios for use in drought projections – a review**. CSIRO. Australia. 2011

LIMA, C. H. R.; LALL, U. Climate informed long term seasonal forecasts of hydroenergy inflow for the Brazilian hydropower system. **Journal of Hydrology**, v. 381, p. 65-75, 2010.

LIMA, J. W. M.; COLLISCHONN, W.; MARENGO, J. A. **Efeitos das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Elétrica**. São Paulo: AES Tietê, 2014. 360.

MADANI, K.; GUÉGAN, M.; UVO, C. B. Climate change impacts on high-elevation hydroelectricity in California. **Journal of Hydrology**, v. 510, p. 153-163, 2014.

MIRANDA, E. E. D., ., Brasil em Relevo. Campinas, 2005. Disponível em: < <http://www.relevobr.cnpn.embrapa.br> >. Acesso em: agosto de 2015.

MME. **Manual de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas**. Ministério de Minas e Energia - MME. Brasília. 2007

_____. **Considerações Sobre a Repotenciação e Modernização de Usinas Hidrelétricas**. Rio de Janeiro. 2008 Disponível em: < http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20081201_1.pdf >.

MOHOR, G. S.; RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J.; JÚNIOR, J. L. S. Exploratory analyses for the assessment of climate change impacts on the energy production in an Amazon run-of-river hydropower plant. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p. 41-59, 2015.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of

Accuracy in Watershed Simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007. ISSN 0001-2351.

REIS, D. A. D.; SILVA, L. F. Análise de dissertações e teses brasileiras de Educação Ambiental: compreensões elaboradas sobre o tema "mudanças climáticas". **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 22, p. 145-162, 2016. ISSN 1516-7313. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-73132016000100145&nrm=iso >.

SANTANA, T. B.; SILVA, B. C. D.; SANTOS, A. H. M. **Estimativa de impactos de mudanças climáticas nas vazões do rio São Francisco**. **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Maceió, AL: ABRH 2011.

SARR, M. A.; SEIDOU, O.; TRAMBLAY, Y.; EL ADLOUNI, S. Comparison of downscaling methods for mean and extreme precipitation in Senegal. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, Part B, p. 369-385, 9// 2015. ISSN 2214-5818. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581815000646> >.

SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S.; LUCENA, A. F. P. D.; SOUZA, R. R. D.; BORBA, B. S. M. C.; COSTA, I. V. L. D.; JÚNIOR, A. O. P.; CUNHA, S. H. F. D. **Mudanças Climáticas e Segurança Energética no Brasil**. Rio de Janeiro. 2008

SILVA, B. C. D. **Previsão hidroclimática de vazão para a bacia do rio São Francisco**. 2005. Tese (Doutorado). Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 1 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1998.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; COLLISCHONN, W.; DA SILVA DIAS, P. L.; DE OLIVEIRA, G. S. Long-term flow forecasts based on climate and hydrologic modeling: Uruguay River basin. **Water Resources Research**, v. 39, n. 7, p. n/a-n/a, 2003. ISSN 1944-7973. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1029/2003WR002074> <http://onlinelibrary.wiley.com/store/10.1029/2003WR002074/asset/wrcr9655.pdf?v=1&t=ipnznoae&s=de2b9611a823a2df88cecafe5149e3d969de85> >.

WOLFSON, R. **Energy, environment, and climate**. 1 ed. New York: W. W. Norton & Company, Inc, 2008. 531.

Exploratory Analysis of Climate Change Impacts in Hydroelectric Reservoirs

ABSTRACT

This study investigated potential climate change impacts on the volume of five hydroelectric reservoirs located in the Chopim river basin, in Paraná, Brazil. Rainfall projections generated by the HadCM3 global climate model (GCM) were used as input to the MGB-IPH distributed hydrologic model in order to simulate the streamflow for climate change scenarios A2 and B1, proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Results showed significant dissimilarities in the intra-annual variabilities of observed and projected rainfall data, with average monthly projections as much as 74% lower than the observed average for the month of July. This incongruity substantially affected simulated streamflow for all scenarios analyzed, causing minimum river flows in reservoir locations to suffer an 80% decrease, approximately. Scenario A2 presented longer drought periods than scenario B1, supporting the theory that increasing temperatures would likely prompt more frequent and intense extreme events. Notwithstanding, scenario A2 also showed greater values of firm capacity, suggesting that it would be able to meet higher energy demands than scenario B1 even during its droughts. Furthermore, scenario B1 displayed a tenuous tendency to require smaller reservoir storage volumes to supply 1 MW_a of energy in comparison to scenario A2.

Keywords: *Climate projections; Hydropower; Hydrologic modeling.*