



**XXIV SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GIA/14

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

**GRUPO XI**

**GRUPO DE ESTUDO DE IMPACTOS AMBIENTAIS - GIA**

**EFEITO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS VAZÕES AFLUENTES DE USINAS HIDRELÉTRICAS COM BASE EM PROJEÇÕES DO IPCC AR5: ESTUDO DE CASO DO ALTO RIO SÃO FRANCISCO**

**Rebeca Meloni Virgílio (\*)  
UNIFEI**

**Benedito Cláudio da Silva  
UNIFEI**

**Luiz Augusto Horta Nogueira  
UNIFEI**

**RESUMO**

Este estudo tem como objetivo a verificação dos efeitos das mudanças climáticas nas vazões afluentes a usina hidrelétrica de Três Marias, localizada na região fisiográfica do Alto Rio São Francisco, baseando-se nas projeções climáticas do modelo atmosférico regional Eta, alimentado pelos modelos globais HadGEM2-ES e MIROC5 (AR5-IPCC), para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. As precipitações resultantes dos modelos climáticos foram utilizadas para alimentar o modelo hidrológico MGB-IPH que realizou projeções para o período 2011-2100. Os resultados evidenciam a tendência de redução das vazões Q95 e Q50, que são de extrema importância para a geração de hidroeletricidade.

**PALAVRAS-CHAVE**

Modelagem Hidroclimática, Mudanças Climáticas, Projeções de Vazões, Hidroeletricidade, MGB-IPH

**1.0 - INTRODUÇÃO**

As condições hidrológicas em diferentes escalas de tempo e espaço são de extrema importância na tomada de decisões de áreas dependentes dos recursos hídricos, como irrigação, abastecimento de água, navegação, sistemas de alerta contra cheias, piscicultura, dessedentação de animais, geração de energia, entre outras (28, 31). Um dos fatores que pode influenciar no ciclo hidrológico são as condições do clima. As mudanças climáticas podem ser responsáveis pela alteração dos padrões de precipitação, devido principalmente ao aumento da temperatura média, que poderá causar alterações nos padrões de pressão atmosférica, ventos e evaporação (17, 21, 28). Os principais aspectos dos recursos hídricos susceptíveis as mudanças climáticas são a umidade do solo, a reserva subterrânea, a evaporação, a evapotranspiração e a geração de escoamento superficial (27, 32).

Com relação a geração de energia elétrica no Brasil, é de conhecimento geral que ela é realizada principalmente através de usinas hidrelétricas, que dependem diretamente da disponibilidade de recursos hídricos. De acordo com a EPE (13), em 2015, o crescimento da capacidade instalada do Brasil deveu-se principalmente as fontes eólica e solar, que apresentaram um crescimento em relação a 2014 de 56,2% e 42,3%, respectivamente. Com relação a energia hidroelétrica ainda ocorreu crescimento (2,8%), porém, muito baixo quando comparado aos demais, o que mostra que a tendência é a diversificação da matriz elétrica do país. Porém, mesmo tendo apresentando recentemente uma queda em sua participação na matriz elétrica brasileira (queda de 3,7% em 2015 com relação ao ano anterior), a hidroeletricidade ainda é responsável pela maior parte da eletricidade do país, cerca de 64% (13). Sendo assim, o sistema elétrico está vulnerável a variação da sua capacidade de atender a demanda devido principalmente à diminuição do volume de precipitação e ao aumento da frequência e intensidade de eventos extremos, como as secas plurianuais, em suas bacias (15).

O investimento na melhoria de modelos climáticos e hidrológicos pode auxiliar de maneira significativa na projeção de futuros cenários de clima que poderão ser utilizados no planejamento da geração, transmissão e

(\*) Av. BPS, Bairro Pinheirinho, n° 1303, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Centro de Excelência e Eficiência Energética (EXCEN) – CEP 37.500-903, Caixa Postal 50, Itajubá, MG – Brasil  
Telefax: (+55 35) 3629-1411 – Email: rebecameloni@gmail.com

comercialização de energia elétrica, sendo a confiabilidade do sistema reflexo da qualidade das projeções (1). Diversos autores reconhecem que esses modelos ainda não representam fielmente as variações do tempo e clima, principalmente quando se tratam das previsões de precipitação, no entanto, deixam claro a importância de incluí-los em processos de tomadas de decisões (15, 17, 21, 25, 29, 30, 33).

## 2.0 - PROJEÇÃO CLIMÁTICA

Segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC (19), as mudanças climáticas são alterações no clima, na média e/ou na variabilidade de suas propriedades, que persistem por um tempo prolongado (décadas ou mais), sendo que essas alterações podem ser causadas por processos naturais internos ou forças externas antropogênicas ou não. Com relação as ações antrópicas, Lucena (22) destaca o aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE) como o principal responsável pelas mudanças climáticas globais.

Os relatórios do IPCC vêm confirmando as projeções de aumento da temperatura média da atmosfera, o aumento do nível do mar e a redução da cobertura de gelo (32), e apresentam possíveis previsões das mudanças climáticas futuras a partir da definição de cenários que representam os possíveis níveis de emissões dos GEE (27). O Quinto Relatório de Avaliação do IPCC – AR5 apresenta novos cenários conhecidos como *Representative Concentration Pathways* – RCPs, que são baseados na forçante radiativa antropogênica total (quantificação da perturbação da energia do sistema terrestre (19)) a ser atingida durante o século XXI (10).

Segundo Chou et al. (9), Lima, Collischonn e Marengo (21) e Martini (23) os modelos climáticos são as melhores ferramentas para a previsão de tempo e clima em diversas escalas temporais, sendo responsáveis pela representação de complexos sistemas e suas interações, envolvendo a atmosfera, os oceanos, a criosfera, a vegetação, os ciclos biogeoquímicos e etc. Quando o interesse está em características e dinâmicas locais e regionais, como é o caso da análise de bacias hidrográficas, o ideal é a utilização de modelos climáticos regionais (21, 22), obtidos a partir de técnicas de *downscaling* para a redução de escala do modelo global de interesse (9, 28, 31).

## 3.0 - PROJEÇÃO DE VAZÕES

Segundo Rennó e Soares (26) e Filho, *et al.* (16), os modelos hidrológicos são encarregados da reprodução dos fenômenos hídricos dentro de uma escala de tempo definida, podendo ser utilizados na antecipação de ações, quando se trata da previsão ou projeção de variáveis. No entanto, é importante ressaltar que os modelos são responsáveis pela representação simplificada da realidade, através de relações e equações, e esta sempre irá envolver importantes simplificações e aproximações (4). Beven (4) destaca como principal objetivo da modelagem hidrológica o aprimoramento das tomadas de decisões relacionadas aos problemas hídricos, que são afetados significativamente pelo aumento da demanda de água e a flutuação dos padrões climáticos a cada ano.

A incorporação de modelos climáticos com modelos hidrológicos permite a previsão de vazões para um período de tempo maior do que o tempo de concentração da bacia, que seria o limite para previsões de vazões baseadas nas vazões a montante de uma bacia hidrológica específica e também melhora a qualidade das previsões. Nessa integração, o modelo climático é responsável pela determinação da precipitação e outras variáveis climáticas futuras e o modelo hidrológico pela definição das vazões a partir dos resultados do modelo climático (31). Segundo Fan, Ramos e Collischonn (14), a previsão hidroclimática possui diversas incertezas que se propagam pelo sistema, devendo ser quantificadas e analisadas. Elas estão associadas principalmente com os dados hidrológicos e meteorológicos disponíveis em tempo real, com o equacionamento do modelo hidrológico, com a calibração do modelo hidrológico, com as condições iniciais no momento da previsão e com as informações de previsões meteorológicas utilizadas.

A determinação e avaliação dos impactos das mudanças climáticas na geração de hidroeletricidade pode utilizar os modelos hidroclimáticos como uma de suas principais ferramentas, desde que a análise dos resultados seja feita de maneira cautelosa, devido aos erros existentes em qualquer processo de modelagem. Projeções de possíveis cenários de vazões e consequentemente de possíveis montantes de energia elétrica a serem gerados pelas hidrelétricas, são de extrema importância para o planejamento da geração, transmissão e comercialização da energia elétrica no Brasil, que possui uma matriz altamente dependente da geração hídrica. Sendo assim, as tomadas de decisões relacionadas as adaptações necessárias devido as possíveis mudanças climáticas, como a diversificação da matriz elétrica, o aumento da eficiência energética e até mesmo o aumento da produtividade na geração, podem ser auxiliadas pela projeção de variáveis a partir do processo de modelagem hidroclimática.

## 4.0 - METODOLOGIA

### 4.1 Área de Estudo

A bacia hidrográfica de interesse possui exutório no posto fluviométrico Bom Jesus da Lapa (45480000) da Agência Nacional de Águas (ANA), localizado no Rio São Francisco no município de Bom Jesus da Lapa, estado da Bahia.

A bacia estudada está quase em sua totalidade no interior do estado de Minas Gerais e apresenta uma área de 270.518 km<sup>2</sup>. Ela engloba toda a região do Alto São Francisco e cerca de metade do Médio São Francisco (Figura 1). O Alto São Francisco contém aproximadamente 50% da população de toda a bacia hidrográfica do rio São Francisco (6). A região semiárida, presente em mais da metade da região hidrográfica estudada, predomina na região nordeste do país, incluindo ainda um trecho importante do norte de Minas Gerais. As principais vegetações existentes na região de estudo são o cerrado, a caatinga, fragmentos de floresta Atlântica e pequenas matas de serra (24). Segundo o Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco – PRH-SF (6), os principais usos do solo na bacia são representados pelos estabelecimentos agropecuários e pela pastagem.

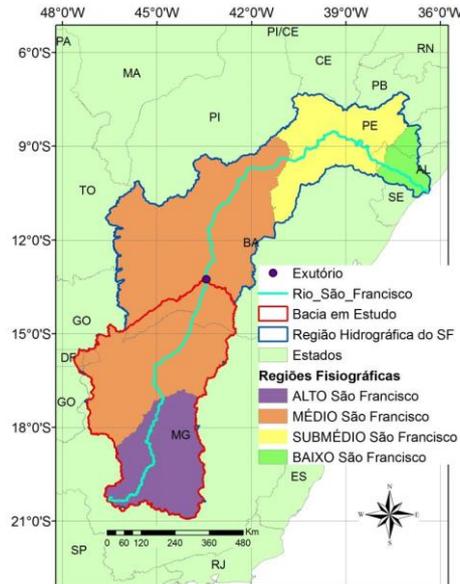


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica em estudo.

Segundo MMA (24) o consumo de água no Alto São Francisco é devido principalmente à indústria e o abastecimento urbano, já no Médio São Francisco é a irrigação que apresenta uso predominante. No entanto o CBHSF (7) chama atenção para o aumento significativo da demanda de água para irrigação, principalmente no Médio São Francisco, mas também no alto, ultrapassando a vazão retirada para o abastecimento e a indústria. A bacia em estudo apresenta, assim como toda bacia hidrográfica, conflitos entre os diversos usuários dos recursos hídricos, porém destacam-se os conflitos entre irrigação e a geração de energia e os demais usos, como turismo, lazer, esporte, abastecimento, navegação, pesca, etc. (6).

No que se trata da geração de energia a partir de usinas hidrelétricas, segundo o Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico da Aneel – SIGEL, atualmente existem 52 usinas hidrelétricas na bacia em estudo, sendo 5 usinas hidrelétricas de energia (UHE), 20 pequenas centrais hidrelétricas (PCH) e 27 centrais geradoras hidrelétricas (CGH) (Figura 2) (3). No entanto, este artigo irá analisar apenas a UHE Três Marias, sendo as demais abordadas em trabalhos futuros.

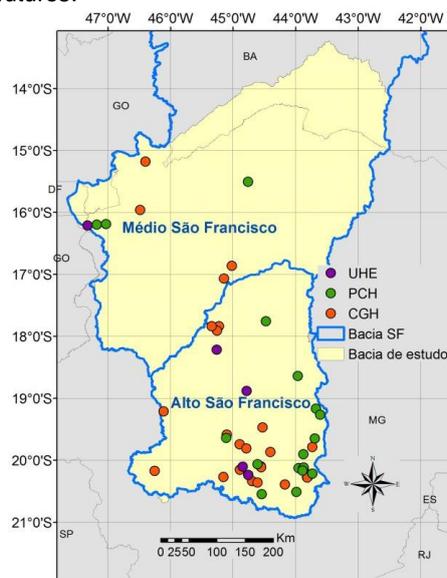


Figura 2 – Localização das usinas hidrelétricas da bacia em estudo por tipo de usina.

## 4.2 Modelos Utilizados

ETA: é um modelo numérico atmosférico regional que simula os processos internos da atmosfera e suas interações com a atmosfera, biosfera, criosfera, hidrosfera e litosfera que possam causar alguma mudança no tempo e no clima (21). Na versão utilizada apresenta resolução horizontal de 20 km e 38 camadas verticais e cobre maior parte da América do Sul e América Central (9). Possui esse nome, pois utiliza a coordenada  $\eta$  (Eta), adequada para áreas com topografia íngreme, como a Cordilheira dos Andes na América do Sul (9, 10). A versão utilizada é alimentada por três modelos globais oceano-atmosfera do IPCC-AR5: BESM (Brazilian Earth System Model), HadGEM2-ES (Hadley Centre Global Environmental Model) e MIROC5 (Model for Interdisciplinary Research on Climate) (9).

MGB-IPH (Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul): é um modelo semi conceitual distribuído que tem como objetivo principal a simulação do processo de transformação da chuva em vazão em grandes bacias, geralmente maiores do que 10 mil km<sup>2</sup> (12). O modelo foi desenvolvido por Collischonn (11) e baseado na estrutura do modelo LARSIM (5), com algumas adaptações do modelo VIC-2L (20) (31). A estrutura do modelo MGB é composta pelos seguintes módulos: balanço de água no solo, evapotranspiração, escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo na célula e escoamento na rede de drenagem (12, 31, 34). Maiores detalhes a respeito do modelo podem ser encontrados em Collischonn (11).

## 4.3 Metodologia

Primeiramente foi realizada a etapa de discretização da bacia hidrográfica de interesse. A partir do software ArcGIS foram preparados os dados e informações físicas da bacia que são necessários para a modelagem hidrológica a partir do MGB-IPH. Os arquivos elaborados foram: o modelo digital de elevação (MDE), as direções de escoamento, a rede de drenagem, as minibacias (bacias por trechos de rio), as sub-bacias e as unidades de resposta hidrológica (URHs). A discretização em sub-bacias foi baseada em 16 postos fluviométricos pertencentes ao sistema de informações hidrológicas HidroWeb da ANA, que representam os principais afluentes do Rio São Francisco a montante do posto fluviométrico de Bom Jesus da Lapa (Figura 3). Já a discretização em minibacias, que é a delimitação da bacia de cada trecho de rio, resultou em 3293 células. Na discretização, além das informações sobre os postos fluviométricos obtidos do HidroWeb (2), foram necessários dados de uso e tipo de solo (31) e de topografia (8).

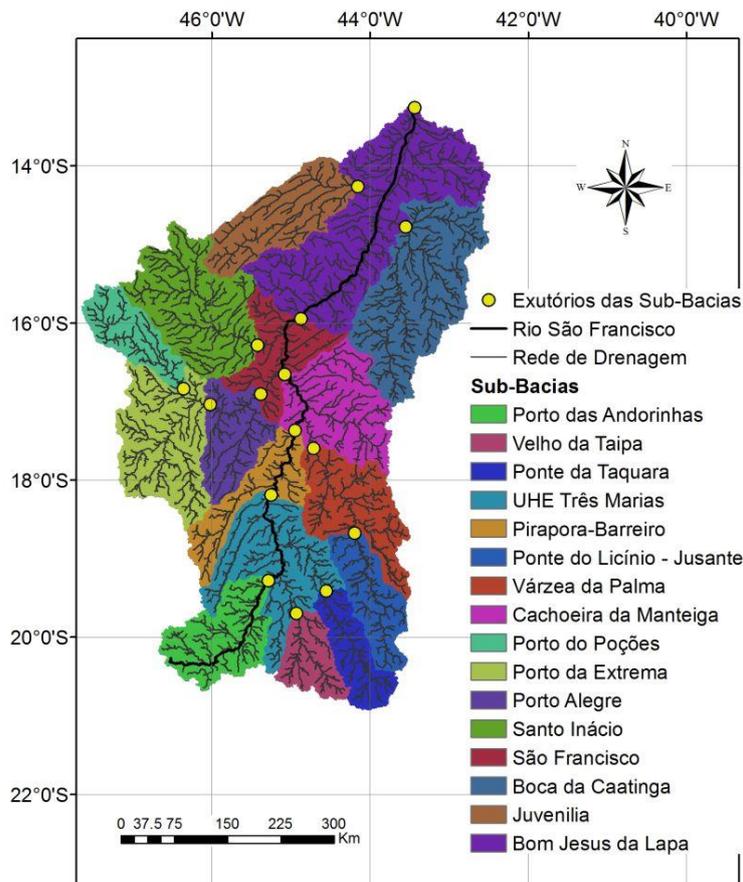


Figura 3 – Discretização em sub-bacias e rede de drenagem da Bacia do Rio São Francisco a montante do posto fluviométrico Bom Jesus da Lapa.

Após a discretização, foram levantados os dados hidrológicos (precipitação e vazão diárias) e meteorológicos (temperatura, velocidade do vento, umidade relativa, insolação ou radiação solar e pressão atmosférica) de estações no interior e nas proximidades da bacia hidrográfica. Ao todo foram obtidas informações de 16 estações fluviométricas (2), 436 estações pluviométricas (2) e 48 estações meteorológicas (18). Também foi necessário o levantamento dos parâmetros de entrada do programa, fixos e calibráveis. Os parâmetros fixos foram baseados nos trabalhos de Silva (31) e Collischonn (11), já os parâmetros calibráveis iniciais foram baseados em Silva (31).

Em posse de todas as informações comentadas acima, foi possível o início do processo de modelagem. Simulou-se todo o período de dados, 01/01/1960 a 31/12/2015, e então foi feita a avaliação dos hidrogramas de cada sub-bacia. Como os parâmetros iniciais calibráveis foram obtidos de um trabalho realizado para a mesma região (31), os hidrogramas das vazões simuladas apresentaram-se já relativamente próximos aos hidrogramas de vazões observadas. No entanto, como maior parte das informações físicas e parâmetros fixos foram adaptados ou obtidos de diferentes fontes, fez-se necessário o processo de calibração, sendo utilizada a calibração automática multi-objetivo, descrita em detalhes em Tucci *et al.* (34).

Por fim, o modelo foi alimentado com as projeções do modelo climático regional Eta, regionalizado a partir dos modelos globais HadGEM2-ES e MIROC5 (Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5), para o cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 (intermediário e mais pessimista, respectivamente). Simularam-se os períodos presente (1960-1990) e futuros: 2011-2040 (FUT1), 2041-2070 (FUT2) e 2071-2099 (FUT3).

## 5.0 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise que será desenvolvida é referente a usina Três Marias, localizada no rio São Francisco. As demais usinas, inclusive pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e centrais geradoras hidrelétricas (CGHs), serão abordadas em trabalhos futuros.

A partir dos dados de vazões diárias simulados, foram elaboradas as curvas de permanência para cada um dos períodos (presente, FUT1, FUT2, FUT3), para cada modelo global (Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5) e para cada cenário do IPCC – AR5 (RCP 4.5 e RCP 8.5). Das curvas foram retiradas as vazões de referência Q95, Q50 e Q5, que são as vazões que ocorrem pelo menos 95%, 50% e 5% do tempo, respectivamente. A Tabela 1 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 1 – Simulações e Projeções das Vazões de Referência para a UHE Três Marias

Série de Vazões	Q95 (m³/s)	Q50 (m³/s)	Q5 (m³/s)	Q95 (%)	Q50 (%)	Q5(%)
Observada	150,00	440,00	2193,00			
MIROC_Presente	139,11	475,78	2431,23	-7.3%*	8.1%*	10.9%*
MIROC_RCP4.5_FUT1	74,89	413,61	2676,67	-46.2%**	-13.1%**	10.1%**
MIROC_RCP4.5_FUT2	110,12	414,13	2412,20	-20.8%**	-13.0%**	-0.8%**
MIROC_RCP4.5_FUT3	72,70	385,77	2454,44	-47.7%**	-18.9%**	1.0%**
MIROC_RCP8.5_FUT1	74,41	339,99	2478,55	-46.5%**	-28.5%**	1.9%**
MIROC_RCP8.5_FUT2	74,64	382,75	2549,30	-46.3%**	-19.6%**	4.9%**
MIROC_RCP8.5_FUT3	68,37	322,56	2373,54	-50.9%**	-32.2%**	-2.4%**
HADGEM_Presente	86,37	450,04	3400,05	-42.4%*	2.3%*	55.0%*
HadGEM_RCP4.5_FUT1	57,60	314,21	3105,05	-33.3%**	-30.2%**	-8.7%**
HadGEM_RCP4.5_FUT2	58,80	361,24	3520,11	-31.9%**	-19.7%**	3.5%**
HadGEM_RCP4.5_FUT3	54,79	328,01	3254,54	-36.6%**	-27.1%**	-4.3%**
HadGEM_RCP8.5_FUT1	36,29	240,43	2947,58	-58.0%**	-46.6%**	-13.3%**
HadGEM_RCP8.5_FUT2	75,64	318,42	3025,37	-12.4%**	-29.2%**	-11.0%**
HadGEM_RCP8.5_FUT3	49,83	211,47	2648,80	-42.3%**	-53.0%**	-22.1%**

NOTA

\* Porcentagem do aumento/diminuição da vazão simulada em relação a vazão observada.

\*\* Porcentagem do aumento/diminuição da vazão simulada para o futuro em relação a vazão simulada para o presente.

Ao comparar as vazões observadas no período presente (1960-1990) com as simuladas para esse mesmo período, vemos que ambos modelos apresentaram vazões menores do que a observada para a Q95, sendo que o MIROC5 apresentou uma vazão 7,3% mais baixa e o HadGEM2-ES 42,4% mais baixa. No caso das vazões Q50 e Q5, ocorreu o contrário, as vazões sofreram aumento quando comparadas as vazões observadas. A Q50 apresentou um aumento relativamente pequeno em ambos modelos, cerca de 8,1% no MIROC5 e 2,3% no HadGEM2-ES. Já na Q5, novamente o modelo HadGEM2-ES se destacou, apresentando uma vazão 55% maior que a vazão observada em Três Marias, enquanto o MIROC5 apresentou um aumento de apenas 10,9%. Na Figura 4 fica evidente que o modelo HadGEM2-ES tem a tendência de aumentar consideravelmente os picos e também de diminuir as estiagens mais do que o modelo MIROC5, que se mostrou mais adequado ao local de interesse.

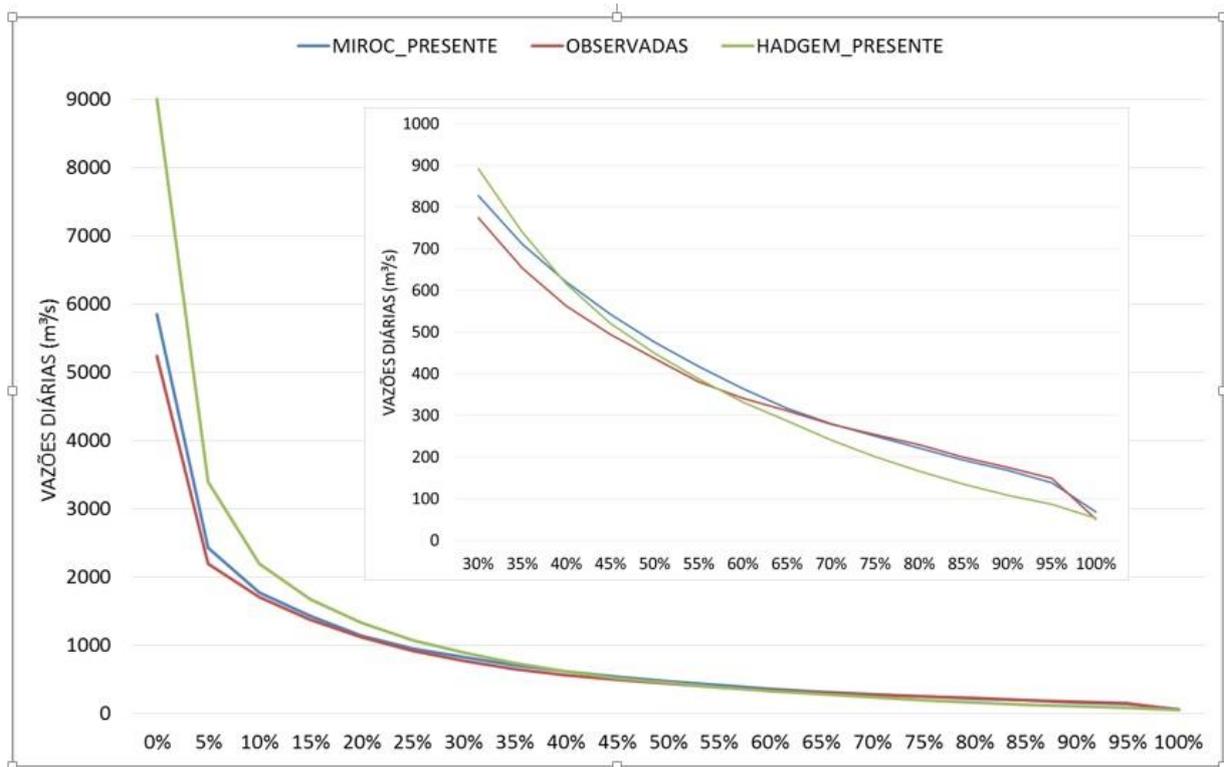


Figura 4 – Curva de permanência das vazões observadas e simuladas para o período presente (1960-1990) pelo modelo Eta alimentado pelos modelos MIROC5 e HadGEM2-ES.

Com relação as projeções, através das porcentagens da Tabela 1, é possível observar que de maneira geral as vazões irão reduzir no futuro, para ambos os modelos globais e para ambos cenários de mudanças climáticas. O MIROC5 apresenta maior redução nas vazões mais frequentes (Q95), 40% em média, e quase nenhuma redução ou até um pequeno aumento nas vazões menos frequentes (Q5). Já o HadGEM2-ES apresenta diminuição significativa das vazões mais baixas e medianas (Q95 e Q50), cerca de 30% em média, e diminuição, mais significativa do que no outro modelo, em quase todos os períodos no cenário RCP 4.5 e em todos os períodos no cenário RCP 8.5. Outra característica que pode ser observada é a interferência das mudanças climáticas, em ambos os modelos, principalmente nas vazões mais frequentes (Q95), seguidas das vazões Q50 e das vazões mais altas (Q5). Isso não ocorre apenas para o modelo HadGEM2-ES no cenário RCP 8.5, onde tanto a Q95 quanto a Q50 sofrem proporções semelhantes de impactos. Com relação as variações entre os cenários para cada modelo, percebe-se que no caso do Eta-MIROC5 a Q50 sofre uma redução mais significativa no cenário RCP 8.5 do que no cenário RCP 4.5. Já no caso do Eta-HadGEM2-ES essa diferença pode ser observada na Q5. De maneira geral é esperado que o cenário RCP 8.5 apresente impactos mais significantes do que o cenário RCP 4.5 devido ao aumento das forçantes radiativas.

Relacionando os resultados com a hidroeletricidade podemos observar que as projeções não são muito otimistas, pois são justamente as vazões mais baixas e constantes (Q95 e Q50), que são as mais importantes no processo de geração, que sofrem redução em ambos modelos climáticos, podendo ultrapassar 40% em alguns períodos. Não só a geração hidrelétrica, mas também maior parte dos usos da água, são extremamente dependentes das vazões mais frequentes, sendo a Q5 de pouca importância em relação a disponibilidade hídrica. Portanto, essas projeções indicam que além da necessidade de adaptação do setor elétrico brasileiro, como a diversificação das fontes de energia e aumento da eficiência energética, também será necessária uma gestão mais rígida, para impedir conflitos futuros entre os diversos usuários da água na bacia.

## 6.0 - CONCLUSÃO

Os resultados obtidos mostram que no período presente, apesar das incertezas existentes no processo de modelagem, ambos os modelos apresentaram valores aceitáveis para as vazões de maior importância para a geração hidrelétrica (Q95 e Q50). Porém, o modelo Eta-MIROC5 mostrou-se mais adequado, pois o modelo Eta-HadGEM2-ES tende a superestimar as vazões mais altas e subestimar as vazões mais baixas. Também foi possível observar que nos períodos futuros são evidentes os impactos nas vazões da bacia devido as mudanças climáticas. No caso de Três Marias especificamente, estima-se um impacto negativo, pois as vazões Q95 e Q50 tendem a reduzir consideravelmente, podendo ultrapassar 40%, em comparação ao período atual. Uma redução dessa ordem de grandeza seria de grande impacto no planejamento do setor energético. Por fim, é importante

ressaltar que a redução das vazões na bacia não irá afetar apenas a geração hidrelétrica, mas também os demais usos da água, que dependem principalmente das vazões mais frequentes, assim como a hidroeletricidade. Sendo assim, fica evidente a importância da modelagem hidroclimática no planejamento do setor energético e dos demais setores dependentes dos recursos hídricos, bem como a importância de levar em conta as medidas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ALEXANDRE, A. M. B. Previsão de Vazões Mensais para o Sistema Interligado Nacional Utilizando Informações Climáticas. Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará – UFCE. Fortaleza, 2012.
- (2) ANA – Agência Nacional de Águas. Sistema de Informações Hidrológicas – HidroWeb. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em: janeiro de 2017.
- (3) ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico – SIGEL. Disponível em: <http://sigel.aneel.gov.br/portal/home/index.html>. Acesso em: janeiro de 2017.
- (4) BEVEN, K. J. Rainfall-Runoff Modelling: The Primer. 2ª Edição. Lancaster University, UK: Wiley-BlackWell, 2001. 488 p.
- (5) BREMICKER, M. Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells für das Weser und das Ostsee Einzugsgebiet als Baustein eines Atmosphären-Hydrologie-Modells. Dissertation - Geowissenschaftlicher Fakultät, Albert-Ludwigs-Universität. Freiburg, 1998.
- (6) CBHSF – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2016-2025. Volume 1 – Caracterização da bacia hidrográfica – 1ª parte. REV1. Salvador, 2015a.
- (7) CBHSF – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2016-2025. Volume 7 – Usos, balanço hídrico e síntese do diagnóstico. REV1. Salvador, 2015b.
- (8) CGIAR-CSI – Consortium for Spatial Information. SRTM 90m Digital Elevation Data. Disponível em: <http://srtm.csi.cgiar.org/>. Acesso em: setembro de 2016.
- (9) CHOU, S. C., LYRA, A., MOURÃO, C., DEREZYNSKI, C., PILOTTO, I., GOMES, J., BUSTAMANTE, J., TAVARES, P., SILVA, A., RODRIGUES, D., CAMPOS, D., CHAGAS, D., SUEIRO, G., SIQUEIRA, G., NOBRE, P. e MARENGO, J. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. American Journal of Climate Change, 2014a, 3, 438-454.
- (10) CHOU, S. C., LYRA, A., MOURÃO, C., DEREZYNSKI, C., PILOTTO, I., GOMES, J., BUSTAMANTE, J., TAVARES, P., SILVA, A., RODRIGUES, D., CAMPOS, D., CHAGAS, D., SUEIRO, G., SIQUEIRA, G. e MARENGO, J. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. American Journal of Climate Change, 2014b, 3, 512-525.
- (11) COLLISCHONN, W. Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. Tese de Doutorado submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2001.
- (12) COLLISCHONN, W. e TUCCI, C. E. M. Simulação Hidrológica de Grande Bacias. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 6, n. 1, p. 95-118, jan/mar 2001.
- (13) EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2016: Ano base 2015. Rio de Janeiro, 2016.
- (14) FAN, F. M.; RAMOS, M. H. e COLLISCHONN, W. Sobre o uso de Previsões Hidrológicas Probabilísticas para Tomada de Decisão. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 20, n. 4, p. 914-926, out/dez 2015.
- (15) FBDS – Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável. Mudanças Climáticas e Eventos Extremos no Brasil. Rio de Janeiro, 2009.
- (16) FILHO, G. M. M., ANDRADE, R. S., JUNIOR, J. C. Z. e FILHO, L. N. L. M. Modelos Hidrológicos: Conceitos e Aplicabilidades. Revista de Ciências Ambientais, vol. 6, n. 2, p. 35-47, 2012.

- (17) FREITAS, M. A. V. e SOITO, J. L. S. Energia e Recursos Hídricos. Parcerias Estratégicas; Mudança do clima no Brasil: vulnerabilidade, impactos e adaptação – Centro de Gestão de Estudos Estratégicos (CGEE), vol. 13, n. 27. Brasília, 2008.
- (18) INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa – BDMEP. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em: janeiro de 2017.
- (19) IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribuição dos grupos de trabalho I, II e III ao Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 2014.
- (20) LIANG, X., LETTENMAIER, D., WOOD, E. F. e BURGE, S. J. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*. V.99, n. D7, p. 14.415-14.428, July, 1994.
- (21) LIMA, J. W. M., COLLISCHONN, W. e MARENGO, J. A. Efeitos das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Elétrica. São Paulo: AES Tietê, 2014. 360 p.
- (22) LUCENA, A. F. P. Proposta Metodológica para Avaliação da Vulnerabilidade às Mudanças Climáticas Globais no Setor Hidroelétrico. Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 2010.
- (23) MARTINI, E. A. Aplicação do Modelo SMAP para Avaliação de Impactos de Mudanças Climáticas: um estudo de caso para a bacia de Camargos (MG). Trabalho final de Graduação submetido ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 2015.
- (24) MMA – Ministério do Meio Ambiente. Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco. Brasília, 2006.
- (25) NOBRE, C. A., MARENGO, J. A., SOARES, W. R., ASSAD, E., SCHAEFFER, R., SCARANO, F. R. e HACON, S. S. Riscos de Mudanças Climáticas do Brasil e Limites à Adaptação. Brasília, 2016.
- (26) RENNÓ, C. D. e SOARES, J. V. Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental. Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas. Ação “Métodos, modelos e geoinformação para gestão ambiental”. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2000.
- (27) SAE – Secretária de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. Brasil 2040: cenários e alternativas de adaptação à mudança do clima – Resumo Executivo. Brasília, 2015.
- (28) SANTANA, T. B. Impacto de Mudanças Climáticas sobre o Regime de Vazões e a Geração Hidrelétrica de Energia. Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Itajubá, 2013.
- (29) SCIANNI, L. A. Avaliação Preliminar do Efeito das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Elétrica. Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Itajubá, 2014.
- (30) SHAEFFER, R., SZKLO, A. S., LUCENA, A. F. P., SOUZA, R. R., BORBA, B. S. M. C., COSTA, I. V. L., JÚNIOR, A. O. P. e CUNHA, S. H. F. Mudanças Climáticas e Segurança Energética no Brasil. Rio de Janeiro, 2008.
- (31) SILVA, B. C. Previsão Hidroclimática de Vazão para a Bacia do rio São Francisco. Tese de Doutorado submetida ao programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2005.
- (32) SILVEIRA, C. S.; FILHO, F. A. S.; MARTINS, E. S. P. R.; OLIVEIRA, J. L.; COSTA, A. C.; NOBREGA, M. T.; SOUZA, S. A. e SILVA, R. F. V. Mudanças Climáticas na Bacia do Rio São Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 21, n. 2, p. 416-428, abr/jun 2016.
- (33) TIEZZI, R. O. Variabilidade Hidroclimática e seus Efeitos no Suprimento de Energia Elétrica do Sistema Interligado Nacional. Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas, 2015.
- (34) TUCCI, C. E. M., CLARKE, R. T., DIAS, P. L. S. e COLLISCHONN, W. Previsão de Médio Prazo da Afluência de Reservatórios com base na Previsão Climática. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. Porto Alegre, 2002.

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Rebeca Meloni Virgílio, nascida em Itajubá/MG em 1989, é engenheira Hídrica pela Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI (2014). Atualmente é aluna de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia pela Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Atua em projetos relacionados aos temas recursos hídricos e energia, nas áreas de hidrologia, modelagem hidrológica, previsões de vazão, mudanças climáticas, hidroeletricidade e gestão de recursos hídricos.



Benedito Cláudio da Silva, nascido em Serra Negra/SP em 1972, é engenheiro mecânico (1996) e mestre em Engenharia Mecânica (2000) pela Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, e doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS (2005). Atualmente é professor Adjunto-A, nível II, na Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Possui experiência na área de recursos hídricos e energia, atuando em pesquisas nas áreas de modelagem hidrológica, previsões de vazão, drenagem urbana, integração hidrologia e meteorologia, mudanças climáticas, hidrometria, gestão de recursos hídricos e pequenas centrais hidrelétricas.



Luiz Augusto Horta Nogueira, nascido em Cruzeiro/SP em 1956, é engenheiro mecânico pela Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho – UNESP (1978), mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP (1981), possui especialização em Economia da Energia pela Fundación Bariloche (1985) e é doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP (1987). Atualmente é professor voluntário do Instituto de Recursos Naturais da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI e consultor das Nações Unidas em temas energéticos. Atua em estudos técnicos, econômicos e ambientais de sistemas energéticos, principalmente relacionados à cogeração, bioenergia (etanol, biodiesel e bioeletricidade) e eficiência energética nos usos finais.