

MODELAGEM DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS DA BACIA DO RIO XINGU

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Wellington Luis Teodoro da Cruz Junior (Fatec, Bolsista PIBIC/CNPq)
wellington.junior@inpe.br

Daniel Andres Rodriguez (CCST/INPE, Orientador)
E-mail: daniel.andres@inpe.br

COLABORADORES

Lucas Garofolo Lopes (CCST/INPE)

Julho de 2017

DADOS DE IDENTIFICAÇÃO

Nome: **Wellington Luis Teodoro da Cruz Junior**

Local de Trabalho: **CCST / INPE**

Título do Projeto: **Modelagem dos impactos das mudanças climáticas na operação dos reservatórios da bacia do rio Xingu**

Tipo de bolsa: **Bolsa PIBIC-IC**

Período: **Agosto/2016 a Julho/2017**

MODELAGEM DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS DA BACIA DO RIO XINGU

Wellington Luis Teodoro da Cruz Junior¹ (FATEC, Bolsista PIBIC/CNPq)
Daniel Andres Rodriguez² (CCST/INPE, Orientador)
Lucas Garofolo Lopes³ (CCST/INPE, Colaborador)

RESUMO

O rio Xingu, um dos principais tributários da calha sul do Amazonas, possui uma bacia que se estende por uma área de 531.250 km², equivalente a 13% da bacia Amazônica, sendo seu clima quente e úmido e seu relevo variado, com alturas desde 600 metros até 109 metros. Sua vazão média é de 22.000 m³, correspondente a 10% da vazão média do Rio Amazonas.

Este trabalho expõe as mudanças hidrológicas nas vazões da Bacia do rio Xingu decorrentes das mudanças climáticas, geradas pelo Modelo Hidrológico Distribuído do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (MHD-INPE) desenvolvido pelo Centro de Ciências do Sistema Terrestre. O modelo MHD foi alimentado com resultados dos cenários de mudanças climáticas desenvolvido no CPTEC-INPE com o modelo atmosférico Eta-INPE, e com dados dos modelos atmosféricos *Model for Interdisciplinary Research on Climate* (MIROC) e o *Hadley Center Global Environmental* (HadGEM).

Para simular o ciclo hidrológico, foram reunidas informações como mapas topográficos e digitais terrestres e também informações nas quais foram desenvolvidas na primeira etapa deste projeto como: mapas de solo, vegetação e uso da terra. A calibração do MHD-INPE foi realizada de acordo com os postos fluviométricos selecionados para o estudo, apresentando bons resultados para o desenvolvimento.

Os resultados obtidos com as projeções mostraram que apesar da dispersão na magnitude do impacto, as vazões tendem diminuir sob o efeito das mudanças climáticas em todas as estações simuladas para ambos os cenários de mudanças climáticas.

¹ Aluno do Curso de Análise e Desenvolvimento de Sistemas- **E-mail: wellington.junior@inpe.br**

² Centro de Ciência do Sistema Terrestre - **E-mail: daniel.andres@inpe.br**

³ Centro de Ciência do Sistema Terrestre - **E-mail: lucas.garofolo@inpe.br**

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	2
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3. BACIA DO RIO XINGU	3
4. MATERIAIS E MÉTODOS	4
4.1. DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS	4
4.1.2. DADOS METEOROLÓGICOS	5
4.2. METODOLOGIA	5
4.2.1. MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO DE LARGA ESCALA	5
4.2.1.1. IMPLEMENTAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO	6
4.3. CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS REGIONAIS DO MODELO ATMOSFÉRICO ETA	7
4.4. CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS DE MODELOS ATMOSFÉRICOS GLOBAIS	8
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	9
5.1. CALIBRAÇÃO	9
5.2. PROJEÇÕES HIDROLÓGICAS	12
5.2.1. PROJEÇÕES HIDROLÓGICAS COM O CENÁRIO RCP 4.5	12
5.2.2. PROJEÇÕES HIDROLÓGICAS COM O CENÁRIO RCP 8.5	15
6. CONCLUSÃO	17
7. REFERÊNCIAS	18

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização geográfica da bacia do rio Xingu	3
Figura 2 - Delimitação das sub-bacias	7
Figura 3 - Hidrograma de vazões - Sub-bacias 1 à 6	10
Figura 4 - Hidrograma de vazões - Sub-bacias 7 à 13	11
Figura 5 - Projeções Hidrológicas de Vazão com o cenário RCP 4.5 para a sub-bacia 9 - UHE São Felix para os períodos: a) 2011-2040; b) 2041-2070; c) 2071-2100	13
Figura 6 - Projeções Hidrológicas de Vazão com o cenário RCP 4.5 para a sub-bacia 13 - UHE Belo Monte para os períodos a) 2011-2040; b) 2041-2070; c) 2071-2100	14
Figura 7 - Projeções Hidrológicas de Vazão com o cenário RCP 8.5 para a sub-bacia 9 - UHE São Felix para os períodos a) 2011-2040; b) 2041-2070; c) 2071-2100	15
Figura 8 - Projeções Hidrológicas de Vazão com o cenário RCP 8.5 para a sub-bacia 13 - Belo Monte para os períodos a) 2011-2040; b) 2041-2070; c) 2071-2100	16

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados das estações fluviométricas da bacia.....	4
Tabela 2 - Dados das funções objetivo.....	9

LISTA DE ABREVIATURAS

- ANA - Agência Nacional de Águas
- CMIP - Projeto de Intercorporação de modelo acoplado (*Coupled Model Intercomparison Project*)
- CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
- HadGEM - *Hadley Center Global Environmental*
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change*)
- MIROC - *Model for Interdisciplinary Research on Climate*
- MHD - Modelo Hidrológico Distribuído do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- RCP - Caminhos de Concentração Representativos (*Representative Concentration Pathways*)
- SCE-UA - Algoritmo de Embaralhamento de Evolução Complexa(*Shuffled Complex Evolution*)
- UHE - Usina Hidroelétrica

1. INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica do rio Amazonas, estende-se por cerca de 7 milhões de km², contemplando 5 países, mais de 7 mil afluentes e é a maior bacia fluvial do mundo. Com descarga média anual do rio Amazonas de 175 mil m³/s, a Bacia Amazônica representa 1/5 da água que é exultada ao oceano por todos os rios do planeta. Devido a esta dimensão, a bacia Amazônica é foco de estudos e pesquisas de diversas áreas, desde engenharias até ciências socioeconômicas.

A bacia do rio Xingu, uma das principais sub-bacias da bacia Amazônica, possui aspectos marcantes em suas características geográficas e físicas que estão fortemente atreladas ao clima e as mudanças climáticas, pois a mesma corta dois importantes biomas brasileiros: Cerrado e Amazônia. Tendo sua extensão totalmente em solos brasileiros, dividida entre o Estado do Pará e Mato Grosso. A geração de energia elétrica na bacia Amazônica tem sido objetivo de estudo cada vez mais frequente. Trabalhos sobre projeções climáticas indicam um futuro com queda nas tendências de chuvas (Chou et al, 2015), tornando o sistema hidroelétrico mais sensível, haja visto que variações das precipitações estão diretamente correlacionadas com as descargas (Chiew, 2006).

Este trabalho foi confeccionado a fim de compreender os efeitos das mudanças climáticas globais na operação dos reservatórios e produção de energia da bacia do rio Xingu. Para atingir o propósito deste trabalho, através de simulações com o modelo hidrológico MHD-INPE alimentado com dados provenientes do modelo atmosférico regional Eta-INPE sob projeções climáticas futuras e modelos atmosféricos globais nos cenários RCP 8.5 e RCP 4.5 (IPCC, 2013).

Foram realizadas comparações das projeções presentes 1970 à 1990 e futuras, 2011 à 2099, tendo como objetivo mensurar as alterações decorrentes das mudanças climáticas de caráter sazonal, variabilidade dos valores máximos e mínimos e estabilidade de valores médios.

2. OBJETIVO

Este trabalho de pesquisa tem por objetivo estudar os efeitos das mudanças globais na operação dos reservatórios da bacia do rio Xingu.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1) Desenvolver uma base de dados geomorfológicos e hidroclimáticos para a bacia do rio Xingu e implementar o modelo hidrológico MHD-INPE.

2) Calibrar o Modelo de Grandes Bacias desenvolvido pelo INPE para modelar as vazões.

3) Fazer projeções futuras de vazões utilizando o modelo MHD-INPE utilizando como forçante as projeções de mudanças climática.

3. BACIA DO RIO XINGU

Com 7,68% do continente sul americano e cerca 13% da Bacia Amazônica, a bacia do rio Xingu (Figura 1) possui uma área de drenagem de aproximadamente 531.250 km², situando entre dois biomas brasileiros: Cerrado e Amazônia com relevo variando de aproximadamente 600 metros no alto Xingu, a 15 metros no baixo Xingu.

A nascente do rio principal está localizada na serra do Roncador, no Mato Grosso, encontrando seus principais afluentes no Estado do Pará, os rios: Bacajá, Caeté, Chiche, Curuá, Fresco, Irirí e Ximxim. A bacia do rio Xingu é dividida entre dois estados brasileiros, Mato Grosso e Pará, tendo sua maior parte na região Norte, possui um potencial hidroelétrico de aproximadamente 5.140 MW.

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia, baseado nas “Normais Climatológicas - 1961-1990” (INMET, 2008), a climatologia das temperaturas do ar na região, apresenta valores de temperatura média compensada anual entre 24 e 28°C, temperatura máxima anual entre 28 e 30 °C e temperatura mínima anual entre 18 e 24 °C.

Segundo Lucas et al.(2006), os valores de precipitação na bacia variam de 1500 a 2500 mm/ano, obtendo vazão média anual de 7966 m³/s. Os valores de umidade relativa do ar permanecem acima de 80% em quase todos os meses do ano (Lucas et al., 2009).



Figura 1 - Localização geográfica da bacia do rio Xingu

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS

4.1.1. DADOS FLUVIOMÉTRICOS

As estações fluviométricas fornecem séries de vazão que são coletados diariamente por instituições responsáveis por manter e disponibilizar informações de vazão.

Para o estudo da bacia do Rio Xingu, o critério utilizado na escolha dos pontos das estações foi a existência de uma serie consistente de vazão.

As estações utilizadas correspondem a series históricas consistidas e disponibilizadas pela Agencia Nacional de Águas (<http://www.ana.gov.br/>). A tabela abaixo apresenta os dados obtidos das estações fluviométricas para as bacias em estudo.

Tabela 1 - Dados das estações fluviométricas das sub-bacias.

SB	Estação	ID - ANA	Rio	LAT	LON	Área
1	Pousada Matrinxa	18415000	Culuene	-13.569	-53.076	11.600
2	Aldeia Bacajá	18870000	Rio Bacajá	-4.916	-51.428	12.800
3	Jus. Rio Preto	18436000	Comandante Fontoura	-10.047	-52.114	12.000
4	Fazenda Cipaúba	18880000	Rio Bacajá	-3.731	-51.567	24.700
5	Cajueiro	18650000	Rio Curuá	-5.650	-54.520	35.600
6	Boa Esperança	18500000	Rio Fresco	-6.745	-51.773	42.400
7	Laranjeiras	18600000	Rio Iriri	-5.696	-54.245	58.700
8	Pedra do Ó	18700000	Rio Iriri	-4.527	-54.012	122.000
9	UHE São Felix	18470000	Rio Xingu	-6.797	-52.000	210.000
10	UHE Pombal	18514000	Rio Xingu	-5.917	-52.590	266.00
11	Belo Horizonte	18520000	Rio Xingu	-5.392	-52.877	281.000
12	Altamira	18850000	Rio Xingu	-3.214	-52.212	448.000
13	UHE Belo Monte	18901080	Rio Xingu	-3.101	-51.778	482.000

4.1.2. DADOS METEOROLÓGICOS

As variáveis meteorológicas permitem o cálculo da distribuição diária da precipitação e evapotranspiração sobre toda a região, informações que combinadas com dados de solo, permitem a estimativa do nível de água no solo.

Dentre os dados coletados utilizados estão:

Precipitação: fenômeno relacionado à queda de corpos d' água (chuva, neve, granizo) sobre a superfície da Terra.

Radiação Solar: designação dada à energia radiante emitida pelo Sol, em particular aquela que é transmitida sob a forma de radiação eletromagnética.

Temperatura do ar: métrica que descreve as transferências de energia térmica, associados com calor ou frio.

Ponto de orvalho: temperatura na qual o vapor de água presente no ar ambiente passa ao estado líquido na forma de pequenas gotas (chuva).

Velocidade do vento: parâmetro que determina o deslocamento de massas de ar ou simplesmente como estas se movimentam.

4.2. METODOLOGIA

4.2.1. MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO DE LARGA ESCALA

O modelo MHD-INPE foi desenvolvido a partir do MGB-IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas (COLLISCHONN et al.,2007) alterando as rotinas de estimativas de evaporação e de separação de fluxos. A parametrização do MHD-INPE combina a formulação probabilística de distribuição de colunas de água nos pontos de grade como no modelo Xinanjiang (ZHAO, 1992; ZHAO; LIU, 1995) com os 8 princípios utilizados no TOPMODEL (BEVEN; KIRKBY, 1979) para simular a resposta hidrológica.

O Modelo Hidrológico Distribuído utiliza informações geomorfológicas, fluviométricas, meteorológicas e da configuração da rede de drenagem da bacia para executar simulações (PAIVA, 2014).

A bacia é subdividida em células regulares, comunicadas por canais de drenagem representando a rede de drenagem da mesma. Cada célula está dividida em blocos de uso do solo, que resultam da combinação da vegetação, do tipo do solo e do uso da terra. O MHD-INPE gera valores diários de vazão para as sub-bacias divididas, além de usar dados observados para corrigir possíveis erros sistemáticos e calibrar os valores.

4.2.1.1. IMPLEMENTAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO

O MHD-INPE é composto por várias rotinas em Fortran que realizam a leitura e o processamento dos dados de entrada, os cálculos de balanço hídrico dentro de cada célula, a propagação de vazão pela rede de drenagem e a preparação dos dados de saída. Existem basicamente três procedimentos disponíveis no MHD-INPE: Simulação, Calibração e Previsão. Os procedimentos utilizados neste trabalho foram: Simulação e Calibração.

Simulação: Este procedimento é aplicado visando a verificação dos dados de entrada exigidos pelo modelo.

Calibração: A calibração de modelos hidrológicos é um processo iterativo em que os valores dos parâmetros são modificados e seu efeito nos resultados é avaliado repetidamente, até que o hidrograma calculado reproduza o hidrograma observado com boa precisão (Collischonn, 2001). Adicionalmente, podem ser utilizadas funções objetivos, que procuram quantificar a qualidade do ajuste dos hidrogramas (Tucci, 1998). Além disso, podem ser utilizados métodos automáticos de otimização de parâmetros, como o método proposto por Duan et al. (1992, 1994), adotado no MHD-INPE.

Foram escolhidas para este projeto 13 sub-bacias do rio Xingu (Figura 2), nas quais foram realizados os processos de calibração e projeções futuras de vazão. As informações correspondentes a cada sub-bacia foram obtidas de acordo com a (Tabela 1) apresentada anteriormente.

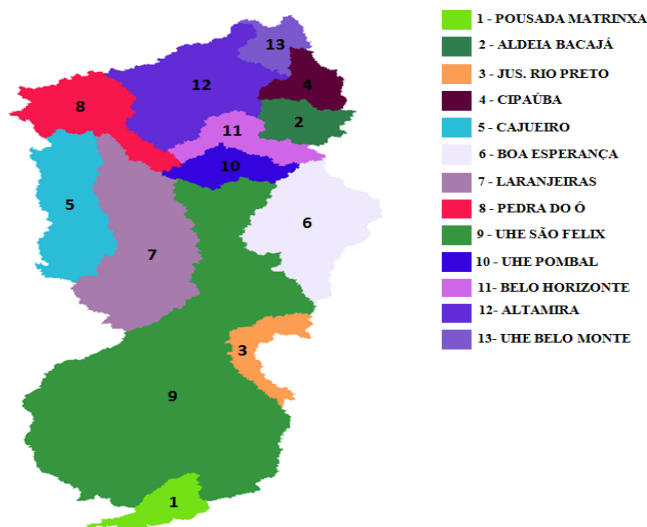


Figura 2 – Delimitação das sub-bacias

4.3. CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS REGIONAIS DO MODELO ATMOSFÉRICO ETA

O modelo Eta é utilizado operacionalmente no CPTEC/INPE desde 1997 para o prognóstico de tempo (CHOU, 1996) com base na qual foi desenvolvida uma versão para uso em estudos de mudanças climáticas que requerem integrações de longo prazo (PESQUERO et al. 2009; CHOU et al. 2012; MARENGO et al. 2012). O modelo utiliza a coordenada vertical ETA (MESINGER et al, 1985). As equações dinâmicas são resolvidas através do esquema modificado de Mesinger (1974), os termos de inércia gravidade através de Janjic (1979) e o método de Arakawa é utilizado na diferenciação espacial, permitindo a conservação de entropia e energia (JANJIC 1984; MESINGER 1984; MESINGER et al. 1988).

Três esquemas de convecção estão disponíveis como opções no modelo: Betts-Miller-Janjic (BETTSANDMILLER 1986; JANJIC 1994), Kain-Fritsch (KAIN 2004) e Kain-Fritsch com fluxo de momentum (BASTOS 2007). A micro física de nuvens é resolvida de acordo com Ferrier et al. (2002) e a transferência radiativa com o esquema GFDL (LACISAND HANSEN 1974; SCHWARZKOPF AND FELS 1991). O modelo

utiliza o esquema de Mellor-Yamada 2.5 para a representação das trocas turbulentas na vertical (MELLORAND YAMADA 1982; JANJIC 2002; MESINGER 2010), e a teoria de Monin-Obukhov na simulação das trocas de energia na camada limite superficial (ZILITINKEVICH, 1995; JANJIC, 1994; MESINGER et al. 1996). O modelo de superfície utilizado é o NOAH, originalmente desenvolvido por Pan e Mahrt (1987), e modificado por Chen(1997) e Ek (2003).

Para este trabalho foram utilizadas informações das downscaling dinâmico de quatro membros do *Hadley Center Coupled Model* (CHOU et al., 2011) desenvolvido com o modelo Eta para o período histórico (1970-1990) e as projeções para o futuro (2011-2099). Estas informações são utilizadas para alimentar o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias – MHD-INPE.

4.4. CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS DE MODELOS ATMOSFÉRICOS GLOBAIS

Os modelos atmosféricos utilizados nesse trabalho foram escolhidos com base em alguns modelos utilizados pelo CMIP5 (IPCC, 2007) no *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC).

Um deles é a nova versão do *Model for Interdisciplinary Research on Climate*, conhecido como MIROC. Desenvolvido pelo *Center for Climate System Research* (CCSR) da Universidade de Tokyo, o modelo encontra-se na versão 5, que diferente da sua versão anterior, obteve uma atualização das parametrizações do modelo para aumentar a resolução, porém com o mesmo tempo de execução que o MIROC3. Esta versão é baseada no núcleo dinâmico espectral e incluem novas metodologias físicas (NUMAGUTI et al. 1997), mostrando melhorias na precipitação, campos atmosféricos e na simulação do El Niño (WATANABE, 2010).

Foi também incorporado ao estudo o *Hadley Center Global Environmental Model2*, conhecido como HadGEM2. Projetado no intuito de simular e obter o grau de evolução centenária nas escalas do clima, incluindo retorno biogeoquímico, no qual a versão anterior, o HadGEM1 não possuía (COLLINS et al., 2011).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. CALIBRAÇÃO

Após o processo de calibração, obtêm-se os valores das funções objetivo, dispostos na Tabela 2 para cada sub-bacia. Pode-se observar que os valores do coeficiente Nash-Sutcliffe das vazões diárias (NSE) obtiveram bons resultados para as sub-bacias, assim como também o coeficiente NSLog.

O coeficiente R^2 de correlação das vazões diárias, obteve valores suscetivelmente admissíveis, assim como o coeficiente de erro relativo de volume baseado na integração das vazões diárias (ΔV), onde os valores apresentaram-se satisfatórios para todas as sub-bacias.

Tabela 2 - Dados das funções objetivo

BACIA	NASH	NSLOG	R2	ΔV
1	0.77	0.85	0.77	-0.002
2	0.83	0.73	0.83	-0.067
3	0.87	0.88	0.87	-0.023
4	0.86	0.69	0.87	-0.016
5	0.83	0.88	0.84	-0.064
6	0.79	0.89	0.81	-0.104
7	0.79	0.90	0.79	-0.095
8	0.88	0.91	0.88	-0.048
9	0.93	0.92	0.93	-0.039
10	0.92	0.95	0.93	-0.073
11	0.95	0.94	0.96	-0.035
12	0.93	0.95	0.93	-0.051
13	0.93	0.90	0.94	0.039

Os hidrogramas de vazões (Figuras 3 e 4), apresentam graficamente a comparação das vazões observadas obtidas da ANA com as vazões simuladas geradas pelo Modelo Hidrológico. Assim como os resultados apresentados na (Tabela 2), o hidrogramas também apresentaram um bom desempenho do Modelo Hidrológico para as simulações nas sub-bacias.

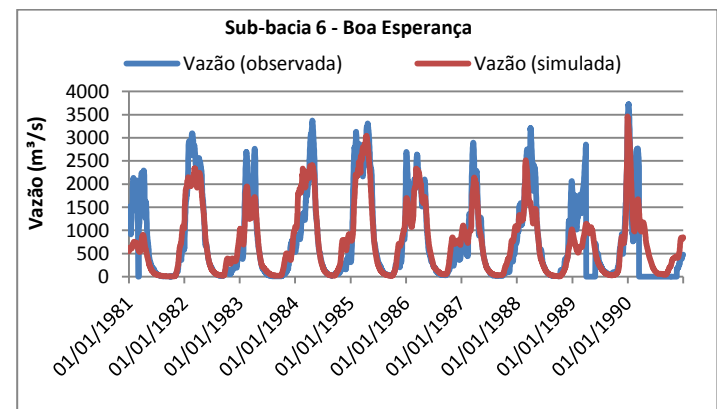
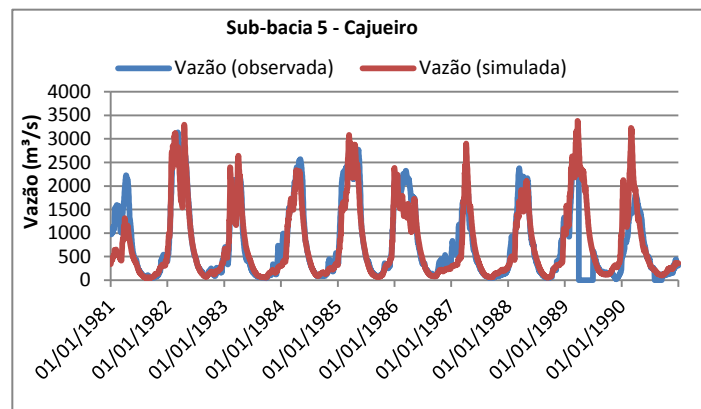
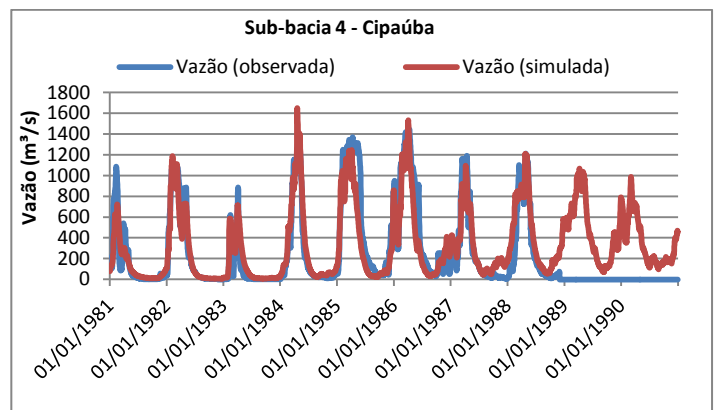
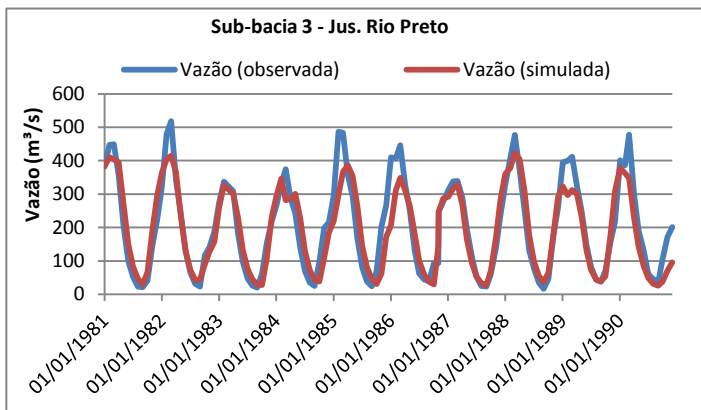
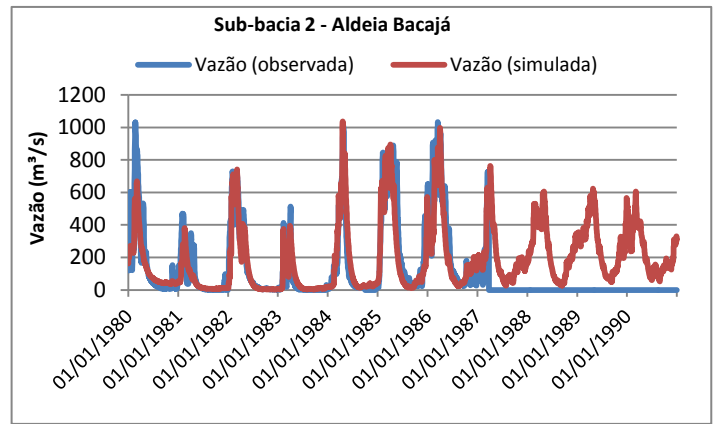
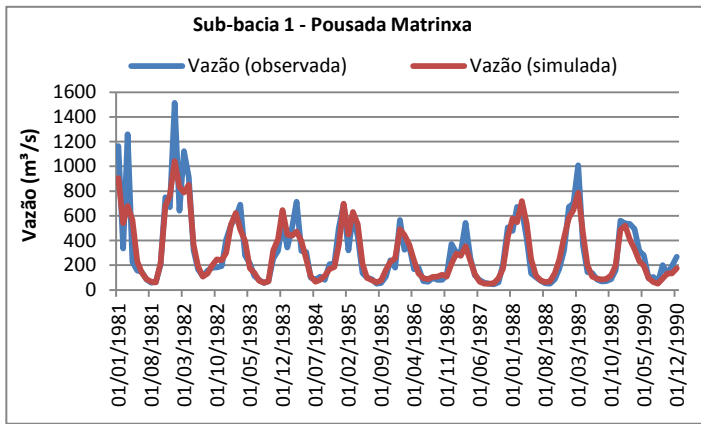


Figura 3 - Hidrograma de vazões - Sub-bacias 1 à 6

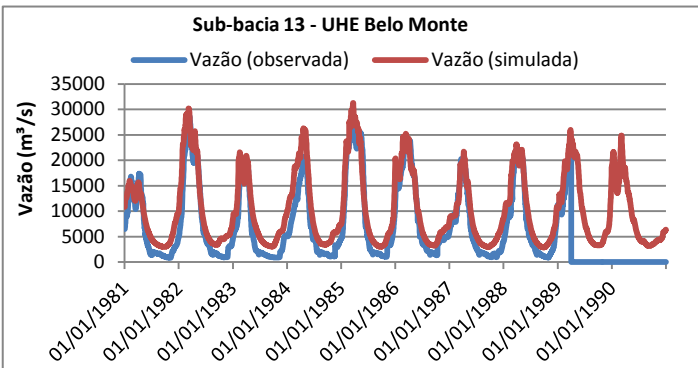
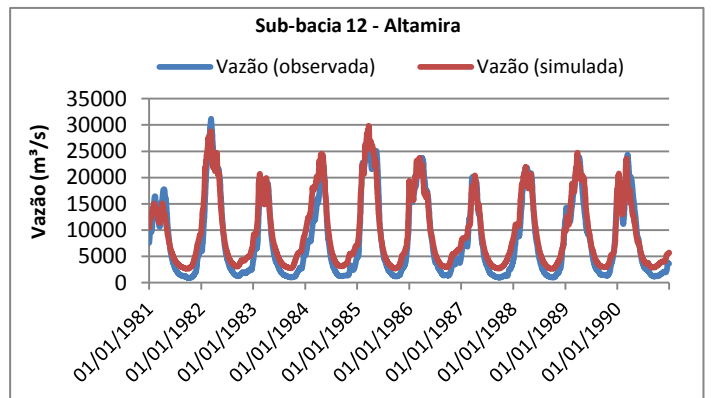
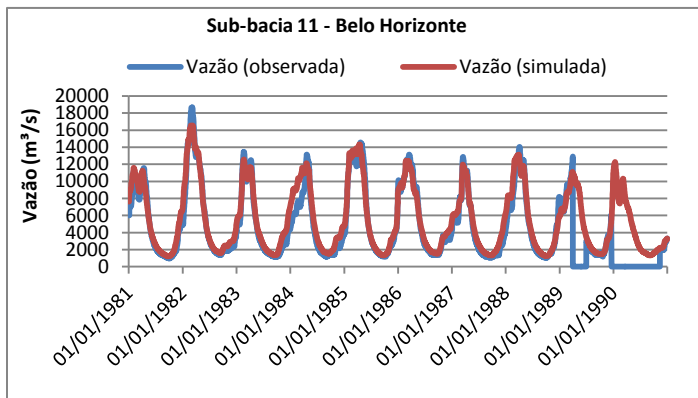
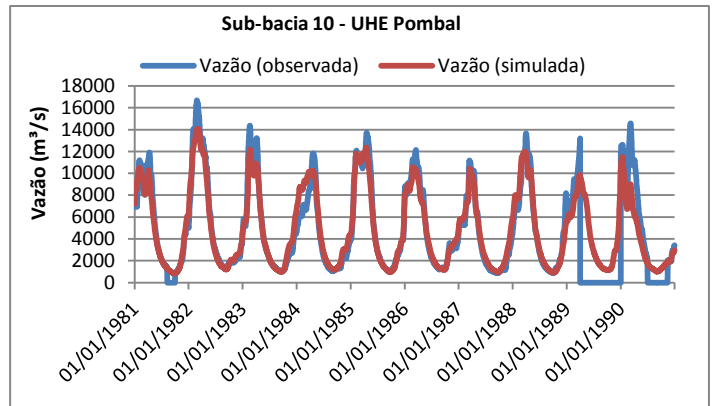
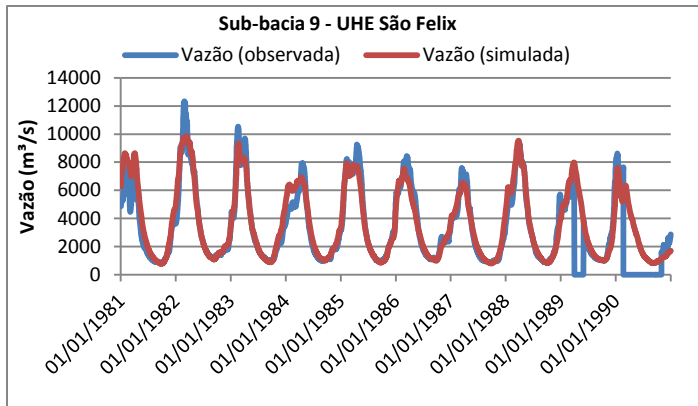
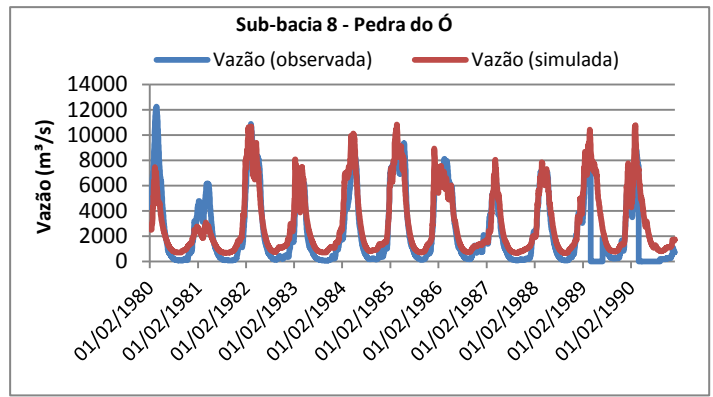
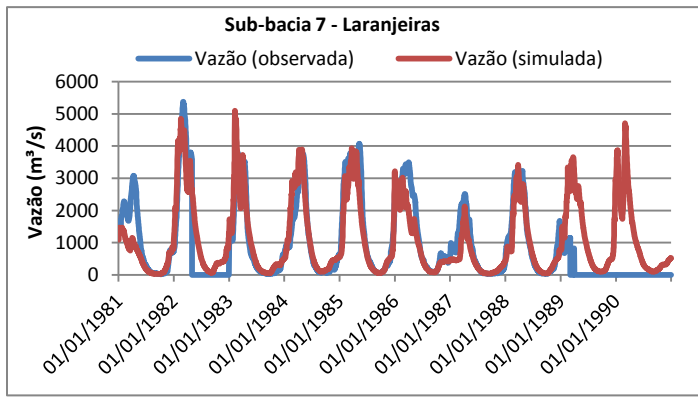


Figura 4 - Hidrograma de vazões - Sub-bacias 7 à 13

5.2. PROJEÇÕES HIDROLÓGICAS

Nesta etapa, os dados de projeções futuras provenientes do modelo Eta foram utilizados para alimentar o modelo hidrológico. Previamente os erros sistemáticos nas variáveis meteorológicas e de precipitação do modelo Eta foram corrigidos. Os diferentes cenários de mudanças climáticas foram comparados com o cenário 1970-1990 (Linha Base), considerado o cenário do clima atual. Nas comparações foram utilizadas medias mensais de vazão. Os subtópicos abaixo apresentam as medias de projeções futuras de vazão em diferentes cenários de mudanças climáticas utilizando os modelos atmosféricos selecionados para este projeto.

5.2.1. PROJEÇÕES HIDROLÓGICAS COM O CENÁRIO RCP 4.5

Quanto ao desempenho dos modelos em relação ao cenário de mudanças climáticas RCP 4.5 (Figuras 5 e 6), observa-se que nos períodos mais secos, os modelos apresentaram uma maior concordância nos valores de vazão em referência a Linha Base em todos os períodos. Observa-se também um leve aumento no pico de vazão por parte do modelo HadGEM 2 para o mês de Março na sub-bacia de Belo Monte no período de 2041 à 2070 em comparação ao período anterior de 2011 à 2040, enquanto que para os mesmos períodos o modelo MIROC 5 manteve-se praticamente estável. Para os períodos de 2071 à 2099 ambos os modelos apresentaram decremento na vazão, porém o modelo no qual apresentou maior decremento em comparação aos períodos anteriores, foi o modelo HadGEM 2.

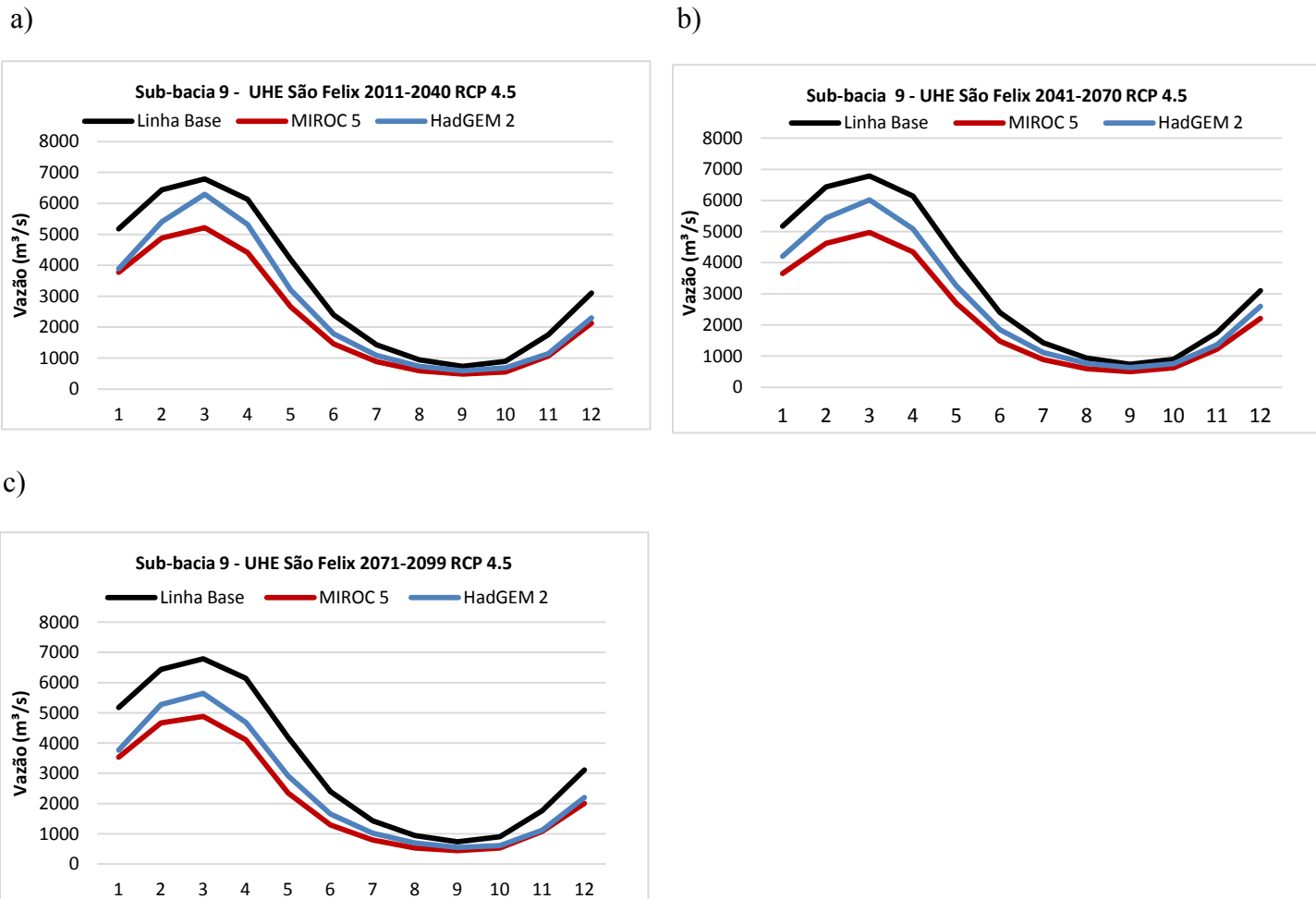
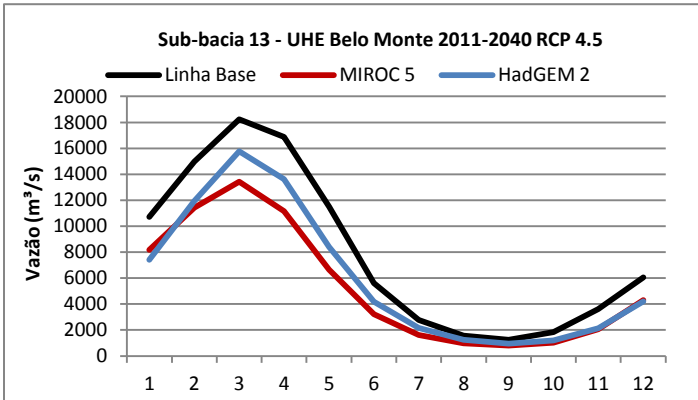
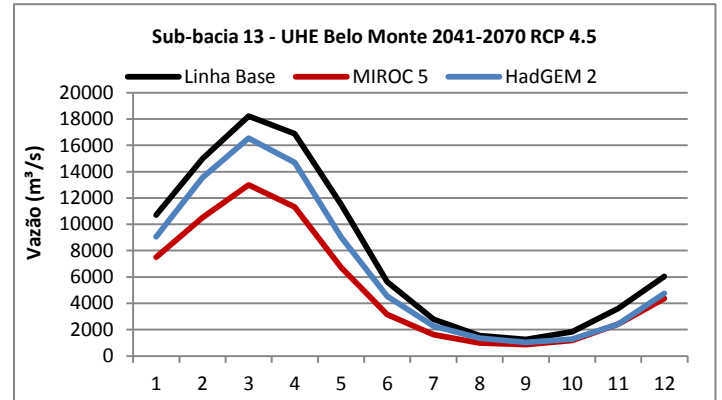


Figura 5 - Projeções Hidrológicas de Vazão com o cenário RCP 4.5 para a sub-bacia 9 - UHE São Felix para os períodos a) 2011-2040; b) 2041-2070; c) 2071-2100.

a)



b)



c)

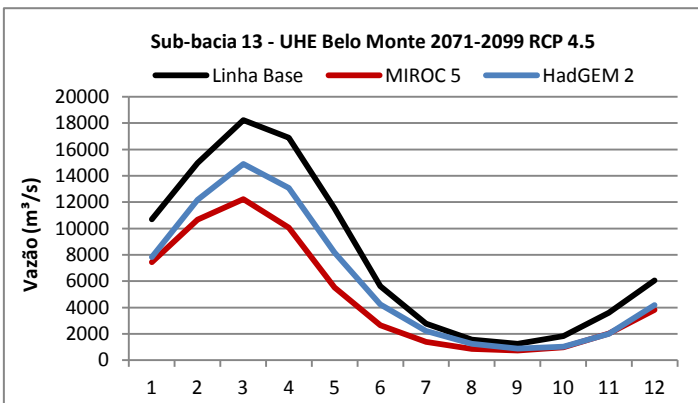


Figura 6 - Projeções Hidrológicas de Vazão com o cenário RCP 4.5 para a sub-bacia 13 - UHE Belo Monte para os períodos a) 2011-2040; b) 2041-2070; c) 2071-2100.

5.2.2. PROJEÇÕES HIDROLÓGICAS COM O CENÁRIO RCP 8.5

Quanto ao desempenho dos modelos em relação ao cenário de mudanças climáticas RCP 8.5 (Figuras 7 e 8), é notório uma diferença maior nos picos de vazão se comparados aos do cenário anterior (RCP 4.5), visto que o cenário atual apresentou valores de vazão mais baixos nos picos em referência a Linha Base. Para este cenário há uma tendência maior na diminuição de vazão sob o efeito das mudanças climáticas no passar dos períodos. O período mais crítico é o de 2071 à 2099, visto que há uma queda considerável nos valores de vazão em relação aos períodos iniciais 2011 à 2040, onde neste mesmo período crítico os modelos apresentaram uma tendência maior nas quedas dos picos de vazão e também nos períodos mais secos.

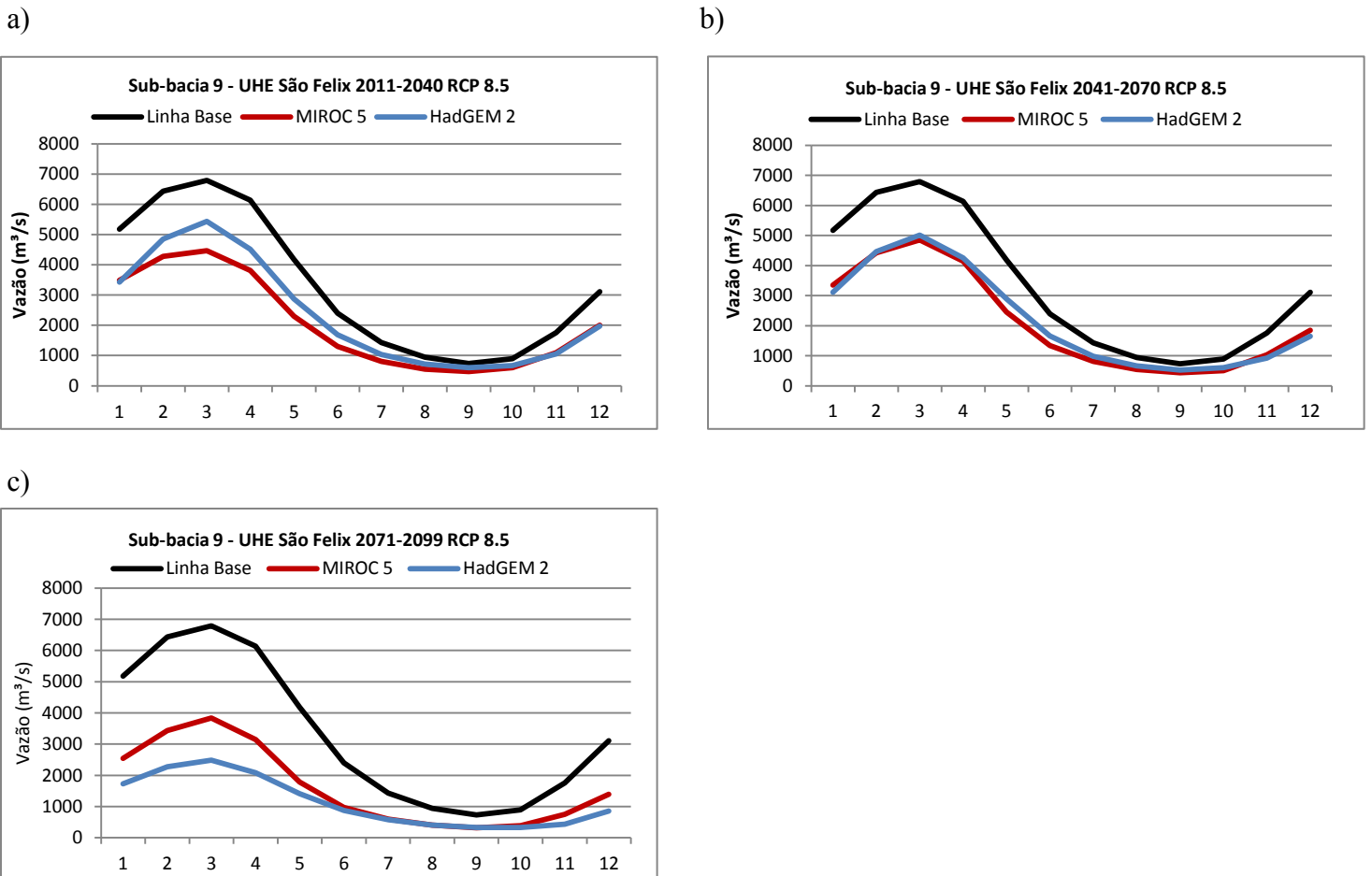
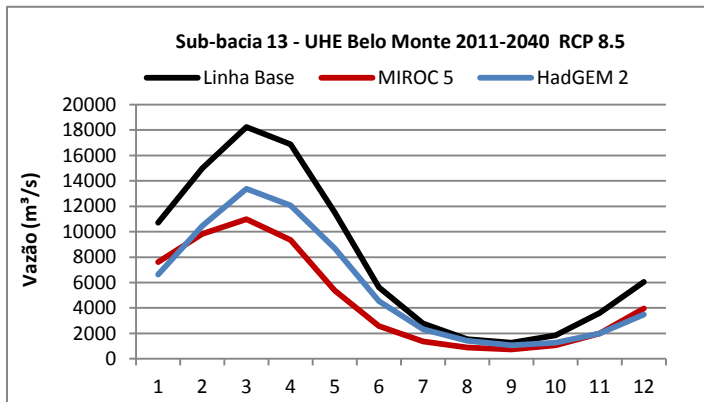
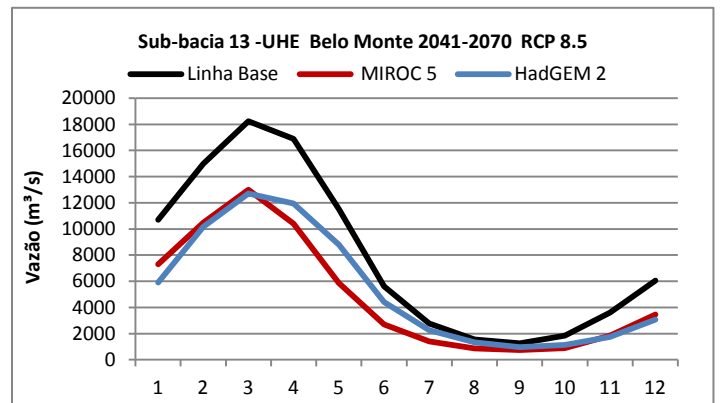


Figura 7 - Projeções Hidrológicas de Vazão com o cenário RCP 8.5 para a sub-bacia 9 - UHE São Felix para os períodos a) 2011-2040; b) 2041-2070; c) 2071-2100.

a)



b)



c)

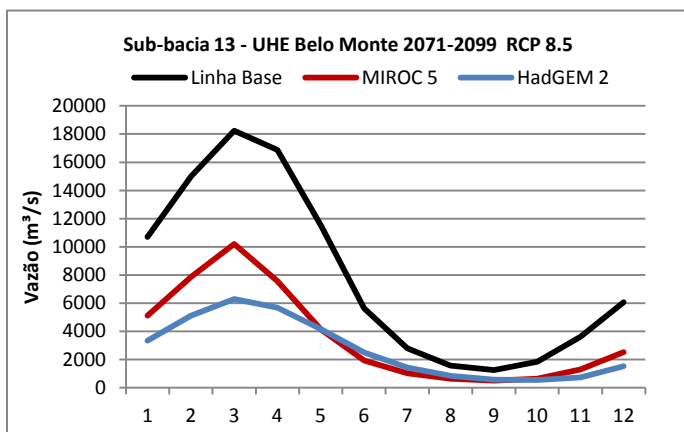


Figura 8 - Projeções Hidrológicas de Vazão com o cenário RCP 8.5 para a sub-bacia 13 - Belo Monte para os períodos a) 2011-2040; b) 2041-2070; c) 2071-2100.

6. CONCLUSÃO

O Modelo Hidrológico Distribuído (MHD-INPE) obteve êxito em simular as vazões observadas para as 13 sub-bacias, obtendo bons ajustes de calibração, onde estes ajustes foram fundamentais no desenvolvimento da etapa de projeções futuras de vazão.

Nas projeções futuras os comportamentos são diversificados e visivelmente mais sensíveis as mudanças climáticas dos cenários. Estas condutas ocorrem por parte das diferenças das características físico-meteorológicas de execução dos modelos.

Para continuação deste trabalho esta previsto avaliar os impactos das mudanças climáticas utilizando os mesmos cenários estudados, no potencial hidroelétrico das sub-bacias do rio Xingu.

7. REFERÊNCIAS

ANA - Agência Nacional de Águas (2013), **Hidroweb**. Base de dados hidrológicos, <http://hidroweb.ana.gov.br>.

BASTOS, P.R., 2007: Inclusão da perturbação de momentum no esquema de parametrização de cumulus Kain-Fritsch e impactos sobre um caso de chuva convectiva. MSc dissertation. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

BETTS A.K, MILLER MJ (1986) **A new convective adjustment scheme. Part II: single column tests using GATE wave, BOMEX and arctic air-mass data sets.** Q J R Meteorol Soc 112:693–709.

BEVEN, K.J.; KIRKBY, M.J. (1979), **A physically based variable contributing area model of basin hydrology**, Hydrological Sciences Bulletin, 24, 43-69.

BEVEN, K. J. (1997), **Distributed Hydrological Modeling: Applications of the TOPMODEL Concept.** John Wiley & Sons, Chichester, UK.

CHEN, F.; DUDHIA, J. (2001), **Coupling an Advanced Land Surface–Hydrology Model with the Penn State–NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity.** Mon. Wea. Rev., 129, 569–585.

CHIEW, F. H. S. (2006) **Estimation of rainfall elasticity of streamflow in Australia**, Hydrological Sciences Journal, 51:4, 613-625, DOI: 10.1623/hysj.51.4.613

Chou, Sin Chan . Modelo Regional Eta. Climanálise (São José dos Campos), Cachoeira Paulista, SP, v. 1, n. Ed. ESPECIAL, 1996.

Chou, S.C., et al., (2014) **Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios.** American Journal of Climate Change, 3, 512-525. <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>

Chou SC, Marengo JA, Lyra A, Sueiro G, Pesquero J, Alves LM, Kay G, Betts R, Chagas D, Gomes JL, Bustamante J, Tavares P (2012) **Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs.** Climate Dynamics. Vol. 38 n. 3-4, 635-653. DOI 10.1007/s00382-011-1002-8.

COLLINS, M.; TETT, S.F.B.; COOPER, C. (2001), **The internal climate variability of a HadCM3, a version of the Hadley centre coupled model without flux adjustments.** Clim Dyn, 17:61–81, doi:10.1007/s003820000094.

COLLINS, W. J. *et al.* (2008), **Evaluation of the HadGEM2 model.**, HCTN 74, Met Office Hadley Centre Technical Note, Met Office, UK.

COLLISCHONN, B., Allasia, D. G., Paz, A. R. **Modelo hidrológico distribuído para previsão de vazões incrementais na bacia do rio Paranaíba entre Itumbiara e São Simão.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos. , v.12, p.43 – 56, 2007

DUFRESNE, J.L. *et al.* (2013), **Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5.** Clim Dyn, 40:2123–2165.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. Water resources research, Wiley Online Library, v. 28, n. 4, p. 1015–1031, 1992. 4, 5, 22, 87.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. Optimal use of the sce-ua global optimization method for calibrating watershed models. Journal of hydrology, Elsevier, v. 158, n. 3, p. 265–284, 1994. 5, 22.

FERRIER, BS.; LIN, Y.; Black T; ROGERS, E.; DIMEGO, G (2002). Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta model. In: 15th Conference on numerical weather prediction, American Meteorological Society, San Antonio, TX, pp 280–283 (preprint).

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia **.Normais Climatológicas**, <http://www.inmet.gov.br/html/clima/mapas/?mapa=tmax>

JANJIC, Z.I., 1979: Forward-backward scheme modified to prevent two-grid-internal noise and its application in sigma coordinate models. Contrib. Atmos. Phys., 52, 69-84.

JANJIC, Z.I., 1984: Nonlinear advection schemes and energy cascade on semi-staggered grids. Mon. Wea. Rev., 112, 1234- 1245.

JANJIC, Z.I., 1994: The step-mountain Eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sub-layer and turbulence closure schemes. Mon Weather Rev 122:927–945.

JANJIC, Z.I., 2002: Nonsingular Implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model. NCEP Office Note. No. 437, 61 pp.

IPCC, **Cambridge Univ. Press.** 2007

IPCC, Cambridge Univ. Press. 2013

Kain, J.S., 2004: The Kain–Fritsch convective parameterization: an update. *J Appl Meteor* 43:170–181.

LACIS, A. A., e J. E. HANSEN., 1974: A parameterization of the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 31, 118-133.

Lucas et al., (2009) **Modelagem Hidrológica Determinística e Estocástica Aplicada à Região Hidrográfica do Xingu** – Pará - Revista Brasileira de Meteorologia.

MARENGO J. A. (2008), **Water and Climate Change. Estudos Avançados** (USP.Impresso), v. 22, p. 83-96.

MARENGO, J.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, LM.; PESQUERO, JF.; SOARES, WR.; SANTOS, DC.; LYRA, A.A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, DJ.; GOMES, JL.; BUSTAMANTE, JF.; TAVARES, P. (2011a), **Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. Climate Dynamics**, 38:1829–1848. DOI 10.1007/s00382-011-1155-5

MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; RODRIGUEZ, D. A. (2011b), **The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. Geophysical Research Letters**, v. 38, L12703, doi:10.1029/2011gl047436

MARENGO, J. A.; BETTS, R. (Coords.) *et al.* (2011c), **Riscos das Mudanças Climáticas no Brasil: Análise Conjunta Brasil-Reino Unido sobre os Impactos das Mudanças Climáticas e do Desmatamento na Amazônia**. Disponível em <http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/pdf/relatorio_port.pdf>.

MELLOR, G.L, YAMADA, T, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev Geophys Space Phys* 20:851–875.