

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

**IMPACTO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE O REGIME DE VAZÕES E A**  
**GERAÇÃO HIDRELÉTRICA DE ENERGIA**

**THIAGO BALISA SANTANA**

**Itajubá, Agosto de 2013**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Thiago Balisa Santana**

**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 como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.*

**Área de Concentração:** Exploração do Uso Racional de Recursos Naturais e Energia.

**Orientador:** Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva

**Coorientador:** Prof. Dr. Afonso Henriques Moreira Santos

**Agosto de 2013**  
**Itajubá**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –  
Bibliotecária Jacqueline Balducci- CRB\_6/1672

S232i

Santana, Thiago Balisa

Impacto de mudanças climáticas sobre o regime de vazões  
e a geração hidrelétrica de energia / Thiago Balisa Santana. –  
Itajubá, (MG) : [s.n.], 2013.

135 p. il.

Orientador: Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva.

Coorientador: Prof. Dr. Afonso Henriques Moreira Santos.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Mudanças climáticas. 2. Modelo hidrológico (MGB).  
3. Energia assegurada em Pequenas Centrais Hidrelétricas.  
(PCHs). I. Silva, Benedito Cláudio da, orient. II. Santos, Afonso  
Henriques Moreira, coorient. III. Universidade Federal de Itajubá.  
IV. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**  
**EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Thiago Balisa Santana**

**IMPACTO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE O REGIME DE VAZÕES E A  
GERAÇÃO HIDRELÉTRICA DE ENERGIA**

*Dissertação aprovada por banca examinadora em  
29 de agosto de 2013, conferido ao autor  
de **Mestre em Ciências em Engenharia de  
Energia.***

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva(Orientador)

Prof.Dr. Afonso Henriques Moreira Santos (Coorientador)

Prof. Dr. Luz Adriana Cuartas Pineda

Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho

**Itajubá, Agosto de 2013.**

# AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por estar me abençoado sempre, pela saúde, sabedoria e paciência durante todo esse tempo. Gostaria de agradecer toda a minha família, especialmente aos meus pais, meu irmão e minha esposa pelo apoio desde o início desta jornada.

Gostaria de agradecer o meu orientador Professor Benedito, pela ajuda e pelo contato quase que diariamente durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também ao Professor Afonso Santos pela coorientação, pela ajuda e apoio no desenvolvimento do trabalho em geral.

Gostaria de agradecer a todos os professores do Mestrado em Engenharia de Energia e do pessoal do Excen e da IX.

Gostaria de agradecer ao CPTEC/INPE, especialmente ao Javier, Daniel, Lincoln e a Chou pela disponibilização dos dados do modelo Eta, pois sem eles não seria possível a realização deste trabalho.

E finalmente gostaria de agradecer a CAPES pelo auxílio financeiro, através de uma bolsa de estudos.

# RESUMO

A geração de energia elétrica no Brasil depende, essencialmente, da vazão nos rios. Esta vazão, por sua vez, é resultado de características das bacias hidrográficas, do clima, e apresenta grande variabilidade temporal, o que afeta o planejamento energético em longo prazo. Em razão do aumento das evidências de cenários de mudanças climáticas, apontado por diversos estudos internacionais, torna-se cada vez mais importante o desenvolvimento de ferramentas que sejam capazes de identificar tais mudanças no comportamento climático. Modelos atmosféricos de previsão climática têm sido aperfeiçoados sistematicamente ao longo dos anos, incorporando outros sistemas, como a acoplagem com modelos oceânicos, que podem melhorar as previsões quanto a possíveis alterações no clima futuro. Dessa forma, esse trabalho de dissertação consistiu em analisar quais seriam os impactos das possíveis mudanças no clima sobre as séries de vazões na bacia hidrográfica do rio São Francisco e na produção de energia em Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs). Essa análise foi realizada a partir do ajuste de um modelo hidrológico (Modelo de Grandes Bacias – MGB) na bacia de estudo, alimentado pelas projeções climáticas futuras, geradas pelo modelo atmosférico regional Eta desenvolvido pelo CPTEC/INPE. Foram escolhidos dois membros do modelo Eta, um membro com menor (M2) e um com maior (M4) sensibilidade a variação da temperatura média global futura. Apenas em algumas regiões e nos primeiros anos as projeções futuras apresentam um ligeiro aumento nas vazões médias, principalmente para o membro M2, ou o menos crítico. Porém de forma geral, as projeções futuras de ambos os membros apontam reduções nas vazões em diferentes partes da bacia do rio São Francisco ao longo do século XXI. No caso mais crítico (membro M4), as projeções para final do século XXI apontam reduções nas vazões acima de 40% em relação ao período observado, na região mais baixa da bacia, próxima a foz. As projeções futuras apontam um aquecimento médio da bacia que varia de 1 a 1.5 °C a cada 30 anos. Chegando a um aquecimento de 3.6 a 5.7 °C no final do século. O aumento na temperatura média afeta diretamente no balanço hidrológico, como na evaporação e na evapotranspiração. Como consequência disso, a geração de energia nas PCHs segue a mesma tendência das vazões médias e sofre grandes reduções ao longo do século. As projeções futuras da energia, assegurada nos quatro empreendimentos analisados, apontam uma redução ao longo do tempo. As usinas garantirão cerca de 30% de energia a menos, se comparadas à capacidade atual, chegando a quase 50% de redução no pior caso. A situação da bacia do rio São Francisco é preocupante caso as projeções futuras do modelo Eta venham a se concretizar. Com o aumento natural da demanda de energia atrelado ao crescimento econômico, a redução na energia assegurada, mesmo sendo pequena, pode significar na inviabilização do projeto.

**Palavras-chave:** Mudanças climáticas, Modelo hidrológico (MGB) e Energia assegurada em Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs).

# ABSTRACT

The generation of electricity in Brazil depends essentially on the flow in the rivers. This flow, in turn, is the result of watershed characteristics, climate, and shows great temporal variability, which affects the long-term energy planning. Due to the increasing evidence of climate change scenarios, pointed out by several international studies, it becomes increasingly important to develop tools that are able to identify such changes in climate behavior. Atmospheric models for climate prediction have been systematically improved over the years, incorporating other systems, such as coupling with ocean models, which can improve predictions about possible future changes in climate. Thus, this dissertation work was to analyze what are the possible impacts of climate change on streamflow series in the basin of the São Francisco River and the production of energy for Small Hydropower Plant (SHP). This analysis was performed after adjustment of a hydrological model (Model for Large Basins – MLB or MGB) in the basin of study, fueled by future climate projections generated by the Eta regional atmospheric model developed by CPTEC / INPE. There were chosen two members of the Eta model, a member with low (M2) and one with high (M4) sensitivity variation of future global average temperature. Only in some regions and early future projections show a slight increase in average flow rates, especially for member M2, or less critical. But in general, future projections of both members show reductions in flow rates in different parts of the São Francisco basin along the XXI century. In the most critical case (member M4), the projections for the end of the twenty-first century point reductions in flow rates above 40% over the period observed in the lower basin, near the river mouth. Future projections indicate an average warming of the basin ranging from 1 to 1.5 °C every 30 years. Reaching a heating of 3.6 to 5.7 °C by the end of the century. The increase in the average temperature directly affects the water balance, such as evaporation and evapotranspiration. As a result, the generation of electricity in power plants follows the same trend of the average flow rate and suffers large reductions throughout the century. Future projections of energy, assured the four hydroelectric projects analyzed, indicated reductions over time. The hydroelectric projects ensure about 30% less energy when compared to the current capacity, reaching almost 50% reductions in the worst case. The situation of the São Francisco is worrying if future projections of the Eta model will be realized. With the natural increase in energy demand linked to economic growth, the reduction in the assured energy, even if small, can mean the unfeasibility of the project.

**Keywords:** Climate Change, Hydrologic Model (MGB) and Assured Energy on Small Hydropower Plant (SHP).

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS	15
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
<b>2</b>	<b>MUDANÇAS CLIMÁTICAS</b>	<b>17</b>
2.1	CONCEITUAÇÃO	17
2.2	CENÁRIOS DE EMISSÕES	20
2.3	MODELOS COMPUTACIONAIS DE SIMULAÇÃO DO CLIMA	23
2.3.1	<i>Modelos de Circulação Geral (GCM)</i>	23
2.3.2	<i>Modelos globais adotados pelo IPCC</i>	26
2.3.3	<i>Modelos regionais</i>	28
2.4	CENÁRIOS SOBRE A AMÉRICA DO SUL	30
<b>3</b>	<b>IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS</b>	<b>37</b>
3.1	CONHECIMENTOS ATUAIS	37
3.2	IMPACTOS NA COBERTURA DO SOLO	37
3.3	IMPACTOS NOS RECURSOS HÍDRICOS	40
3.3.1	<i>Impactos em Bacias-Hidrográficas no Mundo</i>	41
3.3.2	<i>Impactos em Bacias-Hidrográficas no Brasil</i>	46
<b>4</b>	<b>ENERGIA ASSEGURADA DE PCH'S</b>	<b>52</b>
4.1	CONCEITOS BÁSICOS	52
4.2	MECANISMO DE REALOCAÇÃO DE ENERGIA (MRE)	53
4.3	LEGISLAÇÃO SOBRE ENERGIA ASSEGURADA	55
4.4	DETERMINAÇÃO DA ENERGIA ASSEGURADA DE UMA UHE	55
4.5	DETERMINAÇÃO DA ENERGIA ASSEGURADA DE UMA PCH	57
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>58</b>
5.1	REVISÃO DO AJUSTE DO MODELO HIDROLÓGICO MGB PARA A BACIA	60
5.2	PERTURBAÇÃO NA PRECIPITAÇÃO OBSERVADA	62
5.2.1	<i>Verificação dos cenários do Eta</i>	63
5.2.2	<i>Análise das curvas de probabilidade</i>	63
5.2.3	<i>Perturbando a precipitação observada</i>	64
5.3	PERTURBAÇÃO NA TEMPERATURA MÉDIA MENSAL OBSERVADA	67
5.4	GERAÇÕES DOS CENÁRIOS DE VAZÕES FUTURAS	68
5.5	ANÁLISE DA ENERGIA ASSEGURADA	68
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>73</b>
6.1	ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MODELO ETA NA REPRESENTAÇÃO DO CLIMA ATUAL	73
6.2	PRECIPITAÇÃO PERTURBADA	76

6.3	TEMPERATURA MÉDIA MENSAL PERTURBADA.....	82
6.4	CENÁRIOS DE VAZÃO FUTURA.....	84
6.4.1	<i>Cenário futuro da vazão - Precipitação</i> .....	85
6.4.2	<i>Cenário futuro da vazão – Variação da Temperatura Média</i> .....	97
6.4.3	<i>Cenário futuro da vazão – Combinando os Efeitos da Temperatura e Precipitação</i> .....	99
6.5	ANÁLISE DA ENERGIA ASSEGURADA FUTURA.....	110
6.5.1	<i>Aproveitamento A</i> .....	111
6.5.2	<i>Aproveitamento B</i> .....	115
6.5.3	<i>Aproveitamento C</i> .....	118
6.5.4	<i>Aproveitamento D</i> .....	121
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>126</b>
7.1	CONCLUSÕES.....	126
7.2	RECOMENDAÇÕES.....	129
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>130</b>

# LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. CONCENTRAÇÕES ATMOSFÉRICAS DE DIÓXIDO DE CARBONO, METANO E ÓXIDO NITROSO AO LONGO DOS ÚLTIMOS 10.000 ANOS (PAINÉIS GRANDES) E DESDE 1750 (PAINÉIS INSERIDOS). AS MEDIÇÕES SÃO OBTIDAS A PARTIR DE TESTEMUNHOS DE GELO.....	19
FIGURA 2. CENÁRIOS DE EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA USADO PELO IPCC PARA GERAR CENÁRIOS FUTUROS DE CLIMA.....	22
FIGURA 3. ESBOÇO DA DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL DOS MODELOS GLOBAIS, GRADE SOBRE A GRÃ-BRETANHA. ....	24
FIGURA 4. INTERAÇÕES ENTRE ATMOSFERA, OCEANOS E CONTINENTES, REPRESENTADAS PELOS MODELOS GLOBAIS. ....	24
FIGURA 5. REPRESENTAÇÃO DA TOPOGRAFIA POR UM MODELO GLOBAL COM GRADE DE 200 KM, COMPARADA COM A TOPOGRAFIA REAL OBSERVADA NO OESTE DOS EUA. ....	25
FIGURA 6. EVOLUÇÃO DO AUMENTO DA COMPLEXIDADE DOS MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS.....	27
FIGURA 7. EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DA TÉCNICA DE "DOWNSCALING" DE MODELOS GLOBAIS PARA DIFERENTES REGIÕES DO GLOBO, REGIÃO DO CANADÁ (A) E PARA A EUROPA (B) .....	29
FIGURA 8. DISTRIBUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO (MM/DIA): MODELO HADRM3P (RCM), OBSERVADA (CRU), E A DIFERENÇA ENTRE OS DOIS (BIAS); VERÃO (A) E INVERNO (B). ....	32
FIGURA 9. TEMPERATURA DO AR EM °C, PROJETADA PARA O PERÍODO DE 2071 A 2100 PARA O CENÁRIO A2 (FIGURAS DE A ATÉ I); ALTERAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO EM % SOBRE A AMÉRICA DO SUL NO MESMO PERÍODO PARA O CENÁRIO A2 (FIGURAS DE J ATÉ R). DADOS CLIMÁTICOS DOS MODELOS ESTÃO EM ANUAIS, VERÃO (DJF) E INVERNO (JJA).....	33
FIGURA 10. MUDANÇAS NO PADRÃO DA PRECIPITAÇÃO (A-F), TEMPERATURA (G-L) E A DIFERENÇA ENTRE PRECIPITAÇÃO E EVAPORAÇÃO (M-R). SIMULADAS PELO MODELO ETA PARA O CENÁRIO A1B SOBRE A AMÉRICA DO SUL. ....	36
FIGURA 11. VARIAÇÃO PERCENTUAL DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL PARA OS 23 MODELOS GLOBAIS DO IPCC SOBRE A BACIA DOS RIOS MURRAY-DARLING AUSTRÁLIA. ....	42
FIGURA 12. PROJEÇÕES CLIMÁTICAS PARA AS VAZÕES MÉDIAS MENSAS PARA OS RIOS XIANGXI E HUANGFUCHUAN NA CHINA. COMPARAÇÃO ENTRE OS CENÁRIOS DE EMISSÕES PARA O MODELO HADCM3 (A) E COMPARAÇÃO DOS MODELOS GLOBAIS PARA O CENÁRIO A1B (B). ....	43
FIGURA 13. COMPARAÇÃO DA VAZÃO MÉDIA MENSAL ENTRE DIVERSOS MODELOS CLIMÁTICOS, PARA UM CENÁRIO DE 2°C DE AQUECIMENTO GLOBAL (A); VARIAÇÃO DA VAZÃO MÉDIA MENSAL SIMULADA PELO MODELO HADCM3, CONSIDERANDO VÁRIOS CENÁRIOS DE AQUECIMENTO GLOBAL, VARIANDO DE 1 A 6°C (B). PARA VÁRIOS RIOS DO REINO UNIDO. ....	46
FIGURA 14. COMPARAÇÃO ENTRE AS CPV'S DOS MODELOS CLIMÁTICOS COM O CLIMA PRESENTE. CURVAS COM AS MUDANÇAS DA VAZÃO SOB OS EFEITOS DO CENÁRIO DE EMISSÃO A1B (A). E EM (B) OS MODELOS ESTÃO SOB O CENÁRIO DE AQUECIMENTO GLOBAL DE 2°C.....	49
FIGURA 15. MUDANÇAS CLIMÁTICAS PROJETADAS SOBRE O BRASIL E AS BACIAS-HIDROGRÁFICAS AMAZÔNICA, SÃO FRANCISCO E PARANÁ EM RELAÇÃO AO CLIMA PRESENTE (1960-1990), COM DESTAQUE NA REDUÇÃO DA PRECIPITAÇÃO NAS BACIAS AO LONGO DO SÉCULO XXI.....	50
FIGURA 16. EXEMPLO DE UM QUADRO TÍPICO DE GERAÇÃO DE UMA UHE DA REGIÃO SUDESTE/NORDESTE. ....	54
FIGURA 17. FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DA METODOLOGIA ADOTADA. ....	60
FIGURA 18. ILUSTRAÇÃO DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO, INTERPRETADA PELO MODELO HIDROLÓGICO MGB, DETALHE NAS SUB-BACIAS COMPOSTAS POR CÉLULAS REGULARES E NA REDE DE DRENAGEM RETILÍNEA SIMPLIFICADA. ....	61
FIGURA 19. HIDROGRAMAS CALCULADOS E OBSERVADOS DO RIO SÃO FRANCISCO PARA A SUB-BACIA DE MORPARÁ. COMPARAÇÃO DOS DADOS DA CALIBRAÇÃO (A) E COMPARAÇÃO DOS DADOS DA VALIDAÇÃO (B). ....	62
FIGURA 20. COMPARAÇÃO DA PERMANÊNCIA DAS PRECIPITAÇÕES MÉDIAS DO MODELO ETA. ANÁLISE PARA O MÊS DE MARÇO NOS PERÍODOS DE 1961-1990 E 2041-2070, NOS DOIS MEMBROS DO MODELO ETA. DADOS REFERENTES A BACIA AFLUENTE AO POSTO FLUVIOMÉTRICO SÃO FRANCISCO. ....	64
FIGURA 21. LOCALIZAÇÃO DOS APROVEITAMENTOS ANALISADOS NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO. ....	70
FIGURA 22. COMPARAÇÃO ENTRE A SAZONALIDADE DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL OBSERVADA E AS SAZONALIDADES GERADAS PELOS MEMBROS DO MODELO ETA. COMPARAÇÕES SOBRE A PARTE ALTA (A) E AS PARTES MÉDIA E BAIXA (B) DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO PARA O PERÍODO DE 1961 A 1990. ....	74
FIGURA 23. COMPARAÇÃO ENTRE A SAZONALIDADE DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL OBSERVADA E AS SAZONALIDADES GERADAS PELOS MEMBROS DO MODELO ETA. COMPARAÇÕES SOBRE A PARTE ALTA (A), (C)	

E (F) E AS PARTES MÉDIA E BAIXA (B), (D) E (F) DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO PARA OS PERÍODOS FUTUROS (2011-2040, 2041-2070 E 2071-2099).	75
FIGURA 24. COMPARAÇÃO ENTRE A PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL OBSERVADA NO PERÍODO 1961 A 1990 E AS MODIFICAÇÕES OBTIDAS COM BASE NOS CENÁRIOS FUTUROS DO ETA (2011-2040 (A) E (B), 2041-2070 (C) E (D), E 2071-2099 (E) E (F)), EM VALORES MÉDIOS NA PARTE ALTA DA BACIA (A), (C) E (E) E NAS PARTES MÉDIA E BAIXA DA BACIA (B), (D) E (F).	77
FIGURA 25. VARIAÇÕES ENTRE AS PROJEÇÕES FUTURAS DAS PRECIPITAÇÕES COM AS DO CLIMA ATUAL. DADOS REFERENTES AO PERÍODO ÚMIDO (DJF), SECO (JJA) E MÉDIA ANUAL. PROJEÇÕES PARA O PERÍODO DE 2011 A 2040.	79
FIGURA 26. VARIAÇÕES ENTRE AS PROJEÇÕES FUTURAS DAS PRECIPITAÇÕES COM AS DO CLIMA ATUAL. DADOS REFERENTES AO PERÍODO ÚMIDO (DJF), SECO (JJA) E MÉDIA ANUAL. PROJEÇÕES PARA O PERÍODO DE 2041 A 2070.	80
FIGURA 27. VARIAÇÕES ENTRE AS PROJEÇÕES FUTURAS DAS PRECIPITAÇÕES COM AS DO CLIMA ATUAL. DADOS REFERENTES AO PERÍODO ÚMIDO (DJF), SECO (JJA) E MÉDIA ANUAL. PROJEÇÕES PARA O PERÍODO DE 2041 A 2070.	81
FIGURA 28. DIFERENTES NÍVEIS DE AQUECIMENTO NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO, EM RELAÇÃO À MÉDIA OBSERVADA. PROJEÇÕES FUTURAS, DE ACORDO COM OS DOIS MEMBROS DO MODELO ETA, PARA TODOS OS PERÍODOS FUTUROS ANALISADOS.	84
FIGURA 29. COMPARAÇÃO ENTRE A VAZÃO MÉDIA OBSERVADA (MGB) E AS PROJEÇÕES DAS VAZÕES MÉDIAS FUTURAS, CONSIDERANDO APENAS A ALTERAÇÃO NA PRECIPITAÇÃO, DE ACORDO COM OS DOIS MEMBROS DO MODELO ETA. VAZÕES AFLUENTES A USINA DE TRÊS MARIAS. (A) 2011 A 2040, (B) 2041 A 2070, (C) 2071 A 2099.	86
FIGURA 30. CURVAS DE PERMANÊNCIA DAS VAZÕES MÉDIAS OBSERVADAS (MGB) E AS PROJEÇÕES FUTURAS, CONSIDERANDO APENAS A ALTERAÇÃO NA PRECIPITAÇÃO. VAZÕES AFLUENTES A USINA DE TRÊS MARIAS. (A) 2011 A 2040, (B) 2041 A 2070, (C) 2071 A 2099.	89
FIGURA 31. COMPARAÇÃO ENTRE A VAZÃO MÉDIA OBSERVADA (MGB) E AS PROJEÇÕES DAS VAZÕES MÉDIAS FUTURAS AFLUENTES AO POSTO FLUVIOMÉTRICO EM MORPARÁ, CONSIDERANDO APENAS A ALTERAÇÃO NA PRECIPITAÇÃO, (A) 2011 A 2040; (B) 2041 A 2070; (C) 2071 A 2099.	90
FIGURA 32. CURVAS DE PERMANÊNCIA DAS VAZÕES MÉDIAS OBSERVADAS (MGB) E AS PROJEÇÕES FUTURAS, CONSIDERANDO APENAS A ALTERAÇÃO NA PRECIPITAÇÃO. VAZÕES AFLUENTES AO POSTO FLUVIOMÉTRICO DE MORPARÁ. (A) 2011 A 2040, (B) 2041 A 2070, (C) 2071 A 2099.	93
FIGURA 33. COMPARAÇÃO ENTRE A VAZÃO MÉDIA OBSERVADA E AS PROJEÇÕES DAS VAZÕES MÉDIAS FUTURAS, CONSIDERANDO APENAS A ALTERAÇÃO NA PRECIPITAÇÃO, DE ACORDO COM OS DOIS MEMBROS DO MODELO ETA. VAZÕES AFLUENTES AO COMPLEXO DE USINAS DE PAULO AFONSO E MOXOTÓ. (A) 2011 A 2040, (B) 2041 A 2070, (C) 2071 A 2099.	94
FIGURA 34. CURVAS DE PERMANÊNCIA DAS VAZÕES MÉDIAS OBSERVADAS (MGB) E AS PROJEÇÕES FUTURAS, CONSIDERANDO APENAS A ALTERAÇÃO NA PRECIPITAÇÃO. VAZÕES AFLUENTES AO COMPLEXO DE USINAS DE PAULO AFONSO E MOXOTÓ. (A) 2011 A 2040, (B) 2041 A 2070, (C) 2071 A 2099.	96
FIGURA 35. COMPARAÇÃO ENTRE A VAZÃO MÉDIA MENSAL OBSERVADA (MGB) COM AS PROJEÇÕES DAS VAZÕES MÉDIAS FUTURAS, SOB O EFEITO DO AUMENTO DAS TEMPERATURAS MÉDIAS FUTURAS. DADOS REFERENTES À FOZ DO MODELO HIDROLÓGICO.	98
FIGURA 36. COMPARAÇÃO ENTRE A VAZÃO MÉDIA MENSAL OBSERVADA (MGB) COM AS PROJEÇÕES DAS VAZÕES MÉDIAS FUTURAS SOB OS EFEITOS DA COMBINAÇÃO DA TEMPERATURA E A PRECIPITAÇÃO, PARA AMBOS OS MEMBROS DO MODELO ETA. VAZÕES AFLUENTES À USINA DE TRÊS MARIAS. (A) 2011 A 2040, (B) 2041 A 2070, (C) 2071 A 2099.	100
FIGURA 37. CURVAS DE PERMANÊNCIA DAS VAZÕES MÉDIAS OBSERVADAS (MGB) E AS PROJEÇÕES DAS VAZÕES FUTURAS, SOB OS EFEITOS DA COMBINAÇÃO DA TEMPERATURA E A PRECIPITAÇÃO, PARA AMBOS OS MEMBROS DO MODELO ETA. VAZÕES AFLUENTES DA USINA DE TRÊS MARIAS. (A) 2011 A 2040, (B) 2041 A 2070, (C) 2071 A 2099.	101
FIGURA 38. COMPARAÇÃO ENTRE A VAZÃO MÉDIA MENSAL OBSERVADA (MGB) COM AS PROJEÇÕES DAS VAZÕES MÉDIAS FUTURAS SOB OS EFEITOS DA COMBINAÇÃO DA TEMPERATURA E A PRECIPITAÇÃO, PARA AMBOS OS MEMBROS DO MODELO ETA. VAZÕES AFLUENTES AO POSTO FLUVIOMÉTRICO DE MORPARÁ. (A) 2011 A 2040, (B) 2041 A 2070, (C) 2071 A 2099.	103
FIGURA 39. CURVAS DE PERMANÊNCIA DAS VAZÕES MÉDIAS OBSERVADAS (MGB) E AS PROJEÇÕES DAS VAZÕES FUTURAS, SOB OS EFEITOS DA COMBINAÇÃO DA TEMPERATURA E A PRECIPITAÇÃO, PARA AMBOS OS MEMBROS DO MODELO ETA. VAZÕES AFLUENTES AO POSTO FLUVIOMÉTRICO DE MORPARÁ. (A) 2011 A 2040, (B) 2041 A 2070, (C) 2071 A 2099.	104
FIGURA 40. COMPARAÇÃO ENTRE A VAZÃO MÉDIA MENSAL OBSERVADA (MGB) COM AS PROJEÇÕES DAS VAZÕES MÉDIAS FUTURAS SOB OS EFEITOS DA COMBINAÇÃO DA TEMPERATURA E A PRECIPITAÇÃO, PARA AMBOS OS	

MEMBROS DO MODELO ETA. VAZÕES AFLUENTES AO COMPLEXO DE USINAS DE PAULO AFONSO E MOXOTÓ. (A) 2011 A 2040, (B) 2041 A 2070, (C) 2071 A 2099.....	106
FIGURA 41. CURVAS DE PERMANÊNCIA DAS VAZÕES MÉDIAS OBSERVADAS (MGB) E AS PROJEÇÕES DAS VAZÕES FUTURAS, SOB OS EFEITOS DA COMBINAÇÃO DA TEMPERATURA E A PRECIPITAÇÃO, PARA AMBOS OS MEMBROS DO MODELO ETA. VAZÕES AFLUENTES AO COMPLEXO DE USINAS DE PAULO AFONSO E MOXOTÓ. (A) 2011 A 2040, (B) 2041 A 2070, (C) 2071 A 2099.....	107
FIGURA 42. COMPARAÇÃO ENTRE AS SIMULAÇÕES DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO NO APROVEITAMENTO A. SIMULAÇÕES FEITAS COM OS DADOS OBSERVADOS (MGB) E COM AS PROJEÇÕES FUTURAS DO MODELO ETA. (A) 2011 A 2040, (B) 2041 A 2071 E (C) 2071 A 2099.....	113
FIGURA 43. SIMULAÇÃO DA VARIAÇÃO DO RENDIMENTO DA TURBINA EM RELAÇÃO À PORCENTAGEM DO TEMPO DE USO. BEM COMO O NÚMERO DE MÁQUINAS EM OPERAÇÃO, QUE VARIAM DE ACORDO COM A VAZÃO DISPONÍVEL. OS DADOS SÃO RELATIVOS ÀS PROJEÇÕES FUTURAS DO MEMBRO M4 DO MODELO ETA, PARA O PERÍODO DE 2071 A 2099.....	114
FIGURA 44. COMPARAÇÃO ENTRE AS SIMULAÇÕES DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO NO APROVEITAMENTO B. SIMULAÇÕES FEITAS COM OS DADOS OBSERVADOS (MGB) E COM AS PROJEÇÕES FUTURAS DO MODELO ETA. (A) 2011 A 2040, (B) 2041 A 2071 E (C) 2071 A 2099.....	117
FIGURA 45. COMPARAÇÃO ENTRE AS SIMULAÇÕES DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO NO APROVEITAMENTO C. SIMULAÇÕES FEITAS COM OS DADOS OBSERVADOS (MGB) E COM AS PROJEÇÕES FUTURAS DO MODELO ETA. (A) 2011 A 2040, (B) 2041 A 2071 E (C) 2071 A 2099.....	120
FIGURA 46. COMPARAÇÃO ENTRE AS SIMULAÇÕES DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO NO APROVEITAMENTO D. SIMULAÇÕES FEITAS COM OS DADOS OBSERVADOS (MGB) E COM AS PROJEÇÕES FUTURAS DO MODELO ETA. (A) 2011 A 2040, (B) 2041 A 2071 E (C) 2071 A 2099.....	123

# LISTA DE TABELAS

TABELA 1. MODELOS GLOBAIS UTILIZADOS PELO IPCC-AR4, COM SUAS RESPECTIVAS RESOLUÇÕES. ....	28
TABELA 2. DIFERENÇAS ENTRE AS VAZÕES SIMULADAS PARA O CLIMA FUTURO COM UM AQUECIMENTO DE 2°C EM RELAÇÃO À VAZÃO DO CLIMA PRESENTE. ....	44
TABELA 3. VARIAÇÃO PERCENTUAL DA VAZÃO MÉDIA DOS CENÁRIOS FUTUROS PARA DIFERENTES PROBABILIDADES NA FOZ DO RIO TOCANTINS, EM RELAÇÃO AO CLIMA PRESENTE. ....	47
TABELA 4. VARIAÇÕES NAS VAZÕES E ENERGIAS FUTURAS SEGUNDO PROJEÇÕES DO MODELO PRECIS, PARA O PERÍODO DE 2071 A 2100. ....	51
TABELA 5. COMPARAÇÃO EM TERMOS PORCENTUAIS ENTRE AS PROJEÇÕES FUTURAS DAS PRECIPITAÇÕES COM A PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL OBSERVADA. PARA AS PARTES ALTA, MÉDIA E BAIXA DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO. ....	76
TABELA 6. VARIAÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA MENSAL, ENTRE AS PROJEÇÕES FUTURAS EM RELAÇÃO À OBSERVADA. PROJEÇÕES FEITAS PELOS DOIS MEMBROS DO MODELO ETA. ....	83
TABELA 7. DIFERENÇAS EM PORCENTAGEM ENTRE AS PROJEÇÕES DAS VAZÕES EXTREMAS E MEDIANAS COM RELAÇÃO ÀS OBSERVADAS (MGB). PROJEÇÕES REFERENTES ÀS VAZÕES AFLUENTES DA USINA DE TRÊS MARIAS. ....	87
TABELA 8. DIFERENÇAS EM PORCENTAGEM ENTRE AS VAZÕES EXTREMAS E MEDIANAS OBSERVADAS (MGB) E AS PROJEÇÕES FUTURAS, AFLUENTE AO POSTO FLUVIOMÉTRICO DE MORPARÁ. ....	91
TABELA 9. DIFERENÇAS EM PORCENTAGEM ENTRE AS PROJEÇÕES DAS VAZÕES EXTREMAS E MEDIANAS COM RELAÇÃO ÀS OBSERVADAS (MGB) PROJEÇÕES REFERENTES ÀS VAZÕES AFLUENTES AO COMPLEXO DE USINAS DE PAULO AFONSO E MOXOTÓ. ....	95
TABELA 10. DIFERENÇAS, EM TERMOS PORCENTUAIS, ENTRE AS VAZÕES MÉDIAS OBSERVADAS (MGB) E AS PROJEÇÕES DAS VAZÕES FUTURAS, CONSIDERANDO AS VARIAÇÕES FUTURAS SOMENTE DA PRECIPITAÇÃO. AS VARIAÇÕES SÃO PARA DIFERENTES PARTES DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO. ....	97
TABELA 11. DIFERENÇAS, EM TERMOS PORCENTUAIS, ENTRE AS VAZÕES EXTREMAS E MEDIANAS OBSERVADAS (MGB) E AS PROJEÇÕES FUTURAS PARA OS DIFERENTES MEMBROS DO MODELO ETA. PROJEÇÕES REFERENTES ÀS VAZÕES AFLUENTES À USINA DE TRÊS MARIAS. ....	102
TABELA 12. DIFERENÇAS, EM TERMOS PORCENTUAIS, ENTRE AS VAZÕES EXTREMAS E MEDIANAS OBSERVADAS (MGB) E AS PROJEÇÕES FUTURAS PARA OS DIFERENTES MEMBROS DO MODELO ETA. PROJEÇÕES REFERENTES ÀS VAZÕES AFLUENTES AO POSTO FLUVIOMÉTRICO DE MORPARÁ. ....	105
TABELA 13. DIFERENÇAS, EM TERMOS PORCENTUAIS, ENTRE AS VAZÕES EXTREMAS E MEDIANAS OBSERVADAS (MGB) E AS PROJEÇÕES FUTURAS PARA OS DIFERENTES MEMBROS DO MODELO ETA. PROJEÇÕES REFERENTES ÀS VAZÕES AFLUENTES AO COMPLEXO DE USINAS DE PAULO AFONSO E MOXOTÓ. ....	108
TABELA 14. DIFERENÇAS, EM TERMOS PORCENTUAIS, ENTRE AS VAZÕES MÉDIAS OBSERVADAS (MGB) E AS PROJEÇÕES DAS VAZÕES FUTURAS, CONSIDERANDO AS VARIAÇÕES FUTURAS DA PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA. AS VARIAÇÕES SÃO PARA DIFERENTES PARTES DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO. ....	109
TABELA 15. INFORMAÇÕES BÁSICAS DOS APROVEITAMENTOS ESCOLHIDOS PARA ANÁLISE DA ENERGIA ASSEGURADA. ....	111
TABELA 16. DADOS ENERGÉTICOS SIMULADOS PARA O APROVEITAMENTO A. COMPARAÇÃO DAS ENERGIAS ASSEGURADAS OBSERVADA (MGB) COM AS PROJEÇÕES FUTURAS DOS DIFERENTES MEMBROS DO MODELO ETA. ....	115
TABELA 17. DADOS ENERGÉTICOS SIMULADOS PARA O APROVEITAMENTO B. COMPARAÇÃO DAS ENERGIAS ASSEGURADAS OBSERVADA (MGB) COM AS PROJEÇÕES FUTURAS DOS DIFERENTES MEMBROS DO MODELO ETA. ....	118
TABELA 18. DADOS ENERGÉTICOS SIMULADOS PARA O APROVEITAMENTO C. COMPARAÇÃO DAS ENERGIAS ASSEGURADAS OBSERVADA (MGB) COM AS PROJEÇÕES FUTURAS DOS DIFERENTES MEMBROS DO MODELO ETA. ....	121
TABELA 19. DADOS ENERGÉTICOS SIMULADOS PARA O APROVEITAMENTO D. COMPARAÇÃO DAS ENERGIAS ASSEGURADAS OBSERVADA (MGB) COM AS PROJEÇÕES FUTURAS DOS DIFERENTES MEMBROS DO MODELO ETA. ....	124

# LISTA DE SIMBOLOS

- A1, A2, B1 e B2 - Cenários de desenvolvimento global futuro
- Aneel - Agencia Nacional de Energia Elétrica
- AR4 – Fourth Assessment Report
- Bias - Erros sistemáticos
- CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
- CCPE - Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos
- CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
- CMO- custo marginal de operação médio anual
- CME - custo marginal de expansão
- CPTEC/INPE - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
- Delta - Variação entre as precipitações do período passado e a do futuro, ambas simuladas pelo modelo Eta
- $E_{\text{Assegurada}}$  - Energia assegurada
- $E_i$  - – Energia média do mês “i”
- $E_M$  - Energia média do período
- $E_M'$  - Energia média do período já considerando indisponibilidades
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética
- GCM - Global Climate Model
- $HI_{FI}$  - Horas de indisponibilidade forçada da unidade “i”
- $HI_{PI}$  - – Horas de indisponibilidade programada da unidade “i”
- HP - Total de horas do estudo
- IF – Parada forçada
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- $I_p$  - Indisponibilidade programada
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change
- Membro M2 - Membro do modelo Eta
- Membro M4 - Membro do modelo Eta
- MGB - Modelo de Grandes Bacias
- MME- Ministério de Minas e Energia
- MRE - Mecanismo de Realocação de Energia

ONS – Operador Nacional do Sistema

$P_{\text{célula(diária)-Perturbada}}$  - Precipitação diária perturbada de cada célula dentro da sub-bacia em análise

PCH - Pequena Central Hidrelétrica

$P_{\text{diária da célula}}$  - Precipitação diária de cada célula dentro da sub-bacia em análise

$P_{\text{diária}}$  - Precipitação diária observada sem alteração

$P_{\text{fut}}$  - Precipitação média mensal do Eta, para o período futuro

$P_{\text{inst}}$  - Potência instalada

$p_M$  - Produtibilidade média da PCH

$P_{\text{obs(diária)}}$  - Precipitação diária observada da sub-bacia em análise

$P_{\text{obs(diária)-Perturbada}}$  - Precipitação observada diária perturbada

$P_{\text{obs}}$  - Precipitação média mensal observada

$P_{\text{obs-perturbada}}$  - Precipitação média mensal observada com a perturbação

$Pot_i$  - Potência da unidade geradora “i”

$P_{\text{passado}}$  - Precipitação média mensal do Eta, para o período passado

$P_{\text{perturbada}}$  - Precipitação média mensal perturbada

$Q_{5\%}, Q_{10\%}, Q_{50\%}, Q_{95\%}$  - Vazões características

$Q_d$  - Vazão desviada

$Q_i$  - Vazão média do mês “i” do histórico

QRA - Quarto Relatório de Avaliação

RECE - Relatório de Especial sobre Cenários de Emissões

RCM - Regional Climate model

SAR - Segundo Relatório de Avaliação

SIN - Sistema Interligado Nacional

TEIF - Taxa equivalente de indisponibilidade forçada

TRA - Terceiro Relatório de Avaliação

UHE - Usina Hidrelétrica

# 1 INTRODUÇÃO

O sistema de produção de energia elétrica brasileiro utiliza a combinação de usinas hidrelétricas, centrais térmicas e outras fontes alternativas de geração de energia. A potência instalada em usinas hidrelétricas representa cerca de 70% do total (ANEEL, 2013). Esta forte dependência das hidrelétricas para produção de energia envolve importantes riscos de oferta, pois o insumo das usinas hidrelétricas é a vazão dos rios, que por sua vez é dependente do clima e de sua variabilidade temporal e espacial.

Quase todas as decisões tomadas no planejamento dos recursos hídricos possuem forte dependência do conhecimento antecipado das condições atmosféricas e hidrológicas, para diferentes escalas de tempo e espaço. (ONS, 2013).

A capacidade de antecipar as ocorrências de secas prolongadas, com vários meses ou anos secos, tem grande impacto sobre o planejamento de recursos hídricos; seja em atividades que atuem dentro ou fora do curso d'água. Em escalas de anos, ou mais, torna-se importante prever tendências climáticas regionais, tais como variações na temperatura, umidade do ar, precipitação, etc. Estas tendências podem auxiliar no planejamento e estabelecimento de políticas sobre recursos hídricos.

As simulações do clima no futuro são feitas primeiramente em escala global, por modelos climáticos ou modelos atmosféricos, que são modelos físicos tridimensionais que representam o movimento da mistura ar e vapor de água na atmosfera e as trocas de calor envolvido, sujeito a determinadas condições iniciais e de contorno. (FGDL, 2013).

Os modelos globais vêm evoluindo bastante nos últimos 10 anos, porém esses modelos têm uma resolução da ordem de dezenas a centenas de quilômetros. Com essa resolução de grade, normalmente os modelos globais são inadequados para representar as condições das bacias hidrográficas em que se desejam as previsões.

Uma solução encontrada para estes casos é a utilização de modelos regionais, ou seja, modelos que representam apenas uma parte do globo. Como eles possuem uma área menor é possível melhorar a resolução da grade do modelo, podendo variar de 4 a 100 quilômetros. Os modelos regionais geralmente são baseados em modelos globais, logo eles utilizam as mesmas condições de contorno calculadas pelos modelos de origem.

A energia assegurada do sistema elétrico brasileiro é a máxima produção de energia que pode ser mantida quase que continuamente pelas usinas hidrelétricas ao longo dos anos. Simulando a ocorrência de cada uma das milhares das possibilidades de sequências de vazões criadas estatisticamente, admitindo certo risco de não atendimento à carga, a operação cooperativa do parque gerador brasileiro foi historicamente adotada, visando garantir o uso eficiente de recursos energéticos no país. (ANEEL, 2005, 2013; ONS, 2013)

A determinação da energia assegurada independe da geração real e está associada às condições, em longo prazo, que cada usina pode fornecer ao sistema, assumindo um critério específico de risco do não atendimento do mercado (déficit), considerando principalmente a variabilidade hidrológica à qual a usina está submetida. Geralmente esse risco de não atendimento da carga é de 5%.

É importante para o investidor/proprietário ou o governo ter uma ideia de qual seria o comportamento ou a variação da energia assegurada no futuro de médio e longo prazo. Desta forma, em razão do aumento das evidências de cenários de mudanças climáticas, diversos estudos internacionais vêm simulando o comportamento do clima no futuro, por meio de modelos globais e regionais.

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação consiste em analisar os impactos de cenários de mudanças climáticas sobre os recursos hídricos e sobre a geração hidrelétrica de energia, mais especificamente na energia assegurada em pequenas centrais hidrelétricas (PCHs). A bacia hidrográfica a ser estudada é a bacia do rio São Francisco, que possui uma boa parcela da potência hidráulica instalada no país.

Para alcançar o objetivo geral foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Gerar séries de vazões influenciadas por cenários de mudanças climáticas a partir de modelos hidrológicos alimentados por projeções do modelo atmosférico regional Eta;
- Avaliar o impacto das mudanças climáticas sobre o comportamento das vazões e da geração de energia hidrelétrica, e
- Realizar estudo de caso sobre a bacia do rio São Francisco.

## 1.2 Estrutura do Trabalho

Para o desenvolvimento do presente estudo, decidiu-se dividi-lo em oito capítulos que buscam, individualmente, a consecução e explanação dos objetivos específicos, mas que no conjunto, permitem que se atinja o objetivo apresentado anteriormente.

Este capítulo faz a introdução do trabalho, apresentando a motivação que o originou, o objetivo geral que o norteou e a estruturação para ele definida.

O segundo capítulo faz uma apresentação dos conceitos atuais de mudanças climáticas, mostrando os cenários de emissões de gases de efeito estufa do IPCC, bem como os modelos computacionais, utilizados para a simulação dos efeitos desses cenários em diferentes escalas.

O terceiro capítulo apresenta alguns exemplos de estudos feitos ao longo dos últimos anos, evidenciando os impactos das mudanças climáticas sentidos em diversas partes do mundo e em diversas formas, como na agricultura, impactos na vegetação em geral, no regime hidrológico entre outros.

O quarto capítulo mostra a evolução da definição da energia assegurada, bem como a evolução da legislação que a rege, tanto para uma usina hidroelétrica (UHE) quanto para uma pequena central hidroelétrica (PCH).

A metodologia aplicada do presente trabalho encontra-se descrita no quinto capítulo, no qual os efeitos das mudanças climáticas futuras simulados pelo modelo Eta são avaliados, na forma de vazão.

No sexto capítulo fez-se um estudo de caso utilizando os dados de mudança climática na bacia do rio São Francisco, obtendo-se como resultado final a vazão do rio sob as condições do clima futuro.

O sétimo capítulo apresenta as conclusões do estudo e recomendações para estudos futuros.

No oitavo capítulo são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas.

## 2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

### 2.1 Conceituação

O Relatório de Avaliação do IPCC, que atualmente se encontra em sua quarta versão, descreve os avanços feitos na compreensão dos fatores humanos ou naturais que causam a mudança do clima, as observações da mudança do clima, processos climáticos e atribuição, e estimativas da mudança do clima projetada para o futuro. O termo *mudança do clima* usado pelo IPCC refere-se a qualquer alteração no clima ocorrida ao longo do tempo, devido à variabilidade natural ou decorrente da atividade humana. Baseia-se em avaliações feitas em pesquisas anteriores do IPCC e incorpora novas descobertas dos últimos anos (IPCC, 2007a).

A definição de mudanças climáticas do IPCC é diferente da convenção-Quatro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, em que o termo mudança do clima se refere a uma alteração no clima que seja atribuída direta ou indiretamente à atividade humana, alterando a composição da atmosfera global, e seja adicional à variabilidade natural do clima observada ao longo de períodos comparáveis de tempo.

Os avanços científicos feitos desde a publicação do Terceiro Relatório de Avaliação (TRA) baseiam-se em grandes quantidades de dados novos e mais abrangentes, análises mais sofisticadas e melhor compreensão dos processos, com simulação em diversos modelos e uma importante análise mais ampla das faixas de incerteza (IPCC, 2001).

As mudanças na quantidade de gases de efeito estufa e aerossóis da atmosfera, na radiação solar e nas propriedades da superfície terrestre alteram o equilíbrio energético do sistema climático (IPCC, 2007a). Essas mudanças são expressas em termos do forçamento radiativo que é usado para comparar a forma como os fatores humanos e naturais provocam o aquecimento ou o esfriamento do clima global, pois é uma medida da influência de um fator na alteração do equilíbrio da energia que entra e sai do sistema Terra-atmosfera, que é dada em  $Wm^2$ . (IPCC, 2007a).

Desde a publicação do TRA em 2001, novas observações e a respectiva modelagem dos gases de efeito estufa, atividade solar, propriedades da superfície terrestre e alguns aspectos dos aerossóis promoveram melhorias nas estimativas quantitativas do forçamento

radiativo. As concentrações atmosféricas globais de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso aumentaram bastante em consequência das atividades humanas desde 1750 e agora ultrapassam, em muito, os valores pré-industriais determinados com base em testemunhos de gelo de milhares de anos (Figura 1) (IPCC, 2013; IPCC, 2007a).

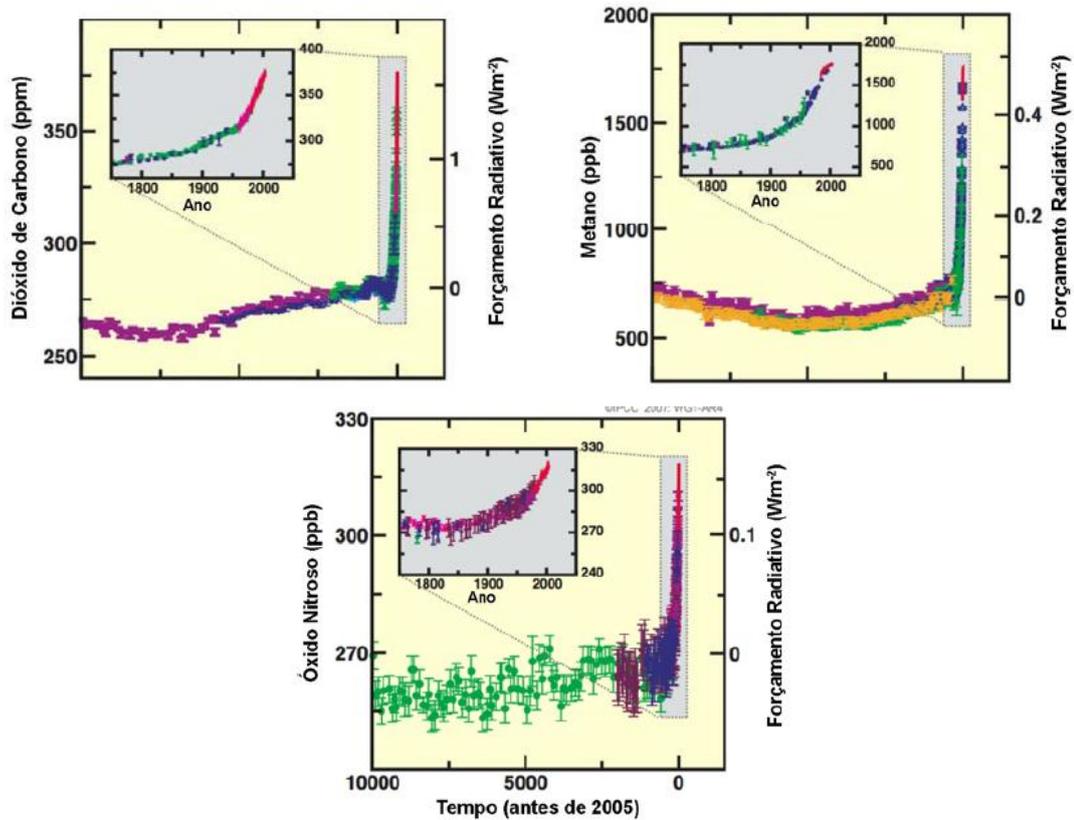
Os aumentos globais da concentração de dióxido de carbono se devem principalmente ao uso de combustíveis fósseis e à mudança no uso da terra. Já os aumentos da concentração de metano e óxido nitroso estima-se que são devidos principalmente à agricultura (IPCC, 2007a).

O aquecimento do sistema climático é inquestionável, como está agora evidente nas observações dos aumentos das temperaturas médias globais do ar e do oceano, do derretimento generalizado da neve, do gelo e da elevação do nível global médio do mar (IPCC, 2007a).

O período de 1995 a 2006, um ano antes da publicação do AR4, está entre os 12 anos mais quentes, desde o início do registro instrumental da temperatura da superfície global (1850). Esse período apresenta uma tendência linear de aumento, em média, de  $0,74^{\circ}\text{C}$  se for considerado os últimos 100 anos. O que significa ser uma tendência mais elevada do que a tendência correspondente para o período de 1901 a 2000, apresentado no TRA, de  $0,6^{\circ}\text{C}$ .

Tendências de longo prazo de 1900 a 2005 foram observadas na quantidade de precipitação em muitas das grandes regiões. Como por exemplo, a tendência de aumento significativo de precipitação foi observada em regiões como na parte leste da América do Norte e da América do Sul. Em contra partida observou-se que o clima ficou mais seco na região do Sahel, no Mediterrâneo, no sul da África e em partes do sul da Ásia, área essa altamente populosa e dependente das monções. A precipitação apresenta grande variabilidade em termos espaciais e temporais, e os dados são muito limitados em algumas regiões (IPCC, 2007c).

Observa-se que há um aumento nos eventos extremos, tanto no período chuvoso quanto na estação da seca. A frequência dos eventos extremos aumentou sobre a maior parte das áreas terrestres, de forma condizente com o aquecimento e os aumentos observados do vapor d'água atmosférico (IPCC, 2007; IPCC, 2013).



**Figura 1.** Concentrações atmosféricas de dióxido de carbono, metano e óxido nítrico ao longo dos últimos 10.000 anos (painéis grandes) e desde 1750 (painéis inseridos). As medições são obtidas a partir de testemunhos de gelo.

Fonte: IPCC (2007a)

Quando se trata de um assunto polêmico e cheio de incertezas, como o de mudanças climáticas, gera-se opiniões divergentes entre os próprios cientistas e a sociedade. Doran e Zimmerman (2009) estimam que mais de 90% dos cientistas climatologistas concordam que a atividade humana contribui para alguma alteração ou intensificação de algum fenômeno no clima global ou regional.

Segundo Whitmarsh (2011) uma boa parcela da sociedade britânica, principalmente as pessoas mais idosas e tradicionalistas, não acredita ou é indiferente aos estudos que mostram "supostas evidências" da mudança do clima. Um dos motivos apresentado por eles, e até mesmo por alguns climatologistas, é a grande incerteza nas previsões dos modelos globais.

Em um estudo mais recente Islam, Barnes e Toma (2013) reafirmam os estudos feitos por Whitmarsh (2011), entre outros, sobre as incertezas ou falta de credibilidade dos efeitos das mudanças climáticas. Porém a proporção de pessoas que afirma desacreditar nas mudanças climáticas corresponde a uma faixa bem menor.

Segundo Treut et al. (2008), a questão chave para o futuro dos modelos globais é até quando o aumento progressivo da resolução da grade, bem como, o número de parametrizações, na melhoria da representação física dos fenômenos climáticos poderá melhorar a sensibilidade climática do modelo, como a formação de nuvens em baixas altitudes, por exemplo. Esse e outros tipos de problemas, limitações e incertezas levantam dúvida sobre a real situação do clima global, ou seja, se realmente haverá ou já está acontecendo mudanças drásticas no clima em um espaço curto de tempo.

## **2.2 Cenários de Emissões**

Logo após a publicação do Segundo Relatório de Avaliação (SAR) do IPCC, em 1996, os cientistas do IPCC deram início ao desenvolvimento de um novo conjunto de cenários de emissões, mais eficaz e mais complexo que o utilizado até então: o cenário futuro de emissão IS92a-f. Esse cenário pode ser considerado como o primeiro cenário global de emissões de gases estufa, no que serviu como um esboço ou uma base para os demais cenários que seriam gerados no futuro, pois ele continha um conjunto completo de gases de efeito estufa. Porém, sua grande limitação era apresentar apenas uma projeção de emissões de gases estufa no futuro (IPCC, 2001).

Para o Relatório de Avaliação do IPCC seguinte foram propostos quatro diferentes enredos ou cenários de desenvolvimento global futuro (A1, A2, B1 e B2), com o objetivo de descrever e prever de forma consistente e simplificada as relações entre as forças motrizes de emissões e sua evolução ao longo do tempo (NAKICENOVIC et al.,2000). Como resultado final, criou-se o Relatório Especial sobre Cenários de Emissões (RECE), descrevendo os pontos principais dos quatro enredos de desenvolvimento global e seus diversos cenários de emissões.

Cada cenário futuro de emissão representava uma quantificação específica de cada um dos quatro enredos; os cenários que são baseados num mesmo enredo constituem uma “família” de cenários (NAKICENOVIC et al.,2000). O relatório descreve ao todo 40 cenários diferentes, abrangendo todas as famílias, dentre os quais, 35 cenários contêm dados sobre toda gama de gases necessários nos modelos climáticos, como os gases de efeito estufa e o enxofre, sempre levando em consideração os aspectos demográficos, econômicos e tecnológicos (NAKICENOVIC et al.,2000).

Os cenários do RECE não incluem ou consideram iniciativas globais ou regionais no controle de emissões de gases de efeito estufa ou controle do clima, como o protocolo de Kyoto ou uma política governamental de menores emissões, por exemplo (IPCC, 2013). As quatro famílias de cenários receberam os mesmos nomes dos seus enredos originários, que são eles: A1, B1, A2 e B2. Os pontos principais de cada família de cenários serão descritos brevemente abaixo.

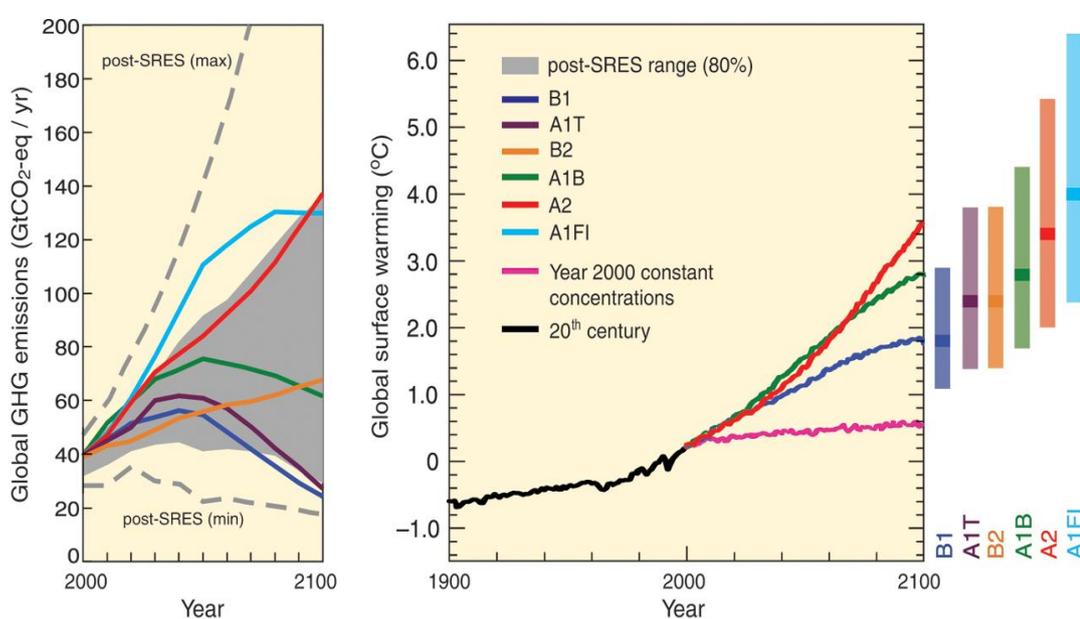
- **A1** - O contexto e a família de cenários A1 descrevem um mundo futuro de crescimento econômico muito rápido, com a população global atingindo um pico em meados do século e declinando em seguida e a rápida introdução de tecnologias novas e mais eficientes. As principais questões subjacentes são a convergência entre as regiões, a capacitação e o aumento das interações culturais e sociais, com uma redução substancial das diferenças regionais na renda per capita. A família de cenários A1 se desdobra em três grupos que descrevem direções alternativas da mudança tecnológica no sistema energético. Os três grupos A1 distinguem-se por sua ênfase tecnológica: intensiva no uso de combustíveis fósseis (A1FI), fontes energéticas não fósseis (A1T) ou um equilíbrio entre todas as fontes (A1B), em que o equilíbrio é definido como não se depender muito de uma determinada fonte de energia, supondo-se que taxas similares de aperfeiçoamento apliquem-se a todas as tecnologias de oferta de energia e uso final.
- **A2** - O contexto e a família de cenários A2 descrevem um mundo muito heterogêneo. O tema subjacente é a autossuficiência e a preservação das identidades locais. Os padrões de fertilidade entre as regiões convergem muito lentamente, o que acarreta um aumento crescente da população. O desenvolvimento econômico é orientado primeiramente para a região, sendo que o crescimento econômico per capita e a mudança tecnológica são mais fragmentados e mais lentos do que nos outros contextos.
- **B1** - O contexto e a família de cenários B1 descrevem um mundo convergente com a mesma população global, que atinge o pico em meados do século e declina em seguida, como no contexto A1, mas com uma mudança rápida nas estruturas econômicas em direção a uma economia de serviços e informações, com reduções da intensidade material e a introdução de tecnologias limpas e eficientes em relação ao uso dos recursos. A ênfase está nas soluções globais

para a sustentabilidade econômica, social e ambiental, inclusive a melhoria da equidade, mas sem iniciativas adicionais relacionadas com o clima.

- **B2** - O contexto e família de cenários B2 descrevem um mundo em que a ênfase está nas soluções locais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental. É um mundo em que a população global aumenta continuamente, a uma taxa inferior à do A2, com níveis intermediários de desenvolvimento econômico e mudança tecnológica menos rápida e mais diversa do que nos contextos B1 e A1. O cenário também está orientado para a proteção ambiental e a equidade social, mas seu foco são os níveis locais e regionais.

Atualmente esses cenários de emissão são usados como hipótese de trabalho nas projeções para o clima futuro do planeta, obtidos por meio de modelos numéricos computacionais complexos.

A Figura 2 ilustra, no painel esquerdo, projeções de emissões de gases de efeito estufa em Giga tonelada de CO<sub>2</sub>eq de diferentes cenários de emissões.



**Figura 2. Cenários de emissão de gases de efeito estufa usado pelo IPCC para gerar cenários futuros de clima.**

**Fonte: IPCC (2007c)**

A faixa em cinza corresponde a 80% do percentil do contexto dos cenários utilizados pelo IPCC, as linhas pontilhadas correspondem ao alcance máximo e mínimo dos cenários. No painel direito, as linhas coloridas correspondem a uma média do aquecimento global,

geradas a partir de uma média de vários modelos globais, baseados nos cenários de emissões A2, A1B e B1. A linha em rosa não é um cenário de emissão futuro, ela serve como um “controle” ou “ponto de partida” dos demais cenários. Ela foi gerada partindo do princípio de que as condições de emissões de gases de efeito estufa foram mantidas constantes (valores emissões do ano 2000). E finalmente as barras ao lado correspondem às estimativas (barras translúcidas) e as mais prováveis (faixa sólida) variações da temperatura média global para o período entre 2090-2099, em relação ao período de 1980 a 1990.

## **2.3 Modelos Computacionais de Simulação do Clima**

### **2.3.1 Modelos de Circulação Geral (GCM)**

Os GCMs ou modelos globais são modelos matemáticos tridimensionais no espaço que consideram os principais processos que governam os movimentos da atmosfera e dos oceanos. Para isso é resolvida uma série de equações que descrevem os fluxos de energia, momento, conservação de massa e leis dos gases. A superfície terrestre e dos oceanos é dividida ou representada por uma grade de células regulares, e cada ponto de grade ou célula é composta por várias camadas ou níveis verticais na atmosfera. Todas essas células e camadas se comunicam entre si, conforme mostrado esquematicamente na Figura 3.

Essa representação gráfica do modelo global serve para ilustrar a complexidade das interações dos fenômenos físicos que ocorrem na atmosfera e na superfície terrestre e dos oceanos, porém de forma bem simplificada.

A Figura 4 ilustra uma representação esquemática dos principais processos simulados pelos modelos globais, que geralmente discretizam o globo em elementos horizontais, ou uma grade de células regulares, cujo tamanho pode variar da ordem de 100 a 1000 km e as camadas variam de 1 a 5 km na vertical. (IPCC, 2001; IPCC, 2007a).

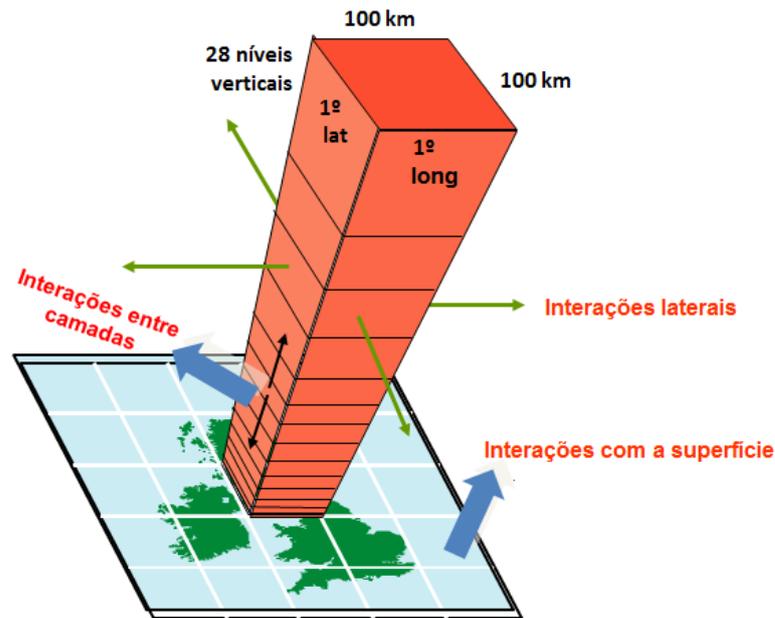


Figura 3. Esboço da discretização espacial dos modelos Globais, grade sobre a Grã-Bretanha.

Fonte: ClimatePrediction (2012)

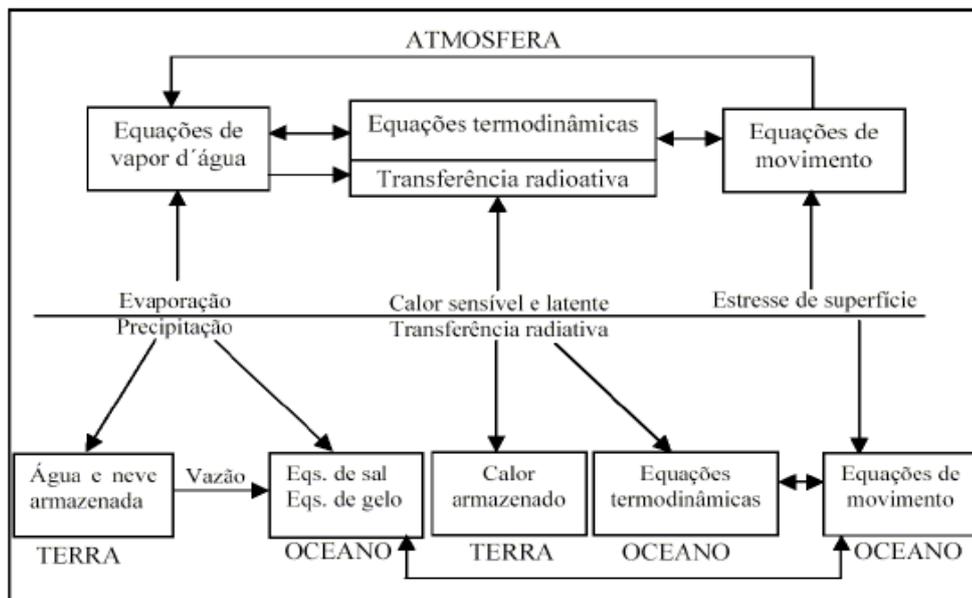
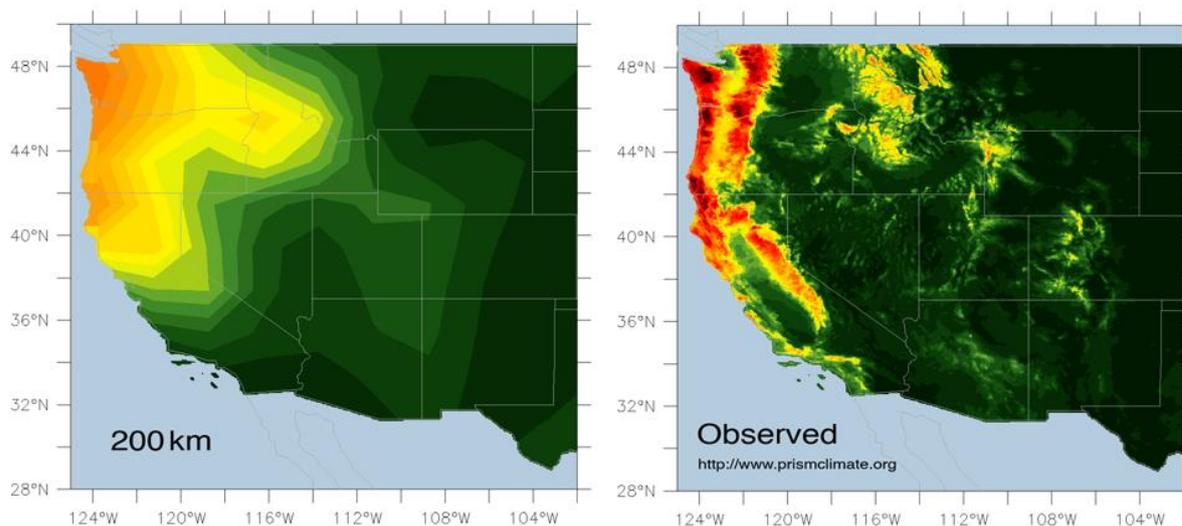


Figura 4. Interações entre atmosfera, oceanos e continentes, representadas pelos modelos globais.

Fonte: Adaptado de Kimura (2002)

Como a grade desses modelos possuem células muito grandes, isso pode limitar a discretização de determinadas regiões, pois a representação de certas características ou processos físicos é camuflada, como a topografia, por exemplo, pois os processos físicos do sistema em cada elemento da grade são valores médios (IPCC, 2001). Vale lembrar que a

tendência é que esses modelos possuam um tamanho de grade cada vez mais reduzida e mais complexa (Figura 5).



**Figura 5. Representação da topografia por um modelo global com grade de 200 km, comparada com a topografia real observada no Oeste dos EUA.**

**Fonte: Modificado de GFDL (2013)**

No caso dos oceanos, sua dinâmica é governada pela quantidade de radiação disponível na superfície, pelo atrito do vento imposto pela atmosfera e pela disposição geográfica dos continentes. Os modelos oceânicos normalmente calculam a evolução temporal das variáveis de velocidade, temperatura e salinidade. Muitos modelos climáticos possuem modelos oceânicos muito simplificados, que não incluem explicitamente a dinâmica dos oceanos.

Dentre as principais limitações dos modelos globais, em relação às aplicações em recursos hídricos, pode-se destacar: *a)* A discretização retrata somente os processos atmosféricos de macro escala na superfície da terra; *b)* Muitos processos ainda são representados com algumas limitações no modelo, tais como os processos hidrológicos, por exemplo, que variam na microescalas. Atualmente existem diversos projetos e modelos no globo que buscam melhorar ainda mais essa representação (IPCC, 2007a; KUNDZEWICZ, 2007); *c)* O custo e o tempo de processamento para uma discretização mais detalhada destes modelos ainda é elevado, necessitando de supercomputadores. (IPCC, 2007a).

Para uma avaliação melhor das possíveis mudanças climáticas em uma dada região, os modelos globais ainda não são muito precisos na sua representação, pois a variação climática

é dada por diversos fatores, como a topografia, por exemplo, que pode ser mascarada, pois a resolução de uma célula do modelo Global ainda é muito grande. (MARENGO et al., 2009).

Daí surge à necessidade de criar modelos climáticos capazes de representar o clima regional, em menor escala, derivados dos modelos globais com maiores detalhes regionais, a fim de uma representação do clima mais confiável. (CHIRSTENSEN, 2007).

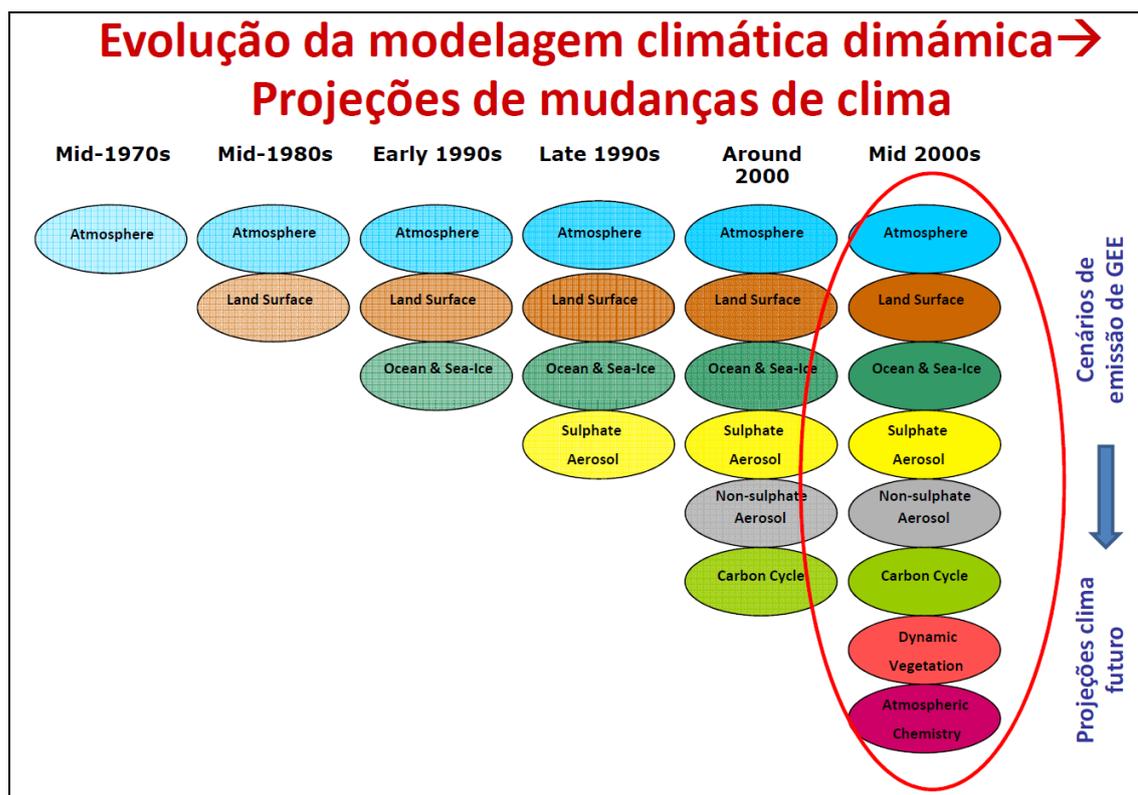
### **2.3.2 Modelos globais adotados pelo IPCC**

Os modelos acoplados vêm evoluindo e melhorando de forma significativa desde o Segundo Relatório de Avaliação (SAR) do IPCC. Em geral eles fornecem simulações de clima confiáveis, porém em menores escalas, ou seja, em escala subcontinental e em escalas temporais curtas que variam de sazonal à decadal (IPCC, 2007c).

Porém, esses modelos não capazes de simular com boa precisão todos os aspectos do clima, como por exemplo, as nuvens e umidade, que ainda continuam a ser grandes fontes de incerteza; contudo tem havido melhorias incrementais em simulações desses parâmetros (IPCC, 2007c).

A Figura 6 ilustra evolução dos modelos em termos de aumento da complexidade e capacidade de representação dos processos físicos. Nota-se que houve grande salto na complexidade dos modelos a partir do final da década de 90 e meados dos anos 2000. Isso se deve ao fato da evolução acelerada da capacidade de processamento dos supercomputadores.

Segundo GFDL (2013) o tamanho das células influencia diretamente no tempo computacional de resolução das equações do modelo. Quanto mais fina for a resolução do modelo, implica em um número maior de células da grade, requerendo computadores cada vez maiores e mais velozes para realização as simulações em tempo hábil. Porém se o modelo possuir uma grade com uma resolução muito baixa, ou seja, as células forem muito grandes, os resultados dos modelos vão ser menos detalhados.



**Figura 6. Evolução do aumento da complexidade dos modelos climáticos globais.**

**Fonte: Modificado de GFDL (2013)**

Para o IPCC-AR4 foram desenvolvidos 25 modelos globais de diferentes centros de pesquisa, conforme mostrado na Tabela 1. Porém nem todos conseguem representar bem a climatologia e a sazonalidade de regiões extremamente sensíveis às variações ou mudanças climáticas, como a bacia amazônica e a bacia da Prata. (SILVEIRA et al., 2011).

É importante salientar que não existe um modelo ideal, ou um que seja considerado como “melhor”. O que se recomenda fazer é analisar os resultados de uma série de modelos diferentes, que são cuidadosamente avaliados, com intuito de explorar os efeitos de diferentes formulações.

Um exemplo de avaliação criteriosa de quais modelos globais adotados pelo IPCC consegue representar melhor os fenômenos meteorológicos, como precipitação, por exemplo, observados sobre a América do Sul, principalmente sobre o Brasil, foi feito por Silveira et al. (2011). Neste modelo foi possível verificar quais eram os modelos que conseguem representar o regime de chuvas sobre diferentes áreas da América do Sul, como a região nordeste do Brasil, a bacia amazônica e a bacia da Prata.

**Tabela 1. Modelos Globais utilizados pelo IPCC-AR4, com suas respectivas resoluções.**

<b>Designação do Modelo / Resolução</b>	
BCC-CM1 / T63 (1.9° x 1.9°) L16	LASG-FGOALS-G1.0 / T42 (~2.8° x 2.8°) L26
BCCR-BCM2 / T63 (1.9° x 1.9°) L31	MPIM-ECHAM5 / T63 (~1.9° x 1.9°) L31
CCCMA-CGCM3 1-T47 / T47 (~2.8° x 2.8°) L31	MRI-CGCM2.3.2 / T42 (~2.8° x 2.8°) L30
CCCMA-CGCM3 1-T63 / T63 (~1.9° x 1.9°) L31	NASA-GISS-AOM / (3° x 4°) L12
CNRM-CM3 / T63 (~1.9° x 1.9°) L45	NASA-GISS-EH / (4° x 5°) L20
CONS-ECHO-G / T30 (~3.9° x 3.9°) L19	NASA-GISS-ER / (4° x 5°) L20
CSIRO-MK3 / T63 (~1.9° x 1.9°) L18	NCAR-CCSM3 / T85 (1.4° x 1.4°) L26
CSIRO-MK3.5 / T63 (~1.9° x 1.9°) L18	NCAR-PCM / T42 (~2.8° x 2.8°) L26
GFDL-CM2.0 / (2.0° x 2.5°) L24	NIES-MIROC3.2-HI / T106 (~1.1° x 1.1°) L56
GFDL-CM2.1 / (2.0° x 2.5°) L24	NIES-MIROC3.2-MED/ T106 (~2.8° x 2.8°) L20
INM-CM3.0 / (4° x 5°) L21	UKMO-HADCM3 / (2.5° x 3.75°) L19
INGV-SXG2005 / T106 (1.125° x 1.125°)	UKMO-HADGEM1 / (~1.3° x 1.9°) L38
IPSL-CM4 / (2.5° x 3.75°) L19	

Fonte: modificado de Silveira et al. (2011).

Silveira et al. (2011) concluíram que, de modo geral, os modelos globais do IPCC apresentam correlações estatísticas elevadas em relação a climatologia observada (do período entre 1960 a 1990), mostrando que os modelos são capazes de capturar os padrões de variações sazonais. Dentre os modelos analisados, os que mais se destacaram de modo geral, foram os modelos GISS\_MODEL, CSIRO.MK3 e UKMO-HadCM3.

### 2.3.3 Modelos regionais

Os modelos globais de previsão climática possuem uma resolução espacial da ordem de 100 a 1000 km. Entretanto, o clima regional pode ser controlado por fatores físicos, que podem ser de escala espacial bem menor. As características físicas como a topografia, tipo de vegetação, distribuição terra/água podem causar significativa influência no clima regional. Um exemplo se refere às brisas marítimas e às circulações atmosféricas induzidas por vales e montanhas, diferenças no uso do solo, forma da costa, dentre outras (HAY e CLARK, 2003; ROADS et al., 2003).

Como mencionado anteriormente, o custo computacional para projeções climáticas com um modelo global e resolução fina é muito elevado. Porém uma alternativa criativa desenvolvida atualmente é o chamado "*downscaling*", que consiste uma técnica de adensamento, onde se utiliza um modelo atmosférico de resolução mais alta (modelo regional), alimentado nas fronteiras pelas condições produzidas pelo modelo global (Figura 7).

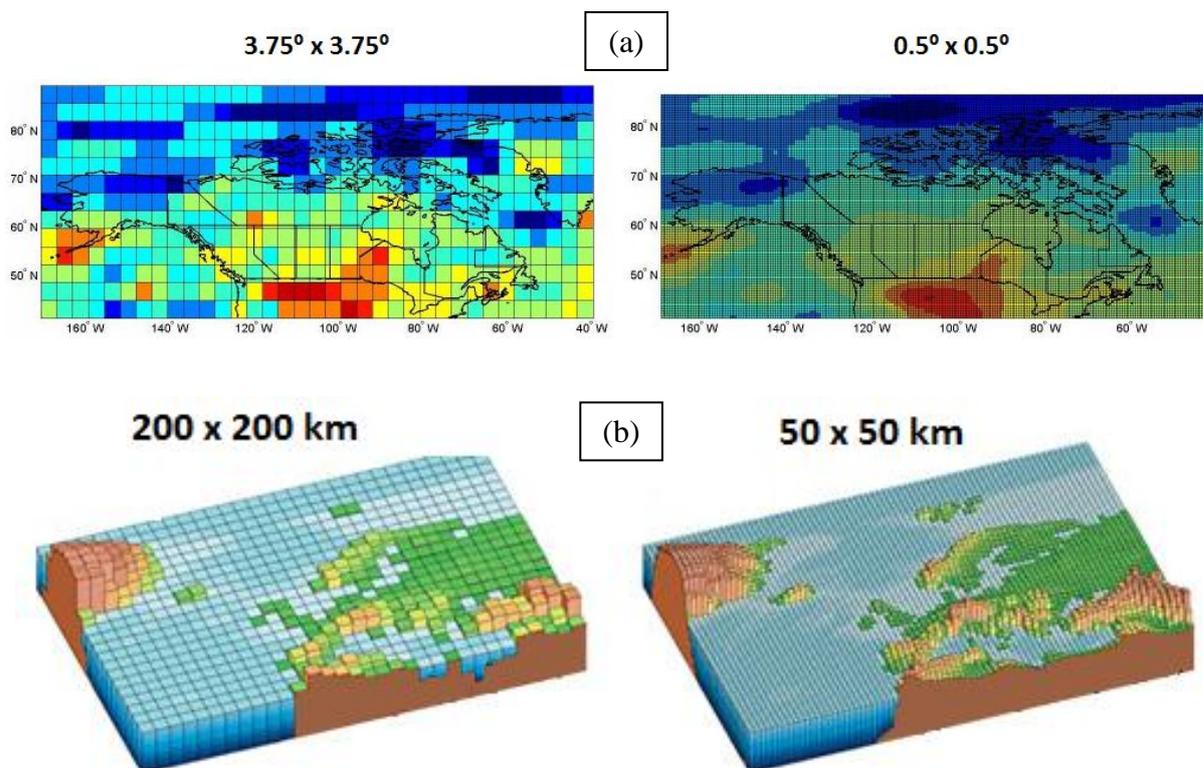


Figura 7. Exemplos de aplicações da técnica de "downscaling" de modelos globais para diferentes regiões do globo, região do Canadá (a) e para o a Europa (b)

Fonte: CICS – PCIC (2013); WMO (2013)

Conforme exemplificado na Figura 7, o modelo regional usa as condições de fronteira das células do modelo global (resolução tanto de  $3.75^\circ \times 3.75^\circ$  quanto a de  $200 \times 200$  km), para gerar uma simulação com uma resolução maior (de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  e  $50 \times 50$  km, respectivamente), fazendo com que aquela região tenha uma representação mais detalhada e mais próxima do observado.

Com esse intuito, de buscar melhorar a representação do clima e dos processos físicos para uma determinada região, os modelos regionais vêm se desenvolvendo cada vez mais nos últimos anos por meio de metodologias diversas (GIORGI et al., 2004; JONES et al., 2004, 2007 apud MARENGO, 2011b; MARENGO et al., 2009).

Existem vários trabalhos que tratam do experimento de *downscaling* de modelos globais para algumas regiões específicas dentro da América do Sul, utilizando como base, cenários climáticos do IPCC; dentre eles destacam-se: Marengo e Ambrizzi (2006); Pesquero et al. (2009); Alves e Marengo (2009) e Nobrega et al. (2010).

Existe uma série de vantagens práticas com relação aos modelos atmosféricos regionais (ROADS et al., 2003; KERR, 2004). Um dos principais benefícios se refere à possibilidade de aplicar o modelo em regiões específicas, onde existam redes de coleta de dados com maior densidade, permitindo a validação dos modelos e o desenvolvimento de novas técnicas para assimilação de dados observados.

Ainda em 2004, Kerr (2004) já previa que, devido ao contínuo aumento na capacidade dos processamentos e a utilização de processos por meio de clusters (que tem um custo muito menor do que os supercomputadores), a tendência futura seria que, cada região do país, possuísse um modelo atmosférico regional que fosse adaptado às suas características e necessidades, possibilitando uma maior confiabilidade nas previsões ou projeções climáticas futuras, podendo diminuir um pouco as incertezas nas simulações dos modelos.

## **2.4 Cenários Sobre a América do Sul**

Estudos recentes têm sido realizados sobre cenários de mudanças climáticas na América do Sul e, principalmente, sobre o Brasil. Em alguns deles se observam mudanças significativas no clima e extremos climáticos e os seus impactos nos diversos sistemas físicos e biológicos ocasionados pela elevação da temperatura do ar como apresentados no relatório do Grupo de Trabalho II (IPCC, 2007b; IPCC, 2007c).

No clima, estas mudanças em regimes de extremos de curto e longo prazo, poderiam ser semelhantes aos extremos de chuva e temperatura que se vêm registrando na América do Sul. Podem-se citar alguns eventos na América do Sul nos últimos anos, como as secas de 2005 na Amazônia (MARENGO et al., 2008a) e de 2006 no sul do Brasil (MARENGO et al., 2007), o furacão Catarina de 2004 no sul do Brasil (PEZZA e SIMMOND, 2005), as enchentes abundantes no verão de 2007 sobre o setor leste da Bolívia (SENAMHI, 2007), e as ondas de frio na Argentina e Chile no inverno de 2007 (SMN, 2007). Todos estes eventos causaram fortes impactos nos diferentes ecossistemas, e conseqüentemente, na população e na economia regional e nacional.

Valverde e Marengo (2010) fizeram uma análise sobre as mudanças no padrão de circulação que possam vir a acontecer no clima da América do Sul, ao longo do século XXI, dividindo em três períodos futuros (2010 a 2040, 2040 a 2070 e 2070 a 2100), utilizando

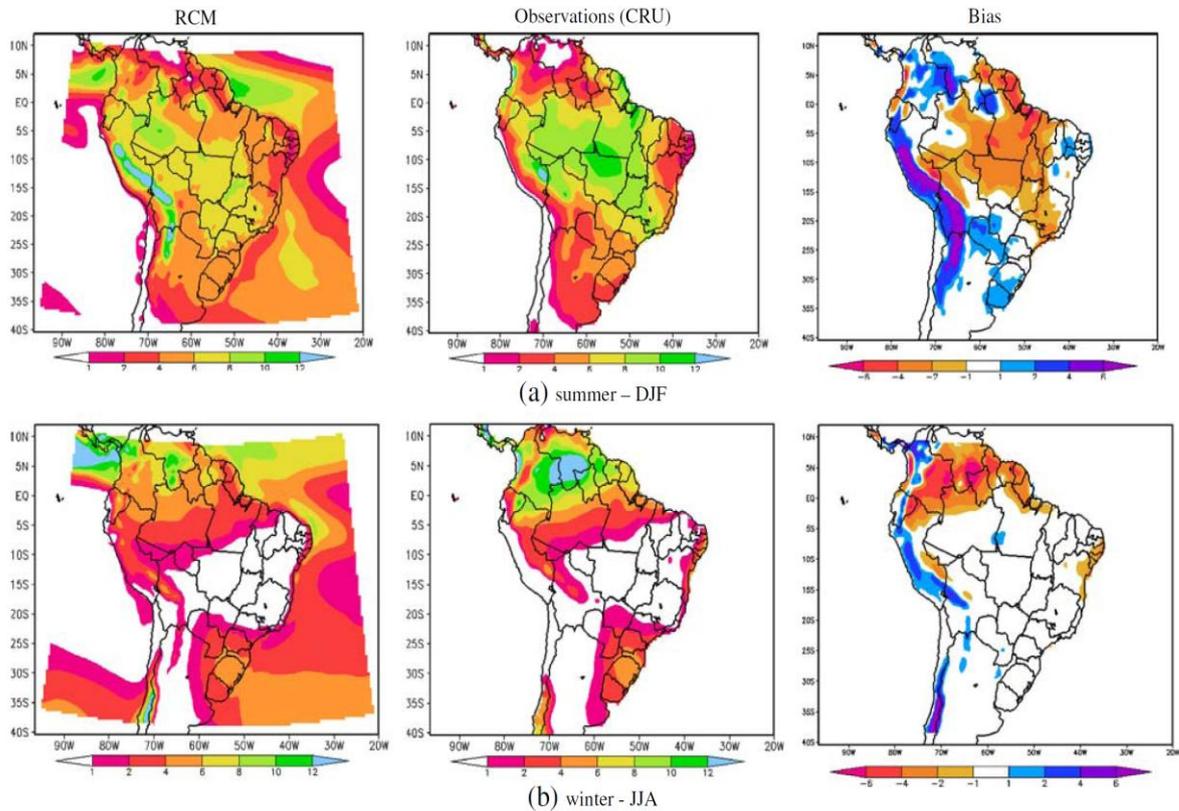
cinco modelos globais do IPCC AR4 (CCCMA, GFDL, HadCM3, MIROC e GISS), para o cenário A2 do IPCC (NAKICENOVIC et al., 2000).

Segundo Valverde e Marengo (2010), as características em comum que os modelos apresentaram (a exceção do MIROC) para as três climatologias futuras, principalmente, no verão e na primavera, foram o deslocamento da baixa continental (associada à baixa do Chaco) para o sudoeste da sua posição climatológica (1961-1990), e da Alta da Bolívia para o noroeste.

Além disso, os cinco modelos simularam, para o clima presente, uma Alta do Pacífico Sul (APS) menos intensa em relação à Reanálise do NCEP (National Center for Environmental Prediction), sugerindo menor subsidência sobre a sua região de atuação. Os modelos que se destacaram foram o HadCM3 e GISS. O modelo HadCM3 simulou a circulação de verão e primavera mais próxima à Reanálise e uma área menor de anomalias negativas de chuva sobre a Amazônia, em relação aos outros modelos.

Já Alves e Marengo (2009) realizaram um estudo avaliando a acurácia do modelo regional HadRM3P em descrever a variabilidade climática sazonal sobre a América do Sul. Neste estudo eles fizeram uma análise apenas para o período com dados observados, que vai desde 1960 a 1990, referido como “*present-day*” no modelo HadRM3P, parte do sistema do modelo PRECIS (*Providing Regional Climates for Impacts Studies*). Foram estudadas várias variáveis, como a precipitação, a temperatura e a circulação atmosférica sobre a América do Sul.

Alves e Marengo (2009) concluíram que o modelo consegue representar razoavelmente bem os padrões espaciais e temporais das variáveis analisadas, a circulação atmosférica de larga escala que, geralmente, não são tão bem representadas por modelos de baixa escala. Entretanto, é importante salientar que no modelo ainda existem alguns erros sistemáticos (Bias). O modelo, por exemplo, apresenta uma subestimação na precipitação sobre a região da Amazônia e superestima a precipitação na região dos Andes. A Figura 8 ilustra a distribuição da precipitação do modelo (RCM), a observada (CRU) e a diferença entre os dois (Bias) sobre o continente, mostrando os resultados para estações climáticas, verão (a) e inverno (b).

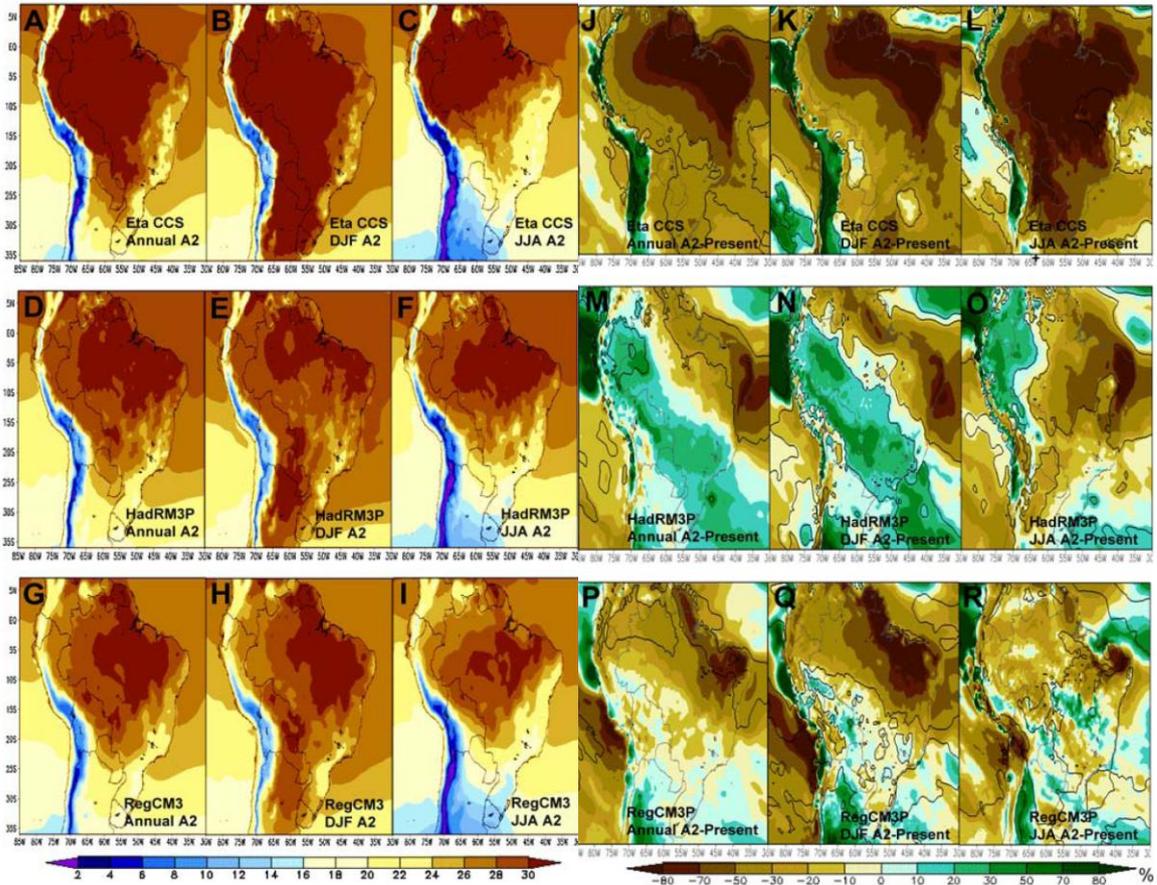


**Figura 8. Distribuição da precipitação (mm/dia): Modelo HadRM3P (RCM), observada (CRU), e a diferença entre os dois (Biais); verão (a) e inverno (b).**

**Fonte: Alves e Marengo (2009)**

Marengo et al. (2009) fizeram uma análise nas possíveis mudanças climáticas na América do Sul para os últimos 30 anos do século XXI (2071 a 2100). Foram escolhidos três modelos regionais, aninhados no modelo global HadAM3P; são eles: Eta CCS, RegCM3 e HadRM3P. Todos eles foram submetidos ao cenário de altas emissões A2 do IPCC (Nakicenovic et al., 2000).

De acordo com Marengo et al. (2009), há indicações que regiões como o Nordeste e o Centro-Oeste do Brasil, bem como a parte Sul da região amazônica podem experimentar uma deficiência na precipitação no futuro. Enquanto isso, na costa Noroeste do Peru, divisa com o Equador, bem como na parte Norte da Argentina, podem sofrer um aumento na precipitação, considerando um futuro mais quente. A Figura 9 ilustra bem essa diferença entre a precipitação e a temperatura, simuladas pelos modelos para o fim do século XXI em relação ao clima presente.



**Figura 9.** Temperatura do ar em °C, projetada para o período de 2071 a 2100 para o cenário A2 (figuras de A até I); Alteração da precipitação em % sobre a América do Sul no mesmo período para o cenário A2 (figuras de J até R). Dados climáticos dos modelos estão em anuais, verão (DJF) e inverno (JJA).

Fonte: Modificado de Marengo et al. (2009)

Os três modelos mostram um aquecimento no cenário A2, mais forte na região tropical, especialmente entre a 5°N e -15°S; esse aquecimento chega a ser de 6 a 8°C a mais se for comparado com o presente. Na parte Sul da América do Sul o aquecimento varia de 2 a 4°C no verão e de 3 a 5°C no inverno, para todos os modelos (MARENGO et al., 2009).

Se os modelos climáticos conseguem reproduzir o clima sazonal presente e passado, possivelmente as suas projeções futuras poderão ser menos incertas. Sendo assim, uma consideração inicial a ser feita é que os modelos climáticos ainda não conseguem reproduzir com alto grau de confiabilidade o padrão sazonal que a climatologia observacional apresenta. No entanto, os modelos conseguem simular coerentemente o ciclo anual, apesar dos vieses sistemáticos encontrados. Por esse motivo se constituem na principal ferramenta de previsão de clima. É importante relembrar que cenários futuros do clima apenas são projeções de prováveis mudanças que possam vir a acontecer como produto do aumento nas concentrações dos gases de efeito estufa. (VALVERDE e MARENGO, 2010).

Lázaro et al. (2011) fizeram uma proposta de metodologia de avaliação quanto à representação da variabilidade interanual e interdecadal da precipitação dos modelos globais do IPCC, sobre a região Nordeste Setentrional do Brasil. Esta avaliação é importante, pois ela exerce uma profunda influência na variabilidade climática na região.

Apesar da análise das rodadas dos modelos do IPCC, quanto à precipitação durante o século XX, ainda se apresentam grandes divergências em representar a variabilidade interanual e interdecadal na região nordeste setentrional. Porém, boa parte das rodadas dos modelos globais do IPCC apresentam boas correlações em relação à precipitação observada (acima de 0,69). Dentre todos os modelos do IPCC analisados, merecem destaque os modelos CSIRO\_MK3, GISS\_MODEL e UKMO\_HadCM3, pois eles representaram de maneira satisfatória as variabilidades interanual e interdecadal do padrão de chuva sobre o nordeste setentrional. (LÁZARO et al., 2011).

Segundo Chou et al. (2005), o INPE vem utilizando o modelo Eta, por alguns anos, como modelo de previsão de tempo e do clima sazonal. A versão climática sazonal do modelo Eta foi adaptada para executar integrações com intervalos de tempo decadal, com o foco no estudo de cenários de mudanças climáticas. O modelo Eta foi aninhado com o modelo global HadCM3, com uma resolução de 40 km na horizontal e com 38 camadas na vertical.

De acordo com Chou et al. (2011), para o presente estudo climático, a concentração de CO<sub>2</sub> foi mantida constante dentro dos parâmetros do cenário A1B do IPCC (NAKICENOVIC et al., 2000). Com a definição do cenário de emissão de gases estufa foi feita uma perturbação no modelo, a fim de gerar os cenários ou membros do modelo Eta.

Após a perturbação do modelo, foram escolhidos três membros que apresentaram uma Alta, Média e Baixa sensibilidade (High, Medium, Low) na resposta da temperatura média global. Juntamente, foi feito um membro sem nenhuma perturbação caracterizado como Controle. Esses quatro membros fornecem as condições de contorno para a condução de múltiplas realizações do modelo Eta. Para este experimento foi considerado o período 1961 a 1990, representando o clima do presente. (CHOU et al., 2011).

Os objetivos do trabalho de Chou et al. (2011) foram de avaliar se essas condições de *downscaling* e o modelo regional tem capacidade de reproduzir o clima atual, estimar alguns os erros e o espalhamento dos membros do conjunto. O principal período avaliado por Chou et al. (2011) foram os extremos: o verão (DJF) que é o período úmido e o inverno (JJA) que é caracterizado como o período seco.

Chou et al. (2011) afirmam que tanto nas camadas superiores quanto nas inferiores da atmosfera, o modelo regional apresenta uma boa concordância com o modelo global,

perturbando apenas um limite lateral, mostrando sua eficiência. Os dados da precipitação média e a temperatura são próximos aos valores observados. As vantagens dessa metodologia, é que se tem um ganho significativo na representação da sazonalidade climática de grande escala, como o El Niño e La Niña.

O modelo Eta apresentou erros na determinação da precipitação e da temperatura parecidos com os que foram apresentados nos estudos anteriores, como uma subestimação da precipitação na Amazônia durante o período úmido ou verão, bem como em latitudes subtropicais como no norte da Argentina. (CHOU et al., 2011).

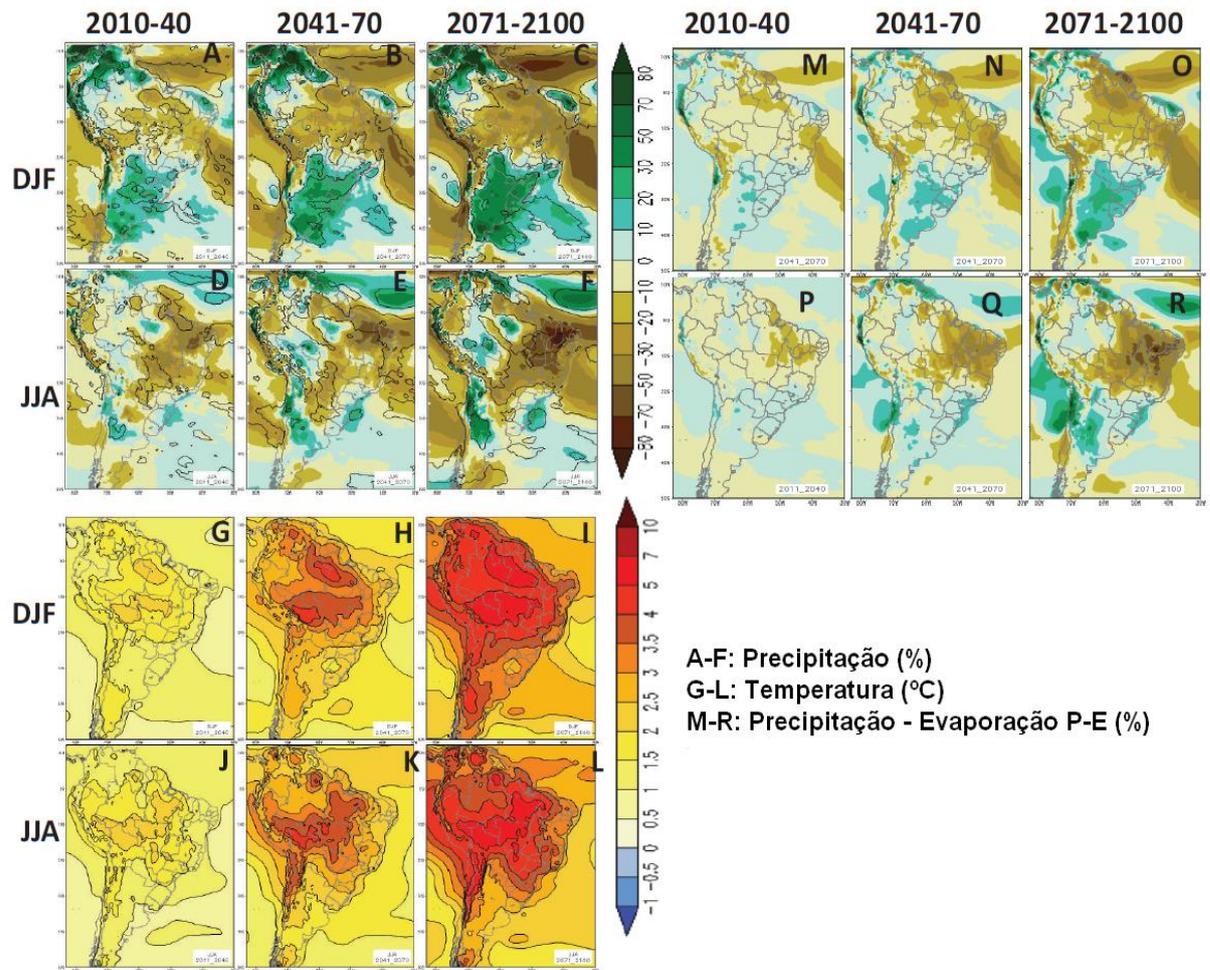
Em outro experimento Marengo et al. (2011) fizeram um estudo avaliando as possíveis mudanças climáticas para os anos de 2011 a 2100, simuladas pelos quatro membros do modelo Eta, para o cenário A1B do IPCC, para a América do Sul e a três grandes bacias hidrográficas do Brasil (Amazônica, Paraná e São Francisco).

As conclusões de Marengo et al. (2011) não estão muito diferente às apresentadas nos trabalhos anteriores, de que haverá uma grande redução na precipitação nas bacias Amazônica e do São Francisco, por volta de 40% à menos no final do século, e um aumento da precipitação na região da costa entre o Peru e Equador, chegando a um aumento de 30% no norte da Argentina. Todas essas mudanças se tornam mais intensas após os anos de 2040.

Segundo Marengo et al. (2011), a diferença entre a precipitação e evaporação sobre as bacias Amazônica e a do São Francisco, sugerem um déficit hídrico nesta região e uma redução nas vazões dos rios, aumentando a susceptibilidade destas regiões a condições mais secas.

A partir do ano de 2040 o planeta começa a esquentar mais, por volta de 2,5°C em escala global e de 2,5 a 3,5°C em escala regional. Já para os últimos 30 anos do século, as temperaturas aumentaram numa faixa que vai de 3,5 a 5°C. Essa elevação da temperatura faz com que haja uma maior evaporação, porém, a umidade gerada pelo aumento da evaporação é levada para outra região devido às mudanças de direção e intensidade dos ventos na alta atmosfera. Apenas a bacia do Paraná não apresenta grandes mudanças na precipitação média, com uma queda de apenas 2% na média. (MARENGO et al., 2011)

A Figura 10 apresenta uma relação, em porcentagem, da diferença em relação às precipitações simuladas pelo Eta para o futuro e para o clima presente que vai de 1961 a 1990 (A – F), e para a diferença entre a evaporação e a precipitação utiliza-se a mesma escala de cores da precipitação (M – R). A Figura 10 também apresenta a variação da temperatura futura em relação ao clima do presente, em °C, para toda a América do Sul (G – L).



**Figura 10. Mudanças no padrão da precipitação (A-F), temperatura (G-L) e a diferença entre precipitação e evaporação (M-R). Simuladas pelo modelo Eta para o cenário A1B sobre a América do Sul.**

**Fonte: Modificado de Marengo et al. (2011)**

Ao comparar os resultados apresentados na Figura 9 com a Figura 10, nota-se que existem alguns pontos em comum nas previsões dos dados climáticos, mesmo sendo considerados cenários de emissões diferentes, A2 e A1B respectivamente.

# **3 IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

## **3.1 Conhecimentos atuais**

Segundo o (IPCC, 2007c), os estudos a partir do QAR, possibilitam uma avaliação mais ampla em relação aos relatórios passados, principalmente sobre os efeitos do aquecimento futuro e os impactos. O número, bem como a qualidade de estudos das tendências observadas no meio ambiente físico e biológico e da sua relação com as mudanças climáticas regionais, aumentou bastante desde o Terceiro Relatório de Avaliação, em 2001. Há, contudo, uma evidente falta de equilíbrio geográfico nos dados e publicações sobre as mudanças observadas, ou seja, existe uma evidente escassez de estudos em países em desenvolvimento ou subdesenvolvido.

De acordo com o Quarto Relatório de Avaliação do IPCC, que se baseia em evidências obtidas por meio de observações em todos os continentes e maior parte dos oceanos, conclui que muitos sistemas naturais estão sendo afetados pelas mudanças climáticas regionais, principalmente os efeitos de aumento da temperatura. (IPCC, 2007c).

## **3.2 Impactos na cobertura do solo**

O uso do solo, bem como o seu manejo, influência de forma significativa no regime hidrológico, que por sua vez, interfere na geração de energia. Os usos do solo são inúmeros, mas alguns se destacam como: a agricultura, a criação de animais, áreas urbanas e áreas de reflorestamento. Todos eles podem gerar sedimento que será carregado para o leito do rio ou impermeabilizam o solo, diminuindo a infiltração, dificultando a recarga do aquífero.

Na agricultura, mudanças na fenologia de algumas espécies fornecem evidências importantes às mudanças climáticas recentes em escala regional. Tais mudanças são mais evidentes em culturas perenes, tais como árvores frutíferas e de vinificação de diversas variedades de uvas, que são menos dependentes das decisões de gestão anual pelos

agricultores, em relação às culturas anuais, e também são muitas vezes mais fácil de observar algum tipo de mudança de comportamento (MENZEL et al., 2006).

Rosenzweig et al. (2007) já indicavam estudos que evidenciaram tendências no setor agrícola, particularmente aqueles com relação direta com a temperatura, como a variação na duração da estação de crescimento e o grau de crescimento/dia durante o ciclo da cultura.

Gohari et al. (2012) fizeram uma estimativa do período do crescimento de algumas culturas como cevada, trigo, arroz e milho na bacia do rio Zayandeh-Rud no Irã, sob os cenários A2 e B1 do IPCC (NAKICENOVIC et al., 2000). Eles estimavam que com o aumento da temperatura média e uma eventual redução na irrigação, provocada por falta de água ou uma redução na precipitação, os períodos de crescimento médio das culturas iriam diminuir cerca de 24 dias para cevada, 20 dias para o trigo, de 2 a 3 dias para o arroz e 2 a 4 dias para o milho, no pior cenário. O que, dependendo do período de redução no crescimento das culturas, pode ser positivo para o produtor, pois aumenta o tempo para a preparação do campo ou a possibilidade do cultivo de outra cultura com o período de colheita mais rápida.

Porém essa redução no tempo de crescimento devido ao aumento da temperatura não é benéfica. De acordo com Gohari et al. (2012), a redução no tempo de crescimento das culturas afetam na produção por área das culturas, ou seja, as plantas passaram a produzir em menor quantidade. Gohari et al. (2012) estimam, de acordo com os cenários analisados por eles, uma redução na produção variando entre 2.5 % a 20.7 % para o trigo, 1.4 % a 17.2 % para a cevada, 2.1 % a 9.5 % para o arroz e 5.7 % a 19.1 % para o milho.

Outras pesquisas apontam reduções nas produções das culturas devido ao aumento da temperatura média e, conseqüentemente, o aumento na irrigação, em diversas partes do mundo como You et al. (2009) verificaram uma redução de 4.5 % na produção de trigo na China. Chaves et al. (2009) estimaram uma redução na produção de diversas culturas em torno de 2.5 % a 12 %.

De acordo com Rosenzweig et al. (2007) e Semenov et al. (2006), essa variação na duração e no grau de crescimento, nas regiões temperadas, estão fortemente associados com a variação no período das geadas que estão cada vez mais chegando mais cedo na primavera e está atrasando no outono, ou seja, está havendo uma defasagem no calendário climático dessas regiões.

A região de mata ou floresta de topo tem a principal função hidrológica de manter a umidade do solo. Como na região de topo de morro a precipitação é maior, como consequência há uma maior infiltração na região florestada, pois o solo não está impermeável ou compactado, garantindo a recarga do aquífero (LIMA, 2008).

O aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, além de causar o aumento na temperatura, vem aumentando a atividade biológica das florestas, principalmente no hemisfério norte. De acordo com Lorencová et al. (2013) somente as atividades agrícolas são responsáveis por volta de 12 % a 14 % do total de emissões de gases de efeito estufa.

O aumento gradativo da temperatura média vem causando uma ligeira perda de umidade durante o dia nas florestas tropicais, devido à alta taxa de evapotranspiração, levando as plantas a respirarem na parte da noite, fazendo com que a relação de umidade seja inversamente proporcional a temperatura mínima média. (CLARK et al., 2003).

Em outras regiões o que vem prejudicando o desenvolvimento das florestas é a diminuição nas precipitações. Maselli (2004) identificou que há uma tendência na redução de biomassa das florestas de topo na parte sul da Europa, especialmente depois da grande seca do ano de 2003. Este efeito de pouca precipitação, principalmente na região de cabeceira é preocupante, pois a região mais alta da bacia ocorre a maior parte da precipitação (LIMA, 2008), o que pode afetar de forma direta na produção de água da bacia, influenciando diretamente na produção de energia hidrelétrica, além do mais, usos como o consumo humano fica comprometido.

Apesar de se entender que alguns sistemas são mais vulneráveis à mudança do clima, como os recursos hídricos, florestas, etc. existe uma grande dificuldade em se qualificar ou quantificar o impacto de uma mudança do clima (KRUG, 2008).

O IPCC utiliza vários modelos climáticos baseados em cenários de emissões que servem de base para algumas projeções, que dentre outras variáveis, têm buscado simular a resposta da vegetação para diferentes condições do clima. Os resultados nem sempre são consistentes, mas normalmente projetam mudanças significativas na distribuição espacial da vegetação (IPCC, 2007b).

Krug (2008) indica que mesmo ocorrendo um aumento na temperatura média da superfície, da ordem de 1°C, seria suficiente para provocar mudanças no crescimento e na capacidade de regeneração de muitas espécies florestais.

### 3.3 Impactos nos Recursos Hídricos

Devido à grande dependência do setor elétrico brasileiro da hidroeletricidade, os regimes hidrológicos e sua manutenção são muito importantes. Como existe um desequilíbrio regional na disponibilidade da água, novos e antigos empreendimentos hidroelétricos estão em maior ou menor grau de vulnerabilidade às mudanças climáticas.

Os riscos de mudanças climáticas globais futuras, ou seja, de um aumento na temperatura média, que levam a alterações nos padrões de pressão atmosférica e ventos, além da alteração da evaporação, podem provocar alterações nos padrões de precipitação, modificando de forma preocupante o regime hidrológico de uma bacia ou em escala maior. (IPCC et al., 2007b; CHOU et al. 2011b)

A mudança do regime de chuvas de uma região poderá ter um efeito considerável sobre o consumo de água, principalmente para grandes consumidores, como por exemplo, a irrigação. A irrigação é dependente do balanço entre evaporação e pluviosidade, que com o aumento das temperaturas médias tem como consequência uma elevação das perdas por evaporação, aumentando a demanda para irrigar por maior tempo e, conseqüentemente, aumentando o consumo de água. (FREITAS e SOITO, 2008).

Com as mudanças climáticas os efeitos não serão apenas a falta de chuvas ou uma alteração no regime hidrológico, terá também mais uma intensificação de eventos extremos como seca e cheias mais intensas (FREITAS e SOITO, 2008).

Milly et al. (2002) identificaram um aumento aparente na frequência de enchentes grandes (com mais de 100 anos de tempo de retorno) em grandes bacias de todo o globo. Porém, em 2002, os efeitos das mudanças ainda não estavam muito claros, principalmente em análises de tendências. Kundzewicz et al. (2005) analisaram cerca de 195 micro bacias em diversos locais e constataram que apenas 27 delas apresentaram tendência de aumento nas cheias, 31 houve uma diminuição no número de cheias e restante, 137, não apresentaram nenhuma tendência, dificultando a associação desses eventos aos efeitos da mudança climática.

Nos subitens a seguir serão analisados alguns exemplos de estudos de impactos em algumas bacias-hidrográficas em todo o mundo e alguns estudos existentes no Brasil.

### 3.3.1 Impactos em Bacias-Hidrográficas no Mundo

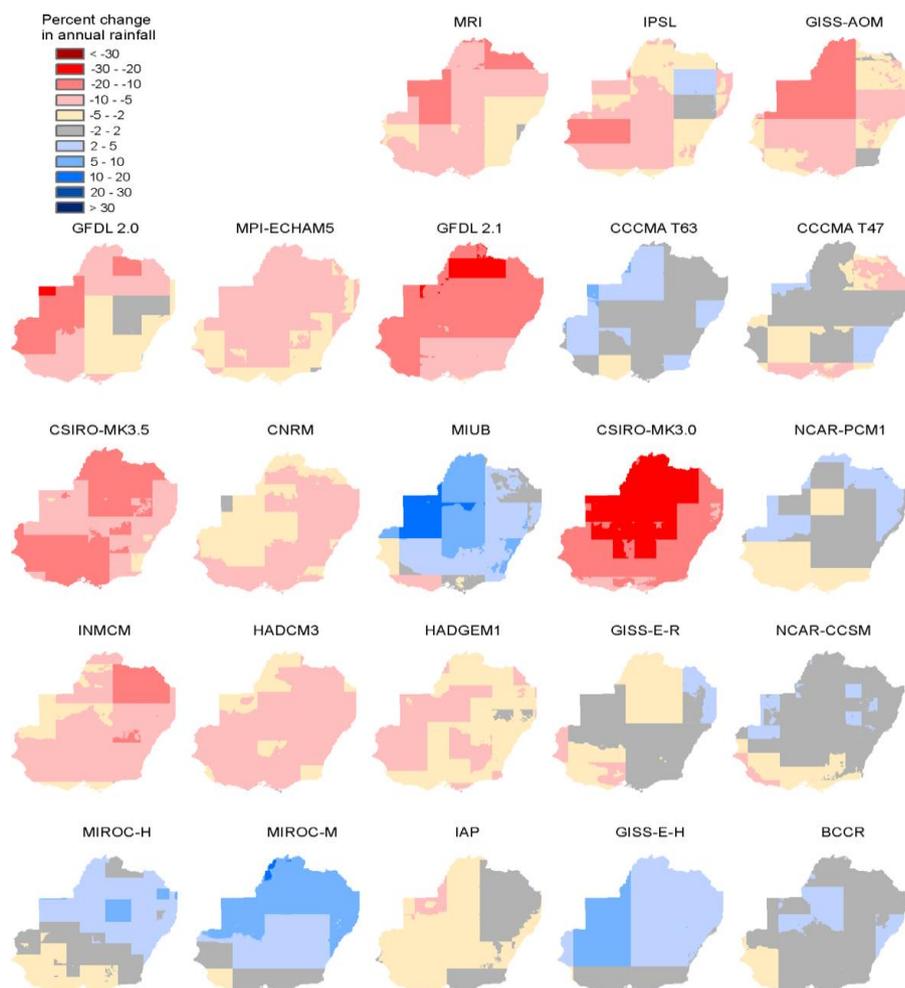
Após o Quarto Relatório de Avaliação do IPCC em 2007, o número de estudos sobre os impactos das mudanças climáticas vem aumentando em todo o mundo, especialmente sobre os efeitos da precipitação, pois a precipitação é a principal variável de entrada no ciclo hidrológico, por isso é importante entender a magnitude da alteração dessa variável, para cada cenário de mudança climático (CHIEW et al., 2009).

Chiew et al. (2009) realizaram um extenso estudo para avaliar quais seriam as previsões para a precipitação sobre a principal bacia da Austrália, a bacia composta pelos rios Murray-Darling. Foram analisados os dados de todos os 23 modelos globais do IPCC (QAR-IPCC, 2007).

Segundo Chiew et al. (2009), cerca de três quartos dos modelos globais apontam um decréscimo na precipitação média futura sobre a bacia e quase todos concordam em um decréscimo na parte Sul e Sudeste da bacia, região na qual boa parte do escoamento dos rios é gerada. A média dos 23 modelos aponta que a precipitação média anual futura dessa bacia poderá variar numa faixa de -23% a +4% em relação à precipitação observada.

A Figura 11 apresenta os resultados na escala, em cores, do percentual da diferença verificada entre a precipitação observada e a precipitação simulada pelos 23 modelos globais utilizados pelo IPCC. Nota-se que os modelos analisados possuem um tamanho de grade diferente entre si.

Xu et al. (2011) estudaram as incertezas sobre os impactos das mudanças climáticas sobre dois rios importantes na China, que são os rios Xiangxi e Huangfuchuan, afluentes dos importantes rios Yangtze e Amarelo, respectivamente. Foi feita uma comparação com sete modelos globais do IPCC, e foram considerados quatro cenários climáticos de emissão do IPCC. Foram eles: o cenário A1B, cenário A2, cenário B1 e finalmente o cenário B2. (NAKICENOVIC *et al*, 2000).



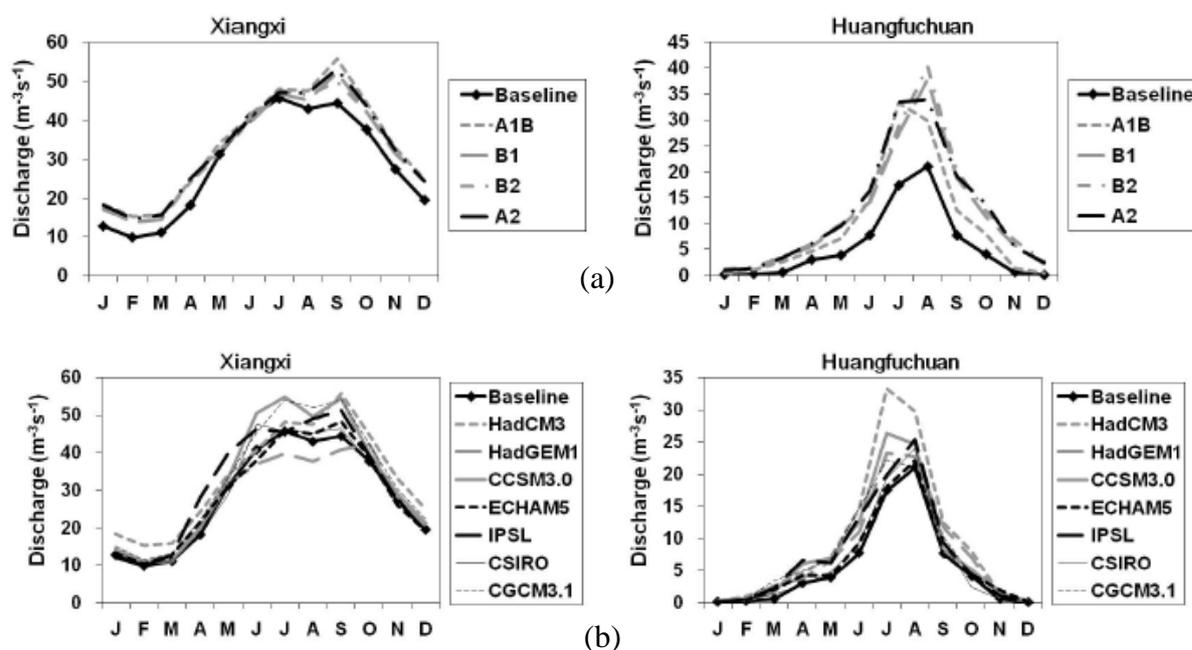
**Figura 11. Variação percentual da precipitação média anual para os 23 modelos globais do IPCC sobre a bacia dos rios Murray-Darling Austrália.**

**Fonte: modificado de Chiew et al. (2009)**

Uma das conclusões mais notáveis é que ambos os rios apresentam aumento em suas vazões para todos os modelos e em todos os cenários climáticos. O aumento é mais significativo no rio Huangfuchuan, que fica situado em uma região de semiárido no Norte da China do que no rio Xiangxi, que está localizado em uma região subtropical úmida no Sul da China. (XU et al., 2011). As projeções dos cenários climáticos futuros apontam um aumento na vazão média anual razoável no rio Xiangxi (13 a 17%) e um aumento muito grande para o rio Huangfuchuan, chegando a mais que dobrar sua vazão (73 a 121%).

Entretanto, segundo Xu et al. (2011), há uma incerteza substancial nos resultados, principalmente devido aos erros sistemáticos dos modelos globais. Para uma condição de elevação na temperatura de 2°C e no cenário de emissões A1B, existe uma incerteza nos valores dos modelos, como por exemplo: para o rio Xiangxi as vazões de cheia (Q5) varia de -1% a +41%, para as vazões de estiagem (Q95) essa variação é ainda maior, de +2 a +55%.

A Figura 12 apresenta os gráficos com as projeções das vazões para os dois rios. São apresentados os resultados para cada cenário simulado pelo modelo HadCM3 (a) e a comparação das projeções para cada modelo analisado, considerando o cenário A1B (b).



**Figura 12.** Projeções climáticas para as vazões médias mensais para os rios Xiangxi e Huangfuchuan na China. Comparação entre os cenários de emissões para o modelo HadCM3 (a) e Comparação dos modelos globais para o cenário A1B (b).

Fonte: modificado de Xu et al. (2011)

Hughes et al. (2011) fizeram uma análise de quais seriam as respostas hidrológicas para as incertezas climáticas futuras no rio Okavango, na África do Sul. Foram analisados sete modelos climáticos globais. Esse estudo é parecido com a análise feita por Xu et al. (2011), a diferença é que eles analisaram somente com a variação da temperatura, com um aumento de 2°C na escala global.

Para as condições de aquecimento de 2°C na média global, cinco dos sete modelos estudados apresentam um aumento de aproximadamente 10% na vazão anual média e os dois restantes apresentam um aumento bem maior, de aproximadamente 30% (HUGHES et al. 2011).

Outro estudo interessante foi realizado por Thorne (2011), cujo trabalho faz uma análise sobre os possíveis efeitos das mudanças climáticas em áreas montanhosas localizadas em altas latitudes. Thorne (2011) analisou a bacia do rio Liard, que está localizada na região subártica do Canadá, que é um caso peculiar apresentado até aqui. Quantificar o quanto as

tendências climáticas futuras irão alterar nas vazões de rios, como o Liard, é bem difícil, principalmente em casos como este, pois existe o aumento natural da vazão no início da primavera, devido ao derretimento do gelo. Portanto é necessário entender bem quais são as incertezas dos modelos globais (THORNE, 2011).

Thorne (2011) escolheu trabalhar com sete modelos globais e utilizar uma variação na temperatura média global de 1 a 6°C, assumindo que ao longo do período futuro não haverá nenhuma mudança significativa no uso do solo, bem como sua composição.

Nas conclusões de Thorne (2011), as inundações da primavera irão chegar mais cedo e com maior intensidade devido ao aquecimento do ar e isso irá prejudicar o período do verão, no qual a vazão irá declinar devido à falta de gelo. Em geral, a vazão anual média irá aumentar, mas não caracterizando um aumento na vazão durante todo o ano.

A Tabela 2 apresenta um resumo dos valores simulados para um cenário de mudança na temperatura média global em 2°C. Os valores apresentados correspondem à diferença expressa em porcentagem em relação às vazões do clima presente. Nota-se que existe uma grande variação entre os períodos e entre os modelos globais analisados, porém para essa bacia, na média, a vazão apresenta uma tendência de aumento, especialmente no período do início do degelo, ou seja, no período úmido da região.

Como mencionado anteriormente, a primavera apresenta uma maior variação na vazão em relação à vazão para o clima atual, chegando a valores superiores a 40% de aumento na vazão média. Apenas no verão ocorre um decréscimo da vazão, podendo atingir -22%.

**Tabela 2. Diferenças entre as vazões simuladas para o clima futuro com um aquecimento de 2°C em relação à vazão do clima presente.**

<b>Modelo Global</b>	<b>Inverno (%)</b>	<b>Primavera (%)</b>	<b>Verão (%)</b>	<b>Outono (%)</b>
<b>CCCMA</b>	11.0	28.0	10.0	21.0
<b>CSIRO</b>	5.0	19.0	-3.0	12.0
<b>HadCM3</b>	4.0	26.0	1.0	14.0
<b>IPSL</b>	5.0	41.0	-22.0	11.0
<b>MPI</b>	12.0	33.0	-11.0	28.0
<b>NCAR</b>	7.0	24.0	2.0	14.0
<b>HadGEM1</b>	5.0	34.0	-12.0	1.0

**Fonte: Modificado de Thorne, (2011)**

Apesar das incertezas dos modelos na mudança do clima futuro, projetadas para a região subártica, pode-se dizer que o regime do rio Liard será mantido no futuro, porém a magnitude da vazão devido às mudanças climáticas ainda é muito incerta (THORNE, 2011).

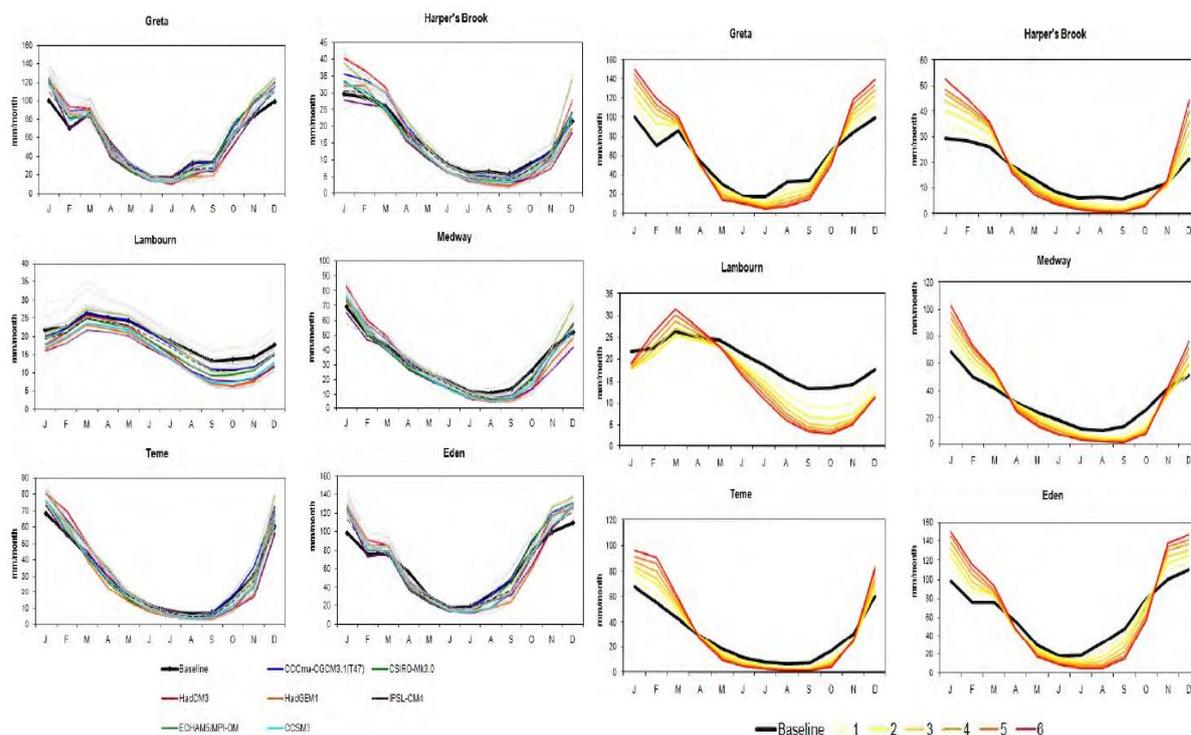
Arnell (2011) fez uma análise sobre as incertezas das mudanças climáticas sobre as vazões em seis bacias, que representam diferentes características hidrológicas em todo o Reino Unido. Ele utilizou as mesmas simulações dos autores anteriores, considerando um aquecimento médio da temperatura global de 2°C e depois fez uma variação de 1 a 6°C. Arnell (2011) utilizou 21 modelos globais do QAR-IPCC, porém ele priorizou estudar os resultados de sete modelos, por representarem uma maior diversidade nos resultados (IPCC, 2007c).

Segundo Arnell (2011) os resultados mostram uma considerável discrepância entre os 21 modelos climáticos. Por exemplo, para um aumento de 2°C na temperatura média, a vazão média no verão pode variar de -40% a +20% nas bacias estudadas. Essa discrepância é notada também nas vazões críticas (Q5 e Q95). Para esse mesmo cenário, a variação para a vazão Q95 para a bacia do rio Haper's Brook vai de -60% a +18%, por exemplo.

A Figura 13 apresenta a comparação entre as diferentes previsões de vazão no futuro, para as bacias-hidrográficas estudadas. Em (a) é mostrado os sete modelos climáticos principais do estudo, que faz a comparação entre a vazão média mensal para o clima presente, com a simulada para o futuro, considerando um cenário de aumento em 2°C na temperatura média global. Já em (b) mostra a vazão média mensal para cada bacia simuladas pelo modelo HadCM3.

As vazões simuladas apresentadas na Figura 13 levaram em consideração vários cenários de aquecimento global, que vão de 1 a 6°C. Mesmo as bacias sendo diferentes fisiologicamente, elas apresentam, em média, uma mesma tendência nas vazões, mesmo para diferentes cenários e modelos climáticos (ARNELL, 2011).

Ao analisar a Figura 13, observa-se que no inverno há uma tendência de aumento nas vazões médias, com exceção da bacia do rio Lambourn, à medida que a temperatura média global aumenta. Nota-se que para o verão essa variação existe, porém é menos significativa se for comparado com o inverno. Uma provável explicação deste fato é que essas bacias já sofrem com a seca neste período, portanto as possíveis reduções futuras irão influenciar muito pouco na vazão média (ARNELL, 2011).



**Figura 13.** Comparação da vazão média mensal entre diversos modelos climáticos, para um cenário de 2°C de aquecimento global (a); Variação da vazão média mensal simulada pelo modelo HadCM3, considerando vários cenários de aquecimento global, variando de 1 a 6°C (b). Para vários rios do Reino Unido.

Fonte: modificado de Arnell, (2011)

### 3.3.2 Impactos em Bacias-Hidrográficas no Brasil

No Brasil alguns trabalhos sobre os efeitos das mudanças climáticas foram feitos, para algumas das principais bacias do país. Tucci e Damiani (1994) foram um dos pioneiros no país a fazerem algum tipo de estudo sobre os efeitos ou potenciais impactos da mudança climática em uma bacia na América do Sul, a bacia do rio Uruguai.

Em 2005 a região sudoeste da Amazônia sofreu uma das piores secas dos últimos 100 anos, atingindo rios de grande porte como o Amazonas, rio Solimões e o rio Madeira, diminuindo muito seu nível a níveis históricos, tendo que suspender a navegação por algum tempo (MARENGO et al., 2008a).

Segundo Marengo et al. (2008a) essa seca não foi causada pelos efeitos do El Niño, mas sim por causa de anomalias no clima regional, como um aquecimento anormal na parte tropical do Atlântico Norte, uma redução na intensidade de ventos carregando a umidade para a região afetada e com isso ocasionando uma redução da precipitação sobre a região.

A seca nessa parte da Amazônia foi intensificada durante a época de seca da região, com o pico em Agosto - Setembro de 2005, na qual a umidade do ar estava abaixo do normal e a temperatura do ar estava de 3 a 5°C, mais quente que o normal. Devido a essa seca extrema, a floresta sofreu bastante com incêndios (MARENGO et al., 2008a).

Tomasella et al. (2009) fizeram um estudo sobre de que maneira as mudanças climáticas, simuladas pelo modelo ETA para o cenário de emissão A1B do IPCC, irão afetar os recursos hídricos superficiais e subterrâneos na bacia do rio Tocantins. O modelo hidrológico utilizado para simular a bacia do rio Tocantins foi o modelo MGB (COLLISCHONN, 2001).

De acordo com Tomasella et al. (2009), para o período de 2020-2030 é esperado um decréscimo da vazão média mensal, sendo mais significativas no período chuvoso. Para o período de 2050 a 2060 indica uma recuperação nas vazões, porém não é suficiente para se igualar às médias do período do clima presente (1982 a 1990), entretanto o aumento em relação ao período de 2020 a 2030 é surpreendente. Com relação ao período de 2080 a 2090, observa-se que em algumas sub bacias há uma diminuição das vazões, com valores muito mais acentuados se comparados com os períodos anteriores.

A Tabela 3 faz um resumo dos resultados obtidos na simulação da vazão média sob os efeitos das mudanças climáticas do clima presente na foz da bacia do rio Tocantins, ao longo do século XXI. São apresentados os valores em termos percentuais, da comparação entre a vazão média mensal presente em relação às previsões futuras.

**Tabela 3. Variação percentual da vazão média dos cenários futuros para diferentes probabilidades na foz do rio Tocantins, em relação ao clima presente.**

<b>Vazões Características</b>	<b>2020 a 2030</b>	<b>2040 a 2050</b>	<b>2080 a 2090</b>
<b>Média</b>	-22.0 %	-4.0 %	-20.0 %
<b>Cheia (Q<sub>10</sub>)</b>	2.0 %	26.0 %	-6.0 %
<b>Estiagem (Q<sub>95</sub>)</b>	-58.0 %	-38.0 %	-58.0 %

**Fonte: Tomasella et al. (2009)**

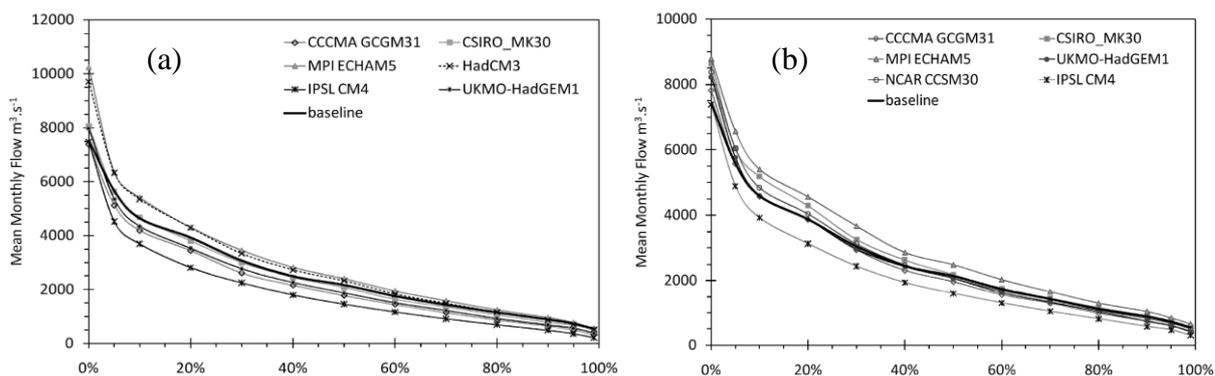
As principais conclusões de Tomasella et al. (2009) são que: ao analisar as vazões médias mensais, é possível indicar que os cenários futuros deverão apresentar uma redução de vazões de 30% na média da bacia e que o período mais crítico corresponde ao do final do século (2080 – 2090). As análises da variação de armazenamento subterrâneo indicam que os aquíferos sedimentares deverão ser fortemente afetados, com diminuição de até 8m de água armazenada.

Já Nóbrega et al. (2011) fizeram uma análise dos efeitos das mudanças climáticas nos recursos hídricos para a bacia do Rio Grande, principal tributário do rio Paraná e importante rio para a matriz hidroelétrica do Brasil. Neste estudo, foram utilizados sete modelos globais, considerando quatro cenários de emissão do IPCC (A1B, A2, B1 e B2), bem como uma variação na temperatura média global variando de 1 a 6°C. Para simular as vazões na bacia do rio Grande, foi utilizado o modelo hidrológico MGB (NAKICENOVIC *et al.*, 2000; COLLISCHONN, 2001).

Os resultados apresentados por Nóbrega et al. (2011), mostram uma tendência de aumento nas vazões médias mensais para o caso do modelo HadCM3, que ao ser simulado com os valores dos cenários de emissões, a vazão média mensal no futuro irá aumentar entre 5% a 10%, em relação ao período presente. Para o caso do aumento da temperatura, a vazão aumenta ainda mais, variando de 8% a 51%; para cada 1°C a vazão tende a aumentar de 8 a 9%. Não só a vazão média tende a crescer, mas também as vazões extremas (Q5 e Q95), exceto para os valores simulados considerando os cenários climáticos. Porém, ainda há uma substancial incerteza nas projeções dos modelos globais, como por exemplo: para um aumento na temperatura média global de 2°C, os modelos apresentam uma variação que vai de -28% a +13% (NÓBREGA et al., 2011).

A Figura 14 mostra as curvas de permanência de vazão (CPV), para as diferentes previsões para as vazões no rio Grande, para os diferentes modelos globais e em duas situações diferentes. Que são elas: em (a) foi feita uma comparação da vazão média mensal entre os modelos globais com a do clima presente, considerando o cenário de emissão A1B. Em (b) foi feita a mesma comparação, porém considerando um aquecimento médio global de 2°C (NÓBREGA et al., 2011).

Ao observar a Figura 14, deve-se ter um grande cuidado na análise dos resultados, pois em se tratando de mudanças climáticas, os resultados baseados em apenas um cenário de um modelo global pode comprometer toda a pesquisa, pois uma projeção de aumento ou decréscimo de apenas 10% na vazão média pode afetar no planejamento de geração de energia elétrica, por exemplo. (NÓBREGA et al., 2011).



**Figura 14.** Comparação entre as CPV's dos modelos climáticos com o clima presente. Curvas com as mudanças da vazão sob os efeitos do cenário de emissão A1B (a). E em (b) os modelos estão sob o cenário de aquecimento global de 2°C.

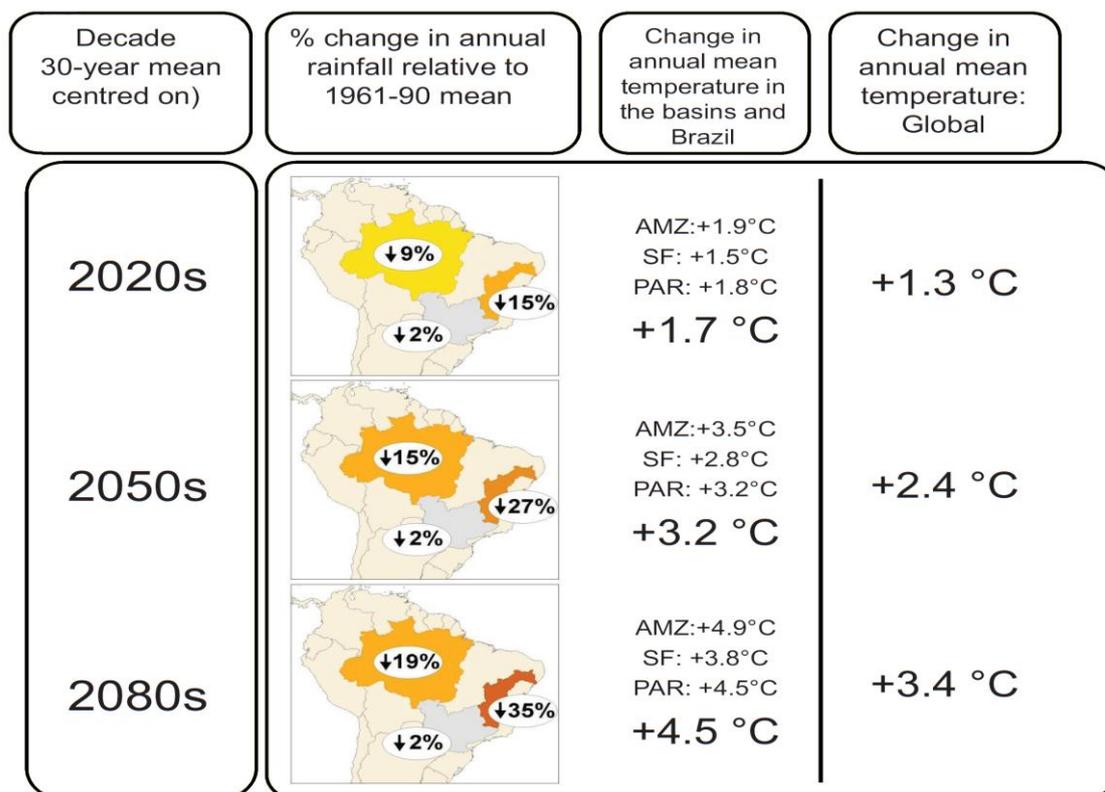
Fonte: Modificado de Nóbrega et al. (2011)

Marengo et al. (2011) fizeram uma análise sobre as mudanças climáticas que poderão ocorrer sobre a América do Sul e sobre o Brasil, como dito no capítulo anterior. Neste capítulo serão apresentados os resultados sobre os possíveis impactos sentidos no regime hidrológico, em três das principais bacias-hidrográficas do país, que são as bacias: Amazônica, São Francisco e Paraná.

De acordo com Marengo et al. (2011), para essas bacias, a maior redução sentida na precipitação será para o período do final do século XXI (2070 a 2100), chegando a ser em média uma redução de 20%, ou mais, se for considerado no período do verão, principalmente nas bacias do São Francisco com a Amazônica. Essa queda na precipitação é menor em magnitude na bacia do Paraná, com uma redução de aproximadamente 2% na precipitação anual.

A Figura 15 apresenta um resumo dos resultados obtidos para as três bacias-hidrográficas analisadas por Marengo et al. (2011), com destaque na variação da precipitação ao longo do século XXI, bem como a variação da temperatura.

Ao analisar a Figura 15, nota-se que as mudanças climáticas se tornam mais intensas a partir de 2040, essa redução mais acentuada, sugere um aumento no déficit hídrico da região, Amazônica e do São Francisco, fazendo com que essas regiões sejam mais susceptíveis a condições de secas mais frequentes e mais intensas.



**Figura 15. Mudanças climáticas projetadas sobre o Brasil e as bacias-hidrográficas Amazônica, São Francisco e Paraná em relação ao clima presente (1960-1990), com destaque na redução da precipitação nas bacias ao longo do século XXI.**

Fonte: Modificado de Marengo et al., (2011)

Em 2008 foi publicado um dos primeiros trabalhos sobre os impactos das mudanças climáticas na geração de energia no Brasil, intitulado como "Mudanças Climáticas e Segurança Energética no Brasil", analisando quais seriam os possíveis impactos, que as mudanças do clima poderiam afetar a geração de energia elétrica, nas diversas fontes geradoras, como a hidroelétrica, por exemplo. Para isso, foram feitas estimativas das vazões anuais médias futuras para somente algumas usinas do Sistema Interligado Nacional (SIN). Essa estimativa foi feita baseada nas variações das precipitações futuras, que vão dos anos de 2071 a 2100, com relação às observadas. As projeções da precipitação futura foram simuladas pelo modelo regional Precis, sob a influência de dois cenários distintos, um cenário com menores emissões de GEE (B2) e o outro com maiores taxas de emissões (A2), ambos os cenários de emissão do IPCC. (SCHAEFFER et al., 2008).

Segundo Schaeffer et al. (2008), a simulação da geração de energia elétrica nas usinas ligadas ao SIN, foi feita por meio do modelo SUIISHI-O, porém com algumas simplificações na sua operação.

Os resultados encontrado por Schaeffer et al. (2008) não variaram muito de um cenário para outro. As vazões médias anuais podem sofrer uma queda em média de 8.6%, para o cenário A2 e de 10.8% para o cenário B2. Já para a geração de energia, essa redução seria um pouco menor, uma queda de 1% para o cenário A2 e de 2.2% para o cenário B2, em média.

Na Tabela 4 são apresentados os valores das variações das vazões anuais médias e da energia média gerada pelo modelo SUIHI-O, encontrado por Schaeffer et al. (2008). Nota-se que as usinas da bacia do São Francisco seriam as mais atingidas ou as mais vulneráveis das possíveis mudanças do clima futuro, apresentando maiores quedas.

**Tabela 4. Variações nas vazões e energias futuras segundo projeções do modelo Precip, para o período de 2071 a 2100.**

<b>Principais Bacias</b>	<b>Variação da Vazão Anual Média (%)</b>		<b>Variação da Energia Média (%)</b>	
	<b>Cenário A2</b>	<b>Cenário B2</b>	<b>Cenário A2</b>	<b>Cenário B2</b>
<b>Rio Paraná</b>	-2.4%	-8.2%	0.7%	-1.2%
<b>Rio Grande</b>	-1.0%	-3.4%	0.1%	-0.8%
<b>Paranaíba</b>	-5.9%	-5.9%	-1.4%	-1.9%
<b>Paranapanema</b>	-5.0%	-5.7%	-1.4%	-2.5%
<b>Parnaíba</b>	-10.1%	-10.3%	-0.8%	-0.7%
<b>São Francisco</b>	-23.4%	-26.4%	-4.3%	-7.7%
<b>Tocantins/Araguaia</b>	-14.7%	-15.8%	-0.1%	-0.3%
<b>Média</b>	<b>-8.6%</b>	<b>-10.8%</b>	<b>-1.0%</b>	<b>-2.2%</b>

**Fonte: Schaeffer et al. (2008)**

Schaeffer et al. (2008) lembram que esses valores são apenas resultados de simulações ou projeções dos modelos citados no trabalho, que esses resultados podem variar se caso as condições iniciais foram alteradas.

# 4 ENERGIA ASSEGURADA DE PCH'S

## 4.1 Conceitos Básicos

O Decreto nº 2.665/98, alterado em seu artigo 21 pelos Decretos nº 3653, de 07 de novembro de 2000, e nº 5287/04, para fins legais, apresenta uma definição formal de energia assegurada e de forma simplificada essa definição pode ser expressa como segue: de acordo com a ANEEL (2005), a energia assegurada do sistema elétrico brasileiro é a máxima produção de energia que pode ser mantida quase que continuamente pelas usinas hidrelétricas ao longo dos anos.

Simulando a ocorrência de cada uma das milhares de possibilidades de sequências de vazões criadas estatisticamente, admitindo certo risco de não atendimento à carga, ou seja, em determinado percentual dos anos simulados, permite-se que haja racionamento dentro de um limite considerado aceitável pelo sistema. Na regulamentação atual, esse risco é de 5%.

O histórico de vazões atualmente utilizado pelas grandes usinas hidrelétricas, do sistema brasileiro, é composto por dados históricos verificados, com início em 1931, na maioria dos casos. Com base nesse histórico, e utilizando recursos estatísticos, podem ser simuladas milhares de outras possibilidades de sequências de vazões para cada usina.

Desse modo, a determinação da energia assegurada independe da geração real, e está associada às condições, a longo prazo, que cada usina pode fornecer ao sistema, assumindo um critério específico de risco do não atendimento do mercado (déficit), considerando principalmente a variabilidade hidrológica à qual a usina está submetida. Um ponto importante para o cálculo das energias asseguradas de uma usina é desconsiderar os períodos em que a usina permanece sem produzir energia por motivo de manutenções programadas e paradas de emergência. (ANEEL, 2005)

Um nível anual de energia assegurada é determinado pelo ONS, para cada gerador, e está sujeito à revisão a cada 5-10 anos. Os geradores são constantemente avaliados sobre as informações fornecidas para o ONS, a fim de verificar se ele está gerando a quantia informada, caso contrário ele deve refazer os cálculos para se adequar as condições atuais. (ONS, 2013)

Considera-se energia assegurada de cada usina hidrelétrica, a fração, a ela alocada, da energia assegurada do sistema. A operação cooperativa do parque gerador brasileiro foi historicamente adotada, visando garantir o uso eficiente de recursos energéticos no país. Com a introdução da competição no segmento de geração de energia e o aumento do número de agentes, optou-se pela manutenção da operação centralizada das centrais geradoras hidrelétricas, visando à otimização do uso dos reservatórios e a operação com mínimo custo ao sistema (ANEEL, 2005).

## **4.2 Mecanismo de Realocação de Energia (MRE)**

Dadas as grandes dimensões territoriais do Brasil, existem também diferenças hidrológicas significativas entre as regiões, ou seja, períodos secos e úmidos não coincidentes, fazendo com que exista a possibilidade de transferências de energia entre regiões. Em geral, uma região em período seco deve fazer um controle do reservatório, a fim de armazenar água, produzindo abaixo da média, enquanto que uma região úmida produz acima da média.

Outro fator importante que levou à concepção do Mecanismo de Realocação de Energia (MRE) é a existência de várias usinas em cascata, em que o ótimo individual não necessariamente corresponde ao ótimo conjunto.

Como o despacho é centralizado, ou seja, a água é de todos e o seu uso não é decidido pelo proprietário da usina, o MRE tem como função principal, que é de fazer com que o risco de escassez de energia seja minimizado e compartilhado entre os geradores em longo prazo. A contabilização do MRE é uma importante aplicação dos valores de energia assegurada (CCEE, 2013).

O MRE é um mecanismo financeiro que objetiva compartilhar os riscos hidrológicos que afetam os geradores, na busca de garantir a otimização dos recursos hidrelétricos dos sistemas interligados. A intenção deste mecanismo é garantir que todos os geradores dele participantes, comercializem a energia assegurada que lhes foi atribuída, independente de sua produção real de energia, desde que as usinas integrantes do MRE, como um todo, tenham gerado energia suficiente para tal (ANEEL, 2005).

Em outras palavras, por meio do MRE, a energia produzida é contabilmente distribuída, transferindo o excedente daqueles que geraram além de sua energia assegurada, para aqueles que geraram abaixo, por imposição do despacho centralizado do sistema. A

energia que é acumulada pelo MRE pode ser maior, menor ou igual ao total de energia assegurada das usinas participantes. O sistema possui basicamente dois mecanismos que tratam dessas condições, conforme descrito a seguir:

- Se a soma da energia gerada pelas usinas for **maior** ou **igual** à soma das suas energias asseguradas: haverá um excedente de energia, denominado **Energia Secundária**, que será também realocado entre os geradores;
- Se a soma da energia gerada pelas usinas for **menor** que a soma das suas energias asseguradas: não haverá energia suficiente para que todos os geradores recebam a totalidade de sua energia assegurada. Será então calculado para cada gerador, na proporção de sua energia assegurada, um novo valor de energia disponível, apenas para efeito do MRE (ANEEL, 2005).

A Figura 16 ilustra um quadro de energia gerada, típico de uma usina localizada na região sudeste/nordeste do Brasil e mostra a variação de energia produzida por ela ao longo do ano, fazendo uma comparação com a sua energia assegurada.

Nota-se que nos períodos úmidos ela gera mais que a energia assegurada, e no período de estiagem a geração é comprometida, afirmando a necessidade do MRE. Os valores de energia assegurada têm grande importância comercial, pois constituem a quantidade máxima de energia que o gerador pode comprometer (volumes médios anuais) com contratos de longo prazo.

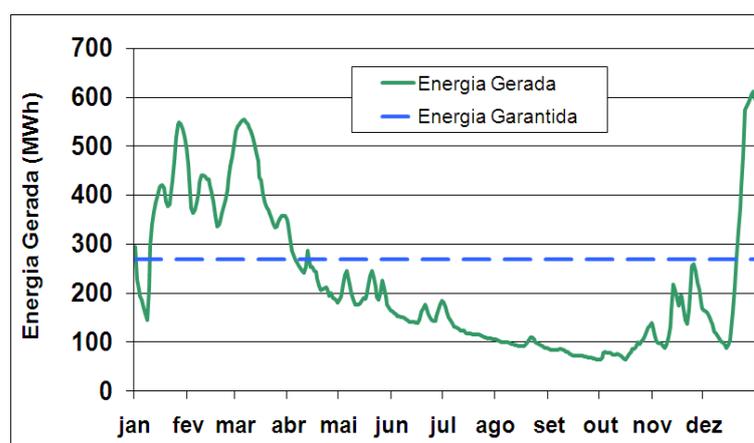


Figura 16. Exemplo de um quadro típico de geração de uma UHE da região sudeste/nordeste.

Fonte: Adaptado de ANEEL (2005)

### **4.3 Legislação Sobre Energia Assegurada**

Até meados do ano de 2004, o cálculo da energia assegurada das usinas hidrelétricas despachadas pelo ONS era feito em conjunto do Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos (CCPE).

A partir da publicação do Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004, ficou estabelecido que a definição da forma de cálculo da garantia física (energia assegurada) dos empreendimentos de geração, ficaria a cargo do Ministério de Minas e Energia (MME), e a execução deste cálculo ficariam sob responsabilidade da Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Em novembro de 2004 foi publicada a Portaria nº 303 pelo MME, que dentre outras coisas, define os montantes da garantia física dos empreendimentos de geração de energia. Essa portaria também aprova a metodologia, as diretrizes e o processo para implantação da garantia física das usinas do Sistema Interligado Nacional (SIN), conforme Nota Técnica produzida pelo MME/CCPE e pelo ONS, em novembro de 2004.

A resolução mais recente sobre energia assegurada para Usinas Hidroelétricas (UHE) é a Portaria nº 258 de julho de 2008, publicada pelo MME. A portaria vem reafirmar a metodologia adotada pela Portaria nº 303 / 2004, porém ela trás algumas novidades, como a metodologia a ser aplicada no cálculo da energia assegurada para usinas eólicas.

Para o caso do valor da energia assegurada para as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's) ele é calculado pela ANEEL conforme metodologia estabelecida na Resolução ANEEL nº 169 de 2001. Essa metodologia é bem diferente a aplicada para as UHE's, por se tratarem de centrais de pequeno porte.

### **4.4 Determinação da Energia Assegurada de uma UHE**

Este tópico fará um pequeno resumo sobre o cálculo da energia assegurada de uma UHE, somente para ilustra as diferenças de cálculos existentes entre a UHE e uma PCH.

De acordo com a Portaria nº 258 de julho de 2008, publicada pelo MME, um conjunto de premissas é definido para o processo de determinação da garantia física para as usinas hidroelétricas e térmicas. São elas:

- I. Modelos e Parâmetros de Simulação:** Para as simulações energéticas de sistemas equivalentes será utilizado o modelo NEWAVE, desenvolvido pelo CEPEL, na versão para cálculo de garantia física. Para os estudos das usinas individualizadas, será utilizado o modelo MSUI, desenvolvido pela ELETROBRÁS.
- II. Configuração Hidrotérmica de Referência:** Nos estudos tanto para sistemas utilizando o NEWAVE, quanto para o MSUI, a configuração de referência será composta pelas UHEs interligadas ao SIN. Excluindo as PCHs, salvo aquelas que são despachadas centralizadamente.
- III. Topologia:** Para a simulação dos subsistemas equivalentes do SIN, deve se considerar:
  - SE/CO/AC/RO: Regiões Sudeste e Centro-Oeste e Rondônia e Acre interligados;
  - S: Região Sul;
  - NE: Região Nordeste;
  - N/Manaus: Regiões Norte e Manaus interligados.
- IV. Proporcionalidade da Carga:** O ajuste da carga deverá ser mantido proporcionalmente entre as regiões fortemente interligadas, que são as regiões da topologia descrita anteriormente.
- V. Limites de Intercâmbio entre os Subsistemas:** Os limites deverão ser determinados a cada processo de cálculo de garantia física, de modo a manter a compatibilidade entre a expansão de oferta e ligações.
- VI. Custo do Déficit de Energia:** Utilizar o custo em um patamar, como a penalidade por não atendimento ao desvio de água para outros usos.

Assumindo as premissas acima, a Portaria MME nº 258/2008, descreve a metodologia para o cálculo da energia assegurada para UHEs, que é definida como aquela correspondente à máxima quantidade de energia que o SIN pode suprir a um dado critério de garantia de suprimento, ou seja, esta energia é rateada entre todos os empreendimentos de geração que constituem o sistema. Lembrando que todas as equações que serão mostradas neste tópico foram retiradas da Portaria MME nº 258/2008.

Só como observação, a Portaria MME nº 258/2008 também apresenta uma metodologia para a determinação da energia assegurada para as usinas térmicas.

A metodologia do cálculo da energia assegurada para uma UHE pode ser resumida em três passos, que são:

- Determinação da oferta total de garantia física, ajustada para a igualdade do custo marginal de operação médio anual (CMO), com o custo marginal de expansão (CME);
- Rateio da oferta total ou garantia física do SIN (EH), e
- Rateio da oferta hidráulica entre todas as UHEs, proporcionalmente às suas energias firmes.

## **4.5 Determinação da Energia Assegurada de uma PCH**

A determinação ou o cálculo da energia assegurada de uma PCH é bem mais simples se comparado com uma UHE, pois a maioria das PCHs não é despachada centralizadamente pelo ONS, ou seja, elas geram a plena carga disponível o tempo todo, portanto não há a necessidade de analisar todo o Sistema Interligado Nacional (SIN). Desta forma, o cálculo para se determinar a energia assegurada de uma PCH fica simplificado e evita o uso de *softwares* pesados e complicados para a sua determinação.

A metodologia utilizada para a determinação da energia assegurada de uma PCH foi definida pela ANEEL de acordo com a resolução nº 169 / 2001, que em suma, define que a energia assegurada de uma PCH é igual à energia média produzida pela mesma, descontada as horas de paralisação das máquinas para manutenções programadas e forçadas. As eventuais paradas forçadas é uma estimativa do número de horas necessárias para uma eventual falha ou falhas na usina.

## 5 METODOLOGIA

A metodologia proposta nesse trabalho consiste em gerar cenários de vazões para a bacia do rio São Francisco a partir de projeções climáticas futuras, gerados pelo modelo regional Eta, operado pelo CPTEC/INPE. A partir destas projeções futuras, serão analisadas as possíveis variações nas energias asseguradas de pequenos potenciais hidroelétricos dentro da bacia do rio São Francisco.

Segundo Chou et al. (2005), o INPE vem utilizando o modelo Eta, por alguns anos como modelo de previsão de tempo e do clima sazonal. A versão climática sazonal do modelo Eta foi adaptada para executar integrações com intervalos de tempo decadal, com o foco no estudo de cenários de mudanças climáticas, relacionadas à diferentes níveis de concentrações de CO<sub>2</sub>. (CHOU et al., 2011).

O modelo Eta foi ajustado a partir do “*downscaling* dinâmico” de cenários do modelo global HadCM3 do Hadley Center, com uma resolução de grade de 40 km, gerando previsões climáticas até o ano de 2099 (CHOU et al., 2011; MARENGO et al., 2011). Os cenários futuros foram divididos em três períodos de 30 anos: 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099. Além disso, foi gerado um cenário para o período passado (1961-1990), para comparação e validação com dados observados no mesmo período.

Diferentemente da metodologia utilizada em outros modelos climáticos regionais, no processo de *downscaling* do modelo HadCM3 para o modelo Eta, não houve uma variação dos cenários de emissões de gases estufa, ou seja, as variáveis climáticas do modelo HadCM3 foram influenciadas com as emissões de gases estufa, de forma constante e dentro dos parâmetros do cenário A1B do IPCC. (CHOU et al., 2011; NAKICENOVIC et al., 2000).

Como o cenário de emissões é único, foi feita uma série de pequenas perturbações no modelo a fim de gerar “membros de um mesmo cenário de emissão”, fazendo com que cada membro contenha diferentes respostas ou projeções do clima futuro. (CHOU et al., 2011)

Essas pequenas perturbações no modelo HadCM3 originaram centenas de membros contendo diferentes projeções climáticas futuras. Para o *downscaling* do modelo Eta, foram escolhidos apenas 3 membros, que apresentaram uma Alta, Média e Baixa sensibilidade (High, Medium, Low) na resposta da temperatura média global. Essa escolha foi feita por facilitar e diminuir o tempo computacional. Juntamente, foi feito um membro sem nenhuma

perturbação, caracterizado como Controle. Esses quatro membros fornecem as condições de contorno para a condução de múltiplas realizações do modelo Eta. (CHOU et al., 2011).

De acordo com Chou et al. (2011), mesmo que cada membro do conjunto seja forçado com as mesmas concentrações de gases estufas, a soma dos efeitos das diferentes combinações de configurações de parâmetros altera o grau, e em certa medida, os padrões de mudança climática. O intervalo no aumento da temperatura média global até o final do século XXI, fornecido pelas variantes deste modelo, é de magnitude semelhante ao intervalo dado pelo QAR do IPCC.

No presente trabalho, para simplificar e facilitar as análises, foram escolhidos apenas dois membros do modelo Eta. Os membros Low e High, que serão chamados de membro 2 (M2) e membro 4 (M4), respectivamente. É importante ressaltar que os dados observados, utilizados nas análises foram interpolados para a grade do modelo hidrológico MGB.

A metodologia adotada neste trabalho divide-se em quatro partes principais, que são elas:

- Revisão do ajuste do modelo hidrológico MGB e análise do desempenho do modelo Eta sobre a bacia;
  - Preparação e formatação dos cenários do modelo atmosférico;
  - Análise do desempenho das projeções do modelo atmosférico sobre a bacia, considerando o período com dados observados (1961 a 1990);
- Perturbação das variáveis climáticas;
  - Perturbação da precipitação observada, baseado nas Análises das curvas de probabilidade das projeções futuras do modelo Eta;
  - Perturbação da temperatura média mensal observada, baseado nas projeções climáticas futuras do modelo Eta;
- Geração dos cenários de vazões, simulados pelo modelo hidrológico MGB, sob os efeitos das projeções futuras das precipitações e da temperatura média, e
- Analisar quais seriam os efeitos das projeções das vazões futuras na energia assegurada em pequenos potenciais hidrelétricos, na bacia do Rio São Francisco.

O fluxograma apresentado na Figura 17 ilustra, de forma simplificada, a metodologia aplicada neste trabalho. Destacando os passos descritos acima.

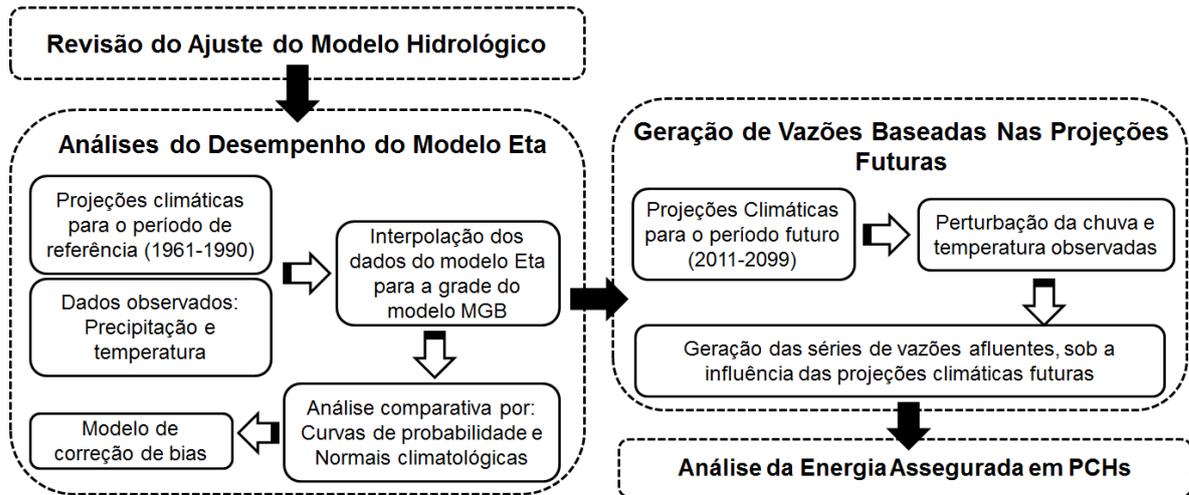


Figura 17. Fluxograma simplificado da metodologia adotada.

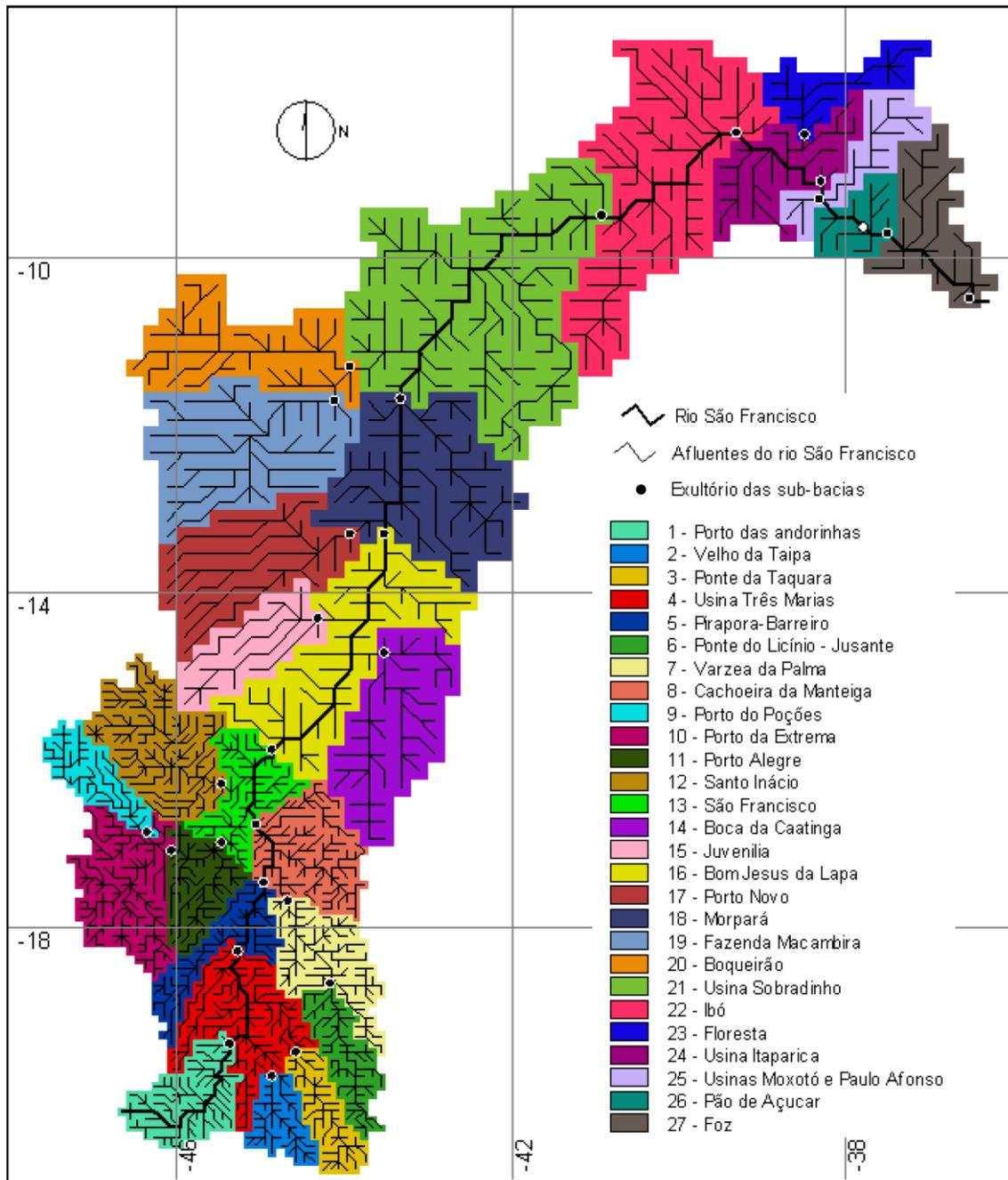
## 5.1 Revisão do ajuste do modelo hidrológico MGB para a bacia

O modelo hidrológico MGB foi ajustado e calibrado para toda a bacia do rio São Francisco por Silva (2005). A bacia foi dividida em 2502 células regulares, com resolução de aproximadamente 10 km para a parte alta da bacia e uma resolução de aproximadamente 20 km para o restante da bacia.

Para facilitar as análises futuras, o conjunto de algumas dessas células formam áreas de controles maiores, chamadas de “sub-bacias”. A bacia do rio São Francisco foi subdividida em 27 sub-bacias e elas podem ou não coincidir com sub-bacias reais da bacia.

A localização dos exutórios de cada sub-bacia do modelo foi definida por Silva (2005). Foi feita uma mescla entre alguns postos de vazão que continham uma boa série de dados e das grandes usinas presentes no Rio São Francisco, como a UHE Três Marias e UHE de Sobradinho, etc. As vazões das UHEs, utilizadas para alimentar o modelo, foram obtidas por meio das séries de vazões naturais, obtidas no ONS. (SILVA, 2005).

A Figura 18 ilustra a discretização feita pelo MGB para a bacia, com o destaque na localização dos exutórios, os nomes de cada sub-bacia do modelo, a rede de drenagem, e as diferenças de resolução da grade adotada para a bacia do Rio São Francisco.

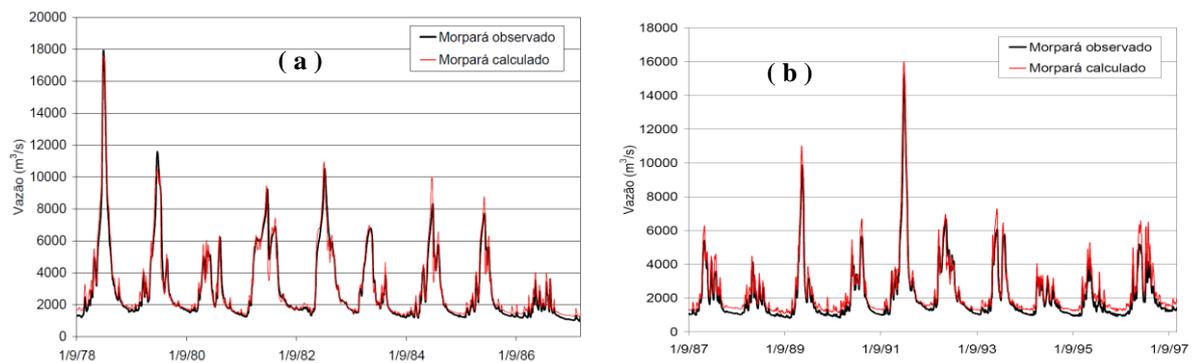


**Figura 18. Ilustração da bacia do Rio São Francisco, interpretada pelo modelo hidrológico MGB, detalhe nas sub-bacias compostas por células regulares e na rede de drenagem retilínea simplificada.**

**Fonte: Silva (2005).**

O modelo hidrológico foi calibrado com os dados observados entre o período de 1977 a 1986, enquanto o período de 1986 a 1997 foi selecionado para a validação da calibração e verificação do ajuste. Os dados de vazões observadas para a calibração foram retirados dos postos fluviométricos dentro da bacia e das vazões naturais das UHEs existentes na calha do rio São Francisco. Para efeito de simplificações, os dados das PCHs foram ignorados, já que eles influenciam pouco no hidrograma e possuem pequenos reservatórios. (SILVA, 2005).

A Figura 19 apresenta uma comparação entre a calibração e a verificação no posto de Morpará no Rio São Francisco. Nota-se que para essa sub-bacia o modelo representa muito bem o comportamento hidrológico neste ponto. A representação da calibração ficou ligeiramente melhor, se for comparada com a verificação, especialmente para as vazões mínimas. Esse erro é devido à provável intensificação do uso consuntivo de água no período de verificação ou do aumento da evaporação.



**Figura 19. Hidrogramas calculados e observados do Rio São Francisco para a sub-bacia de Morpará. Comparação dos dados da calibração (a) e comparação dos dados da validação (b).**

**Fonte: Silva (2005)**

Segundo Silva (2005), os resultados mostraram que o modelo apresenta um bom desempenho na representação, tanto das vazões observadas em postos fluviométricos, quanto das vazões naturais dos aproveitamentos hidroelétricos.

Em Silva (2005) a calibração e a validação do modelo hidrológico são apresentadas com maiores detalhes e de forma mais completa. O objetivo desse tópico era de apenas exemplificar e mostrar rapidamente a metodologia utilizada na calibração e da validação dos dados.

## 5.2 Perturbação na Precipitação Observada

De modo simplificado, essa perturbação na precipitação observada é uma forma de analisar ou simplesmente verificar como se comportaria a série da precipitação observada sob as condições climáticas do futuro. Esta parte da metodologia foi subdividida em três etapas distintas.

### **5.2.1 Verificação dos cenários do Eta**

Como o modelo regional possui o tamanho de grade maior que a do modelo hidrológico de 40 km e 10-20 km, respectivamente, foi feita uma interpolação da precipitação do Modelo Eta para as células da bacia do modelo hidrológico. Em outras palavras, preparando o acoplamento dos dados do modelo Eta ao modelo hidrológico.

Essa interpolação é feita por uma rotina computacional específica, que calcula a precipitação média diária pelo método do inverso da distância ao quadrado (COLLISCHONN, 2001), para cada uma das 2502 células do modelo hidrológico. Como resultado, a rotina fornece um arquivo binário, contendo dados diários de chuva interpolados em todas as células do modelo hidrológico.

Para uma primeira análise serão feitos gráficos, comparando a precipitação média mensal gerada pelo Eta, considerando o período do passado (de 1961 a 1990), com a precipitação média mensal observada ocorrida no mesmo período. O objetivo é verificar se o modelo Eta apresenta, de modo geral, um bom desempenho sobre a bacia do Rio São Francisco, ou seja, se o modelo Eta representa bem a sazonalidade observada na bacia.

Essa análise foi estendida para os períodos futuros, com o intuito de somente verificar se o modelo Eta mantém de certa forma a sazonalidade verificada no período de 1961 a 1990.

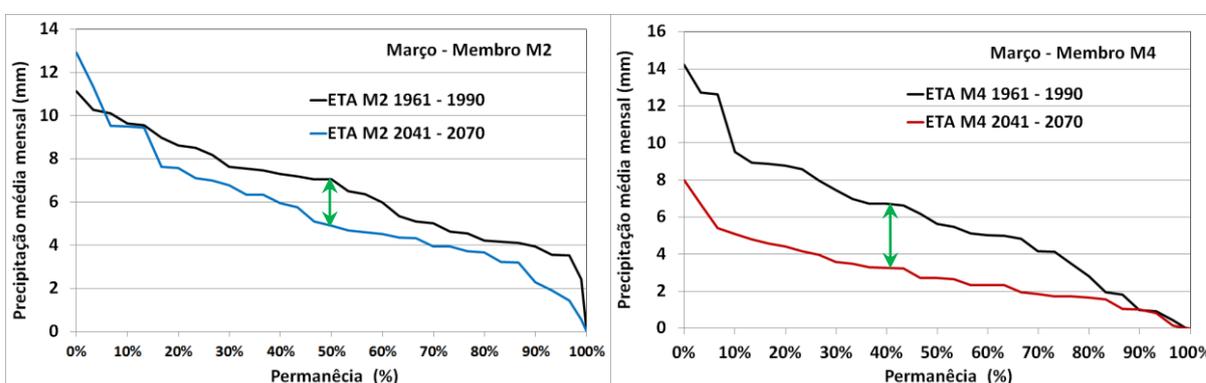
### **5.2.2 Análise das curvas de probabilidade**

Feita a comparação entre a sazonalidade da precipitação do modelo Eta e da observada, no período de 1961 a 1990, o próximo passo seria construir as curvas de probabilidade da precipitação, para então verificar as possíveis diferenças ou variações entre as precipitações do futuro e a precipitação ocorrida no período passado, ambas simuladas pelo modelo Eta.

As comparações foram feitas considerando a média mensal ao longo dos anos, durante todo o período analisado, ou seja, uma curva para todos os janeiros, uma para todos os fevereiros, etc. A grande vantagem de se analisar cada mês específico é permitir a manutenção da variabilidade interanual da precipitação.

A construção dessas curvas tem o objetivo de verificar se em uma dada probabilidade de ocorrência, a precipitação terá um aumento ou declínio em relação ao período passado. Tudo isso, considerando o mesmo membro do modelo Eta.

A Figura 20 ilustra um exemplo de como é feita as comparações das precipitações para cada mês e em cada bacia afluente do modelo MGB. No exemplo, são analisadas as precipitações ocorridas na bacia afluente ao posto fluviométrico São Francisco. Nela é feita a comparação entre o período de referência de 1961 a 1990 com o período futuro, de 2041 a 2070, para os dois membros do modelo Eta.



**Figura 20. Comparação da permanência das precipitações médias do modelo Eta. Análise para o mês de março nos períodos de 1961-1990 e 2041-2070, nos dois membros do modelo Eta. Dados referentes a bacia afluente ao posto fluviométrico São Francisco.**

Na Figura 20 a seta verde ilustra a variação ou o delta entre as precipitações no período passado e o período futuro. Analisando a Figura 20 nota-se que há uma grande variação entre as precipitações passadas e futuras, principalmente para o membro M4. No membro M2, para esse mês, há uma pequena variação entre as precipitações.

As diferenças entre as curvas de permanência ou deltas serão aplicadas na precipitação observada no período entre 1961 a 1990, a fim de gerar séries de precipitações sob os efeitos das projeções climáticas futuras. Essa etapa será descrita com mais detalhes a seguir.

### 5.2.3 Perturbando a precipitação observada

Existem diversas metodologias propostas por vários autores como Hay et al. (2002); Hay e Clark (2003); Chiew (2006); Lenderink et al. (2007) e Bárdossy e Pegram (2011). Que de modo geral divergem um pouco entre si, porém mantém a mesma ideia.

A metodologia utilizada no presente trabalho é semelhante à metodologia proposta por Chiew (2006), na qual ele propõe uma análise da elasticidade da vazão em função da precipitação média ou da temperatura média.

Essa análise da elasticidade da vazão, proposta por Chiew (2006), é feita considerando uma alteração fixa na precipitação, baseada nas projeções futuras. Por exemplo, se as projeções futuras indicam um aumento de 10% na precipitação, essa taxa seria aplicada em toda a série de valores observados no período passado.

A diferença básica entre as metodologias é que ao invés de utilizar uma taxa fixa de variação em todo o período dos dados, foram utilizadas diferentes taxas de variações. Essas variações são determinadas para cada mês e para cada valor de probabilidade de ocorrência, possibilitando, dessa forma, uma maior sensibilidade nos resultados.

Uma vez obtidos os deltas das precipitações de cada mês, entre os períodos passado e futuro, simulados pelo modelo Eta, conforme exemplificadas na Figura 20, os deltas são aplicados na precipitação média mensal observada em termos percentuais, de acordo com as equações 5.1 e 5.2. Assim, gera-se uma nova curva de permanência, contendo as precipitações perturbadas para cada mês do período.

$$\bar{P}_{OBS-Perturbada} = \frac{\bar{P}_{obs}}{(1 - \Delta)} \quad (5.1)$$

$$\Delta = \frac{\bar{P}_{fut} - \bar{P}_{passado}}{\bar{P}_{fut}} \quad (5.2)$$

Onde:

$\bar{P}_{OBS-Perturbada}$  - Precipitação média mensal observada com a perturbação;

$\bar{P}_{obs}$  - Precipitação média mensal observada;

$\Delta$  - Variação da precipitação;

$\bar{P}_{fut}$  - Precipitação média mensal do Eta, para o período futuro;

$\bar{P}_{passado}$  - Precipitação média mensal do Eta, para o período passado.

Esse procedimento será repetido para todas as sub-bacias e para todos os períodos do futuro, cada um com suas curvas de permanência e faixas de perturbação.

Após corrigir todas as precipitações mensais, o próximo passo foi expandir essa série de dados mensais para uma série diária. Essa expansão deve ser de tal forma que, a média mensal da série diária fosse igual a da série que a originou.

A série diária utilizada é a própria série observada diária de cada sub-bacia, sem nenhuma alteração. A equação 5.3 mostra como foi modificada ou alterada essa série diária.

$$P_{OBS(diária)-Perturbada} = P_{Diária} \cdot \frac{\bar{P}_{perturbada}}{\bar{P}_{OBS}} \quad (5.3)$$

Onde:

$P_{Diária}$  - Precipitação diária observada sem alteração;

$\bar{P}_{perturbada}$  - Precipitação média mensal perturbada;

$\bar{P}_{OBS}$  - Precipitação média mensal observada;

$P_{OBS(diária)-Perturbada}$  - Precipitação observada diária perturbada.

O último passo dessa sequência seria criar a série diária perturbada para cada célula do modelo hidrológico. Lembrando que até agora, os dados de precipitação são referentes às sub-bacias, que são um conjunto de células.

A metodologia utilizada para a expansão da precipitação diária de cada sub-bacia, para cada uma de suas células, é exatamente a mesma utilizada para passar de mensal para diária, equação 5.3. O formato da equação 5.4 é a mesma que a 5.3; as diferenças entre elas são os nomes e os tipos das variáveis, passando de dados mensais para dados diários.

$$P_{célula(diária)-Perturbada} = P_{Diária da célula} \cdot \frac{P_{OBS(diária)-Perturbada}}{P_{OBS diário}} \quad (5.4)$$

Onde:

$P_{OBS(diária)-Perturbada}$  - Precipitação diária perturbada, da sub-bacia em análise;

$P_{OBS diário}$  - Precipitação diária observada da sub-bacia em análise;

$P_{Diária da célula}$  - Precipitação diária de cada célula dentro da sub-bacia em análise;

$P_{célula(diária)-Perturbada}$  - Precipitação diária perturbada de cada célula dentro da sub-bacia em análise.

Com os dados de precipitação perturbados e formatados, terá início a próxima etapa, que é a simulação dos cenários de vazão no modelo hidrológico, sem os efeitos da temperatura média.

### **5.3 Perturbação na Temperatura Média Mensal Observada**

A temperatura é uma variável muito importante dentro do modelo hidrológico, por isso surgiu a necessidade de realizar uma análise na variação da temperatura superficial sobre a bacia do Rio São Francisco, de acordo com os cenários futuros do modelo Eta. Essa é uma importante análise, pois ela verifica o quanto a variação de temperatura, juntamente com a precipitação, afetaria o regime das vazões da bacia.

Os dados de temperatura média mensal observada foram obtidos por meio de 26 estações climatológicas, que estão localizadas dentro ou próximas do limite da bacia do rio São Francisco.

Por motivos de simplificação, o modelo hidrológico MGB trabalha com os dados das normais climatológicas das estações climáticas selecionadas.

A metodologia aplicada para determinar qual será a variação da temperatura no futuro é semelhante à empregada para a precipitação, com uma pequena ressalva: não será gerada uma série diária dos dados de temperatura. De forma bem resumida, a metodologia da perturbação na temperatura pode ser descrita da seguinte forma:

- Como o MGB trabalha com os dados das estações climáticas, verificou-se os pontos de grade do modelo Eta que estavam mais próximos de cada estação;
- Feito isso, os dados do modelo Eta foram transpostos para as estações climáticas, para todos os períodos (1961 a 2099);
- A partir daí foram feitas as diferenças (deltas) entre o período passado e os períodos futuros, para os dois membros do modelo Eta, e
- Por fim, os deltas foram aplicados, em termos percentuais, na temperatura média mensal observada em cada estação.

Essa análise da temperatura média permitiu gerar novas possibilidades de cenários hidrológicos futuros sobre a bacia, ou seja, cenários considerando as precipitações alteradas

somados com os efeitos das temperaturas médias mensais alteradas, baseados nas projeções futuras do modelo Eta.

## **5.4 Gerações dos Cenários de Vazões Futuras**

Com os principais dados de entrada do modelo hidrológico (precipitação e temperatura), será possível simular a vazão da bacia do rio São Francisco, sob os efeitos das projeções climáticas futuras.

Serão analisados separadamente os períodos futuros, 2011 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099. O modelo hidrológico fornece como dado de saída, a série de vazões diárias para cada sub-bacia. A partir dessas séries serão feitas as análises pertinentes para cada caso e período.

Em uma primeira análise serão simuladas e analisadas as séries de vazões contemplando apenas a variação futura na precipitação, ou seja, as outras variáveis climatológicas do modelo como a temperatura, vento, pressão atmosférica, por exemplo, serão mantidas constantes ou inalteradas.

Em uma segunda e importante análise sobre as vazões futuras, é verificar quais seriam os efeitos sentidos na vazão com a inclusão da temperatura alterada. Apenas para efeito de verificação, serão simuladas as vazões somente sob o efeito das variações da temperatura futura, mantendo a precipitação observada sem alteração.

E finalmente será analisado um último caso, e o mais completo de todos, que visa mesclar os efeitos das duas variáveis analisadas anteriormente, a precipitação e a temperatura média.

## **5.5 Análise da Energia Assegurada**

A metodologia para se determinar a energia assegurada de uma PCH é descrita pela resolução nº 169 / 2001 da ANEEL, que determina dentre outras coisas, que a série de vazões no local do empreendimento tenha um período mínimo de 30 anos de dados, porém, em alguns aproveitamentos, não existem séries de vazões diárias iniciando em 1961. Portanto, decidiu-se utilizar os dados simulados pelo modelo hidrológico, com base nos dados observados da bacia do rio São Francisco.

Para uma análise das possíveis variações na energia assegurada futura, serão feitas comparações entre as energias asseguradas simuladas, com os dados de vazões observadas (simulados pelo MGB), no período de 1961 a 1990 com as séries de vazões futuras, de acordo com as projeções futuras do modelo Eta, para os três períodos futuros, 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099.

Foram escolhidos quatro empreendimentos inventariados em diferentes sub-bacias do rio São Francisco, ou seja, usinas ou potenciais hidráulicos que ainda não estão sendo explorados.

A escolha de aproveitamentos de diferentes sub-bacias ou regiões possibilita uma maior sensibilidade no estudo, como por exemplo, quais seriam as respostas hídricas e energéticas em diferentes pontos da bacia sob um determinado cenário climático futuro.

Os empreendimentos analisados estão nas seguintes sub-bacias do rio São Francisco, lembrando que foram escolhidos os aproveitamentos com maior potencial:

- **Bacia do rio do Sono**, que é um importante afluente do rio Paracatú, que por sua vez é um importante afluente do rio São Francisco. O aproveitamento nesta sub-bacia é o com maior potencial energético analisado neste trabalho, com aproximadamente 27 MW;
- **Bacia do rio Abaeté**, que é um afluente direto do rio São Francisco. O aproveitamento possui um potencial de 20 MW;
- **Bacia do rio Grande** no Estado da Bahia, que é um importante afluente do rio São Francisco neste Estado. O potencial energético do aproveitamento analisado nesta sub-bacia é de 14 MW, e
- **Bacia do rio Jequitaiá** que também é um afluente direto do rio São Francisco. Dentre os vários potenciais localizados neste rio, foi escolhido o empreendimento com maior potencial, que neste caso é de aproximadamente 7.6 MW.

A Figura 21 mostra a localização dos diferentes aproveitamentos analisados na bacia do rio São Francisco.

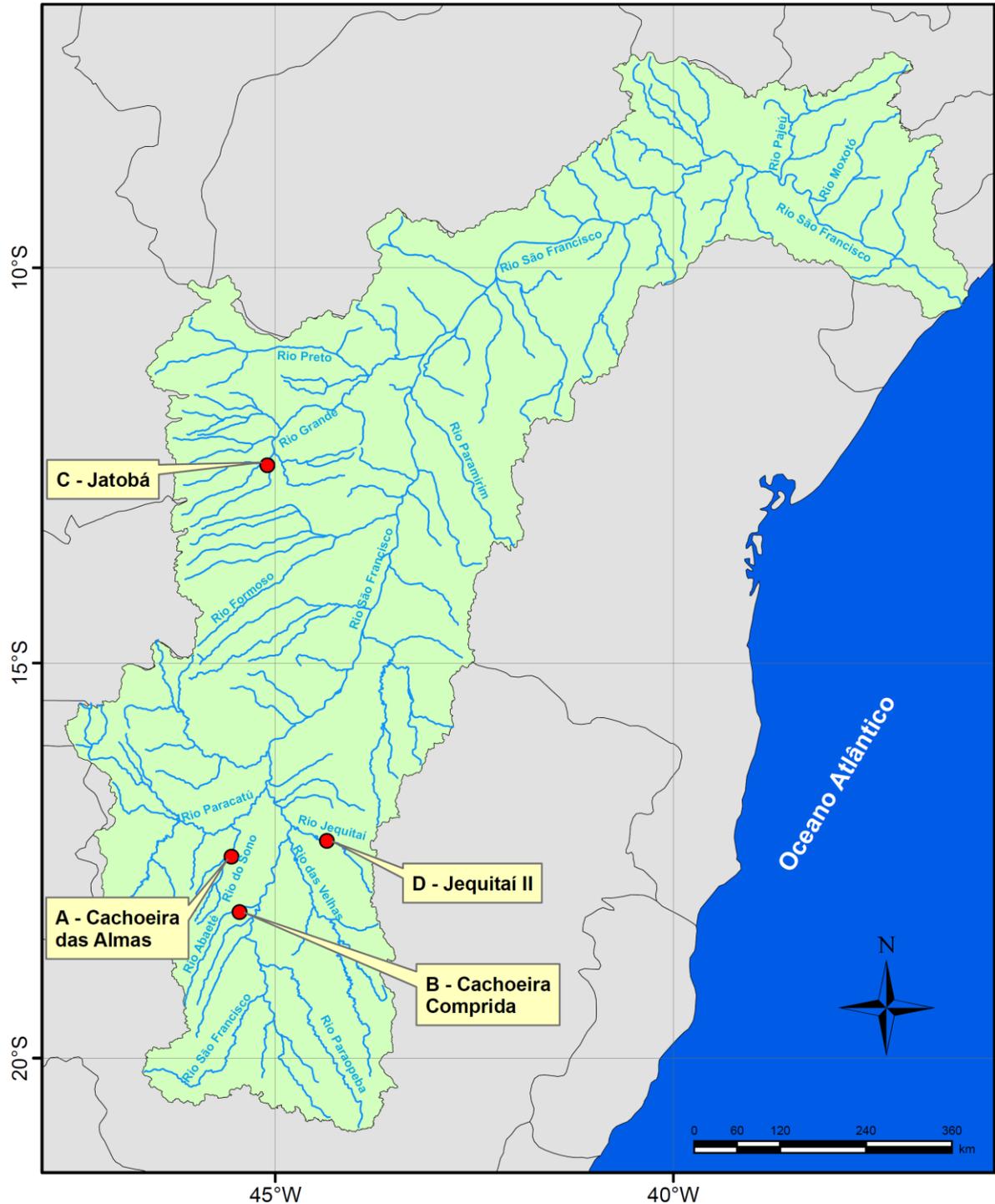


Figura 21. Localização dos aproveitamentos analisados na bacia do rio São Francisco.

De acordo com o Art.4 da resolução nº 169 / 2001 da ANEEL, a energia assegurada de uma PCH deverá ser igual à média da energia que o aproveitamento poderia gerar, levando-se em consideração a série de vazões, de no mínimo 30 anos de dados, a produtividade média, a indisponibilidade total e a potência instalada.

Além das vazões, é necessário conhecer a queda líquida da central, o rendimento total da PCH e as possíveis vazões residuais ou de desvio (para manter escadas de peixes, oxigenação da água, etc.).

A energia que poderia ser gerada por uma PCH, sem considerarmos as indisponibilidades, é dada pelo produto entre produtividade média e o vetor de vazões afluentes do histórico, limitada pela potência instalada, de acordo com a equação 5.5:

$$E_i = \text{mín} [P_{inst}; p_M \cdot (Q_i - Q_d)] \quad (5.5)$$

Onde:

$E_i$  – Energia média do mês “i” [MWmédio];

$P_{inst}$  – Potência instalada [MW];

$p_M$  – Produtibilidade média da PCH [MW/m<sup>3</sup>/s];

$Q_i$  – Vazão média do mês “i” do histórico [m<sup>3</sup>/s];

$Q_d$  – Vazão desviada [m<sup>3</sup>/s].

A energia média da PCH, equação 5.6, será determinada pela média dos valores anteriores calculados na equação 5.5, que será igual a:

$$E_M = \left( \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \right) \quad (5.6)$$

Onde:

$E_M$  – Energia média do período [MWmédio];

$E_i$  – Energia média do mês “i” [MWmédio];

$n$  – Número de meses do estudo.

A energia média é dada pela equação 5.7, considerando os fatores de indisponibilidade forçada e programada. Parte dos resultados da equação 5.6, será:

$$E_M' = E_M \cdot (1 - TEIF) \cdot (1 - IP) \quad (5.7)$$

Onde:

$E_M'$  – Energia média do período já considerando indisponibilidades [MWmédio];

$E_M$  – Energia média do período [MWmédio];

$IP$  – Indisponibilidade programada [%];

$TEIF$  – Taxa equivalente de indisponibilidade forçada [%].

O cálculo das indisponibilidades das PCHs é feita da mesma forma para as UHEs, de acordo com as equações 5.8 e 5.9.

$$TEIF = IF = \frac{\sum_{i=1}^n (HI_{FI} \cdot Pot_i)}{\sum_{i=1}^n (HP \cdot Pot_i)} \quad (5.8)$$

$$IP = \frac{\sum_{i=1}^n (HI_{PI} \cdot Pot_i)}{\sum_{i=1}^n (HP \cdot Pot_i)} \quad (5.9)$$

Onde:

$n$  – Número de unidades geradoras da PCH;

$HI_{FI}$  – Horas de indisponibilidade forçada da unidade “i”;

$HI_{PI}$  – Horas de indisponibilidade programada da unidade “i”;

$HP$  – Total de horas do estudo;

$Pot_i$  – Potência da unidade geradora “i” [MW].

Portanto, como dito anteriormente, a energia assegurada da PCH será igual a energia média, equação 5.10.

$$E_{Assegurada} = E_M' \quad (5.10)$$

## **6 RESULTADOS**

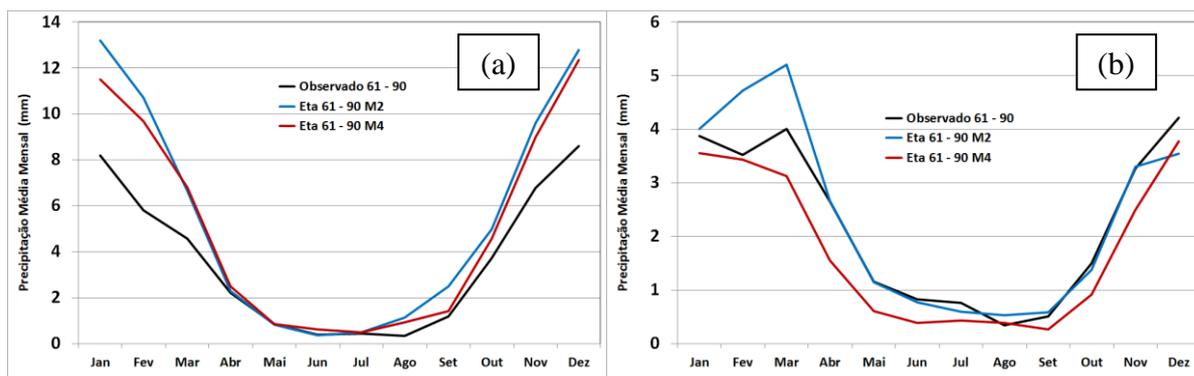
### **6.1 Análise de Desempenho do modelo Eta na Representação do Clima Atual**

Essa primeira análise é muito importante, pois é a partir dela que podemos avaliar se o modelo atmosférico consegue representar bem o comportamento ou a sazonalidade das variáveis climáticas dentro da bacia, em outras palavras, se o período de chuvas simuladas pelo modelo coincide com a realidade, por exemplo.

Lembrando que será analisado apenas o comportamento da precipitação, ou seja, se os períodos úmidos e secos se coincidem. As diferenças entre as projeções e os dados observados serão analisadas mais adiante.

A bacia do rio São Francisco é muito extensa e possui grandes diferenças climáticas, conseqüentemente, há uma grande variabilidade espacial da precipitação dentro dela. A parte alta da bacia é mais úmida e o restante da bacia é mais seco, principalmente na região do polígono das secas do nordeste brasileiro. Portanto, as análises serão divididas nessas duas regiões distintas para verificar se de modo geral o modelo Eta consegue representar essa diferença regional da bacia.

A Figura 22 apresenta as curvas das precipitações médias mensais para o período de 1961 a 1990 para a parte alta (a), as partes média e baixa (b) da bacia. A figura compara a sazonalidade observada e a simulada pelo modelo Eta para os dois membros do modelo considerados (M2 e M4).

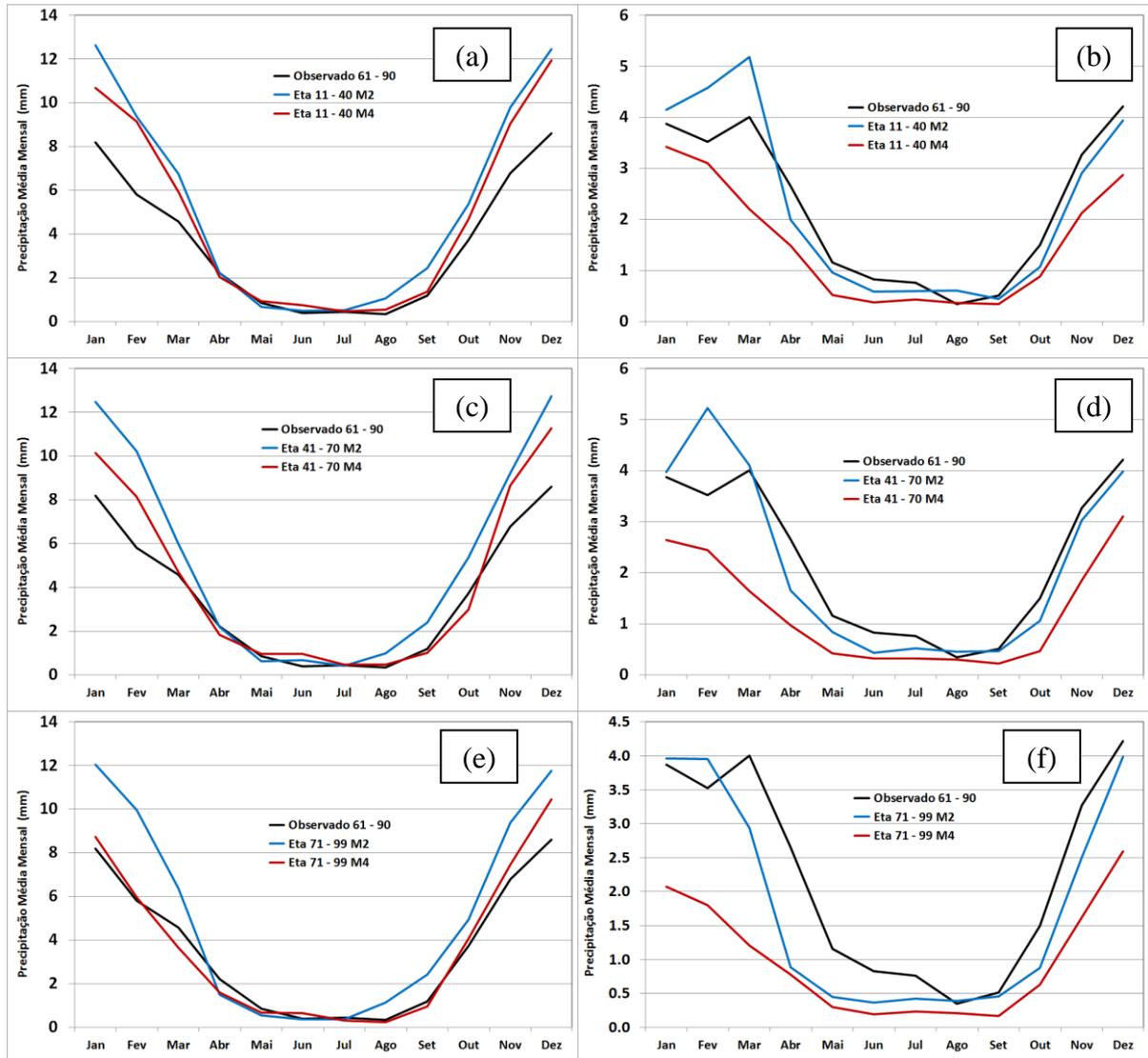


**Figura 22. Comparação entre a sazonalidade da precipitação média mensal observada e as sazonalidades geradas pelos membros do modelo Eta. Comparações sobre a parte alta (a) e as partes média e baixa (b) da bacia do rio São Francisco para o período de 1961 a 1990.**

Ao analisar a Figura 22, verifica-se que o modelo Eta representa muito bem a sazonalidade da precipitação observada, em ambas partes da bacia, para os dois membros considerados.

Para uma análise complementar, foram feitos os mesmo gráficos para os períodos futuros, a fim de verificar se o clima futuro apresenta uma sazonalidade parecida com a observada. Ou seja, se nas projeções futuras não haverá mudanças no comportamento hidrológico, como o deslocamento dos períodos úmidos e secos ao longo do século XXI, por exemplo.

As curvas das precipitações médias mensais futuras, simuladas pelo modelo Eta, são apresentadas na Figura 23. Todas elas estão comparando as precipitações, com as projeções futuras, com a observada no período de 1961 a 1990, para ambos os membros do modelo Eta. Em (a), (c) e (e) são as curvas para a parte alta da bacia e em (b), (d) e (f) são as curvas para as partes média e baixa da bacia.



**Figura 23.** Comparação entre a sazonalidade da precipitação média mensal observada e as sazonalidades geradas pelos membros do modelo Eta. Comparações sobre a parte alta (a), (c) e (e) e as partes média e baixa (b), (d) e (f) da bacia do rio São Francisco para os períodos futuros (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099).

Na Figura 23, observa-se que para os períodos futuros a precipitação média mensal, simulada pelo modelo Eta, apresentam a mesma sazonalidade verificada no período atual observado.

Essa manutenção do comportamento das curvas das precipitações é muito importante, pois significa que para as projeções futuras do modelo Eta o regime hidrológico da bacia do rio São Francisco não mudará até o final do século.

## 6.2 Precipitação Perturbada

Para avaliar o comportamento futuro da precipitação, utilizou-se uma metodologia bastante difundida em previsões climáticas de precipitação, que está descrita no item 5.2.3. A metodologia utilizada é algo semelhante às metodologias propostas por Hay et al. (2002); Hay e Clark (2003); Chiew (2006) e Lenderink et al. (2007).

Uma das vantagens deste método é que ele permite a manutenção da variabilidade interanual da precipitação.

A perturbação na precipitação foi concebida a partir dos deltas ou das diferenças entre as precipitações do período passado, com os diferentes períodos futuros, para ambos os membros do modelo Eta. Os deltas foram aplicados na precipitação observada (MGB) em termos percentuais. Gerando assim diferentes cenários de precipitações sob os efeitos das projeções climáticas futuras simulados pelo modelo Eta.

A Figura 24 apresenta a comparação entre a precipitação média mensal observada, e as projeções futuras com base nos membros do modelo Eta. Os gráficos mostram as evoluções das projeções futuras da precipitação nos três períodos futuros, tanto na parte alta (a), (c) e (e) quanto nas partes média e baixa (b), (d), e (f) da bacia do rio São Francisco.

A Tabela 5 mostra a evolução das projeções das precipitações futuras em relação à observada. São mostradas as variações da precipitação de acordo com os membros do modelo Eta, para as diferentes partes da bacia (alta, média e baixa). Os resultados são em termos percentuais médios no ano.

**Tabela 5. Comparação em termos percentuais entre as projeções futuras das precipitações com a precipitação média mensal observada. Para as partes alta, média e baixa da bacia do rio São Francisco.**

Período Futuro	Parte Alta		Parte Média e Baixo	
	Membro M2	Membro M4	Membro M2	Membro M4
<b>2011 a 2040</b>	+2.8 %	-3.3 %	-3.7 %	-4.0 %
<b>2041 a 2070</b>	+2.1 %	-11.6 %	-9.2 %	-27.7 %
<b>2071 a 2099</b>	-6.7 %	-27.8 %	-23.7 %	-42.2 %

Comparando os dados entre os membros do modelo Eta, apresentados na Tabela 5, nota-se que a projeção da precipitação futura varia consideravelmente. Na parte alta da bacia, a diferença entre as projeções do membro M2 e a observada, apresenta um ligeiro aumento nos dois períodos; a redução na precipitação será significativa somente na parte final do século. Já para as projeções do membro M4 a redução da precipitação média sobre essa parte

da bacia passa a ser preocupante bem antes, por volta do ano de 2050, atingindo o nível mais crítico ao final do século.

Ainda analisando a Tabela 5, percebe-se que na parte média e baixa da bacia as projeções são de redução das precipitações, em ambos os membros do modelo Eta. O último período (2071 a 2099) é o mais crítico, principalmente para o membro M4. Com uma redução na precipitação que chega a ser quase o dobro, se comparada com o outro membro.

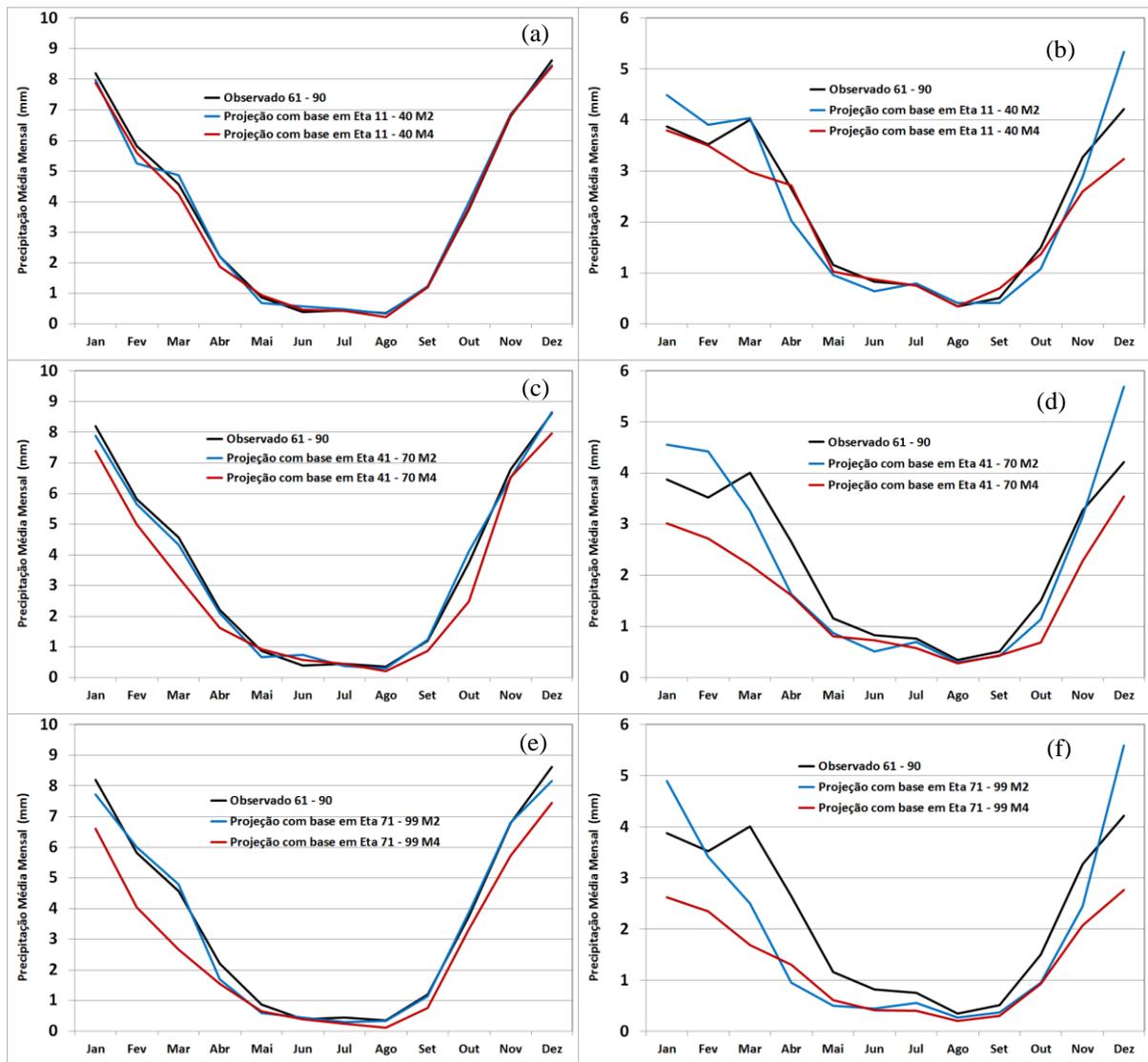


Figura 24. Comparação entre a precipitação média mensal observada no período 1961 a 1990 e as modificações obtidas com base nos cenários futuros do Eta (2011-2040 (a) e (b), 2041-2070 (c) e (d), e 2071-2099 (e) e (f)), em valores médios na parte alta da bacia (a), (c) e (e) e nas partes média e baixa da bacia (b), (d) e (f) .

Ao analisar a Figura 24, percebe-se que para a parte alta da bacia e para o membro M2, a precipitação média mantém-se praticamente constante ao longo do século; já para o membro M4, a queda na precipitação é gradativa ao longo do tempo. Para a parte média e baixa da bacia a precipitação tende a cair no período úmido, principalmente para o membro M4. A diminuição é mais evidente a partir do ano de 2041.

É importante salientar que todos os cálculos das perturbações na precipitação foram feitos para todas as 2502 células, que por sua vez formam todas as sub-bacias a serem modeladas. Possibilitando assim uma análise espacial da variação das projeções da precipitação dentro da bacia.

As espacializações das variações das projeções futuras da precipitação, em relação à observada na bacia do rio São Francisco estão ilustradas nas Figura 25 a Figura 27. Nelas são apresentadas as diferenças entre às precipitações perturbadas futuras, de ambos os membros, com as precipitações observadas no clima presente (1961-1990), em termos percentuais.

Nas comparações foram considerados os períodos com maiores volumes de chuva, que ocorrem nos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro (DJF), também foram considerados os períodos mais secos, que ocorrem nos meses de Junho, Julho e Agosto (JJA). Finalmente, são apresentadas as comparações da precipitação média anual de cada período futuro.

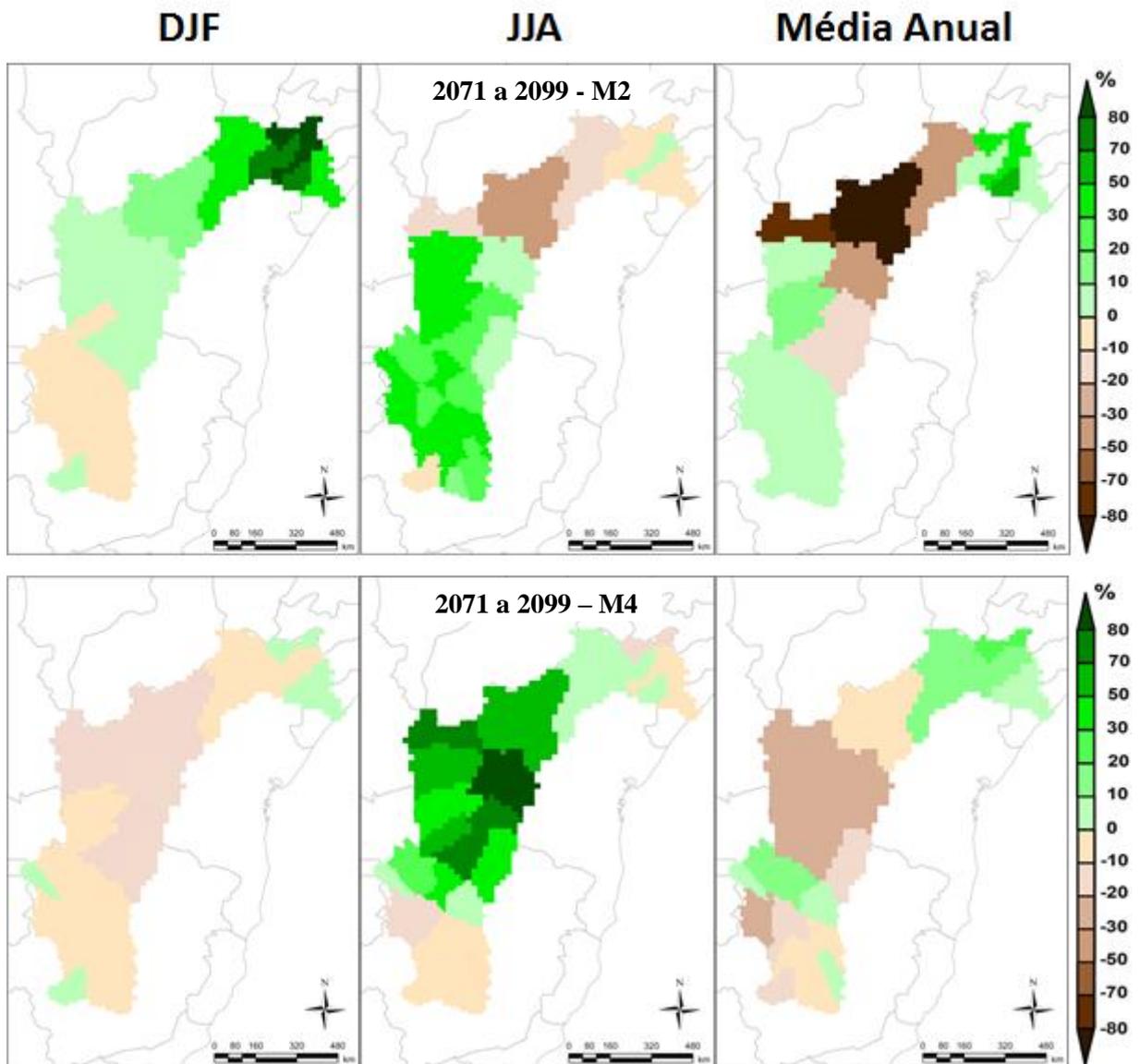


Figura 25. Variações entre as projeções futuras das precipitações com as do clima atual. Dados referentes ao período úmido (DJF), seco (JJA) e média anual. Projeções para o período de 2011 a 2040.

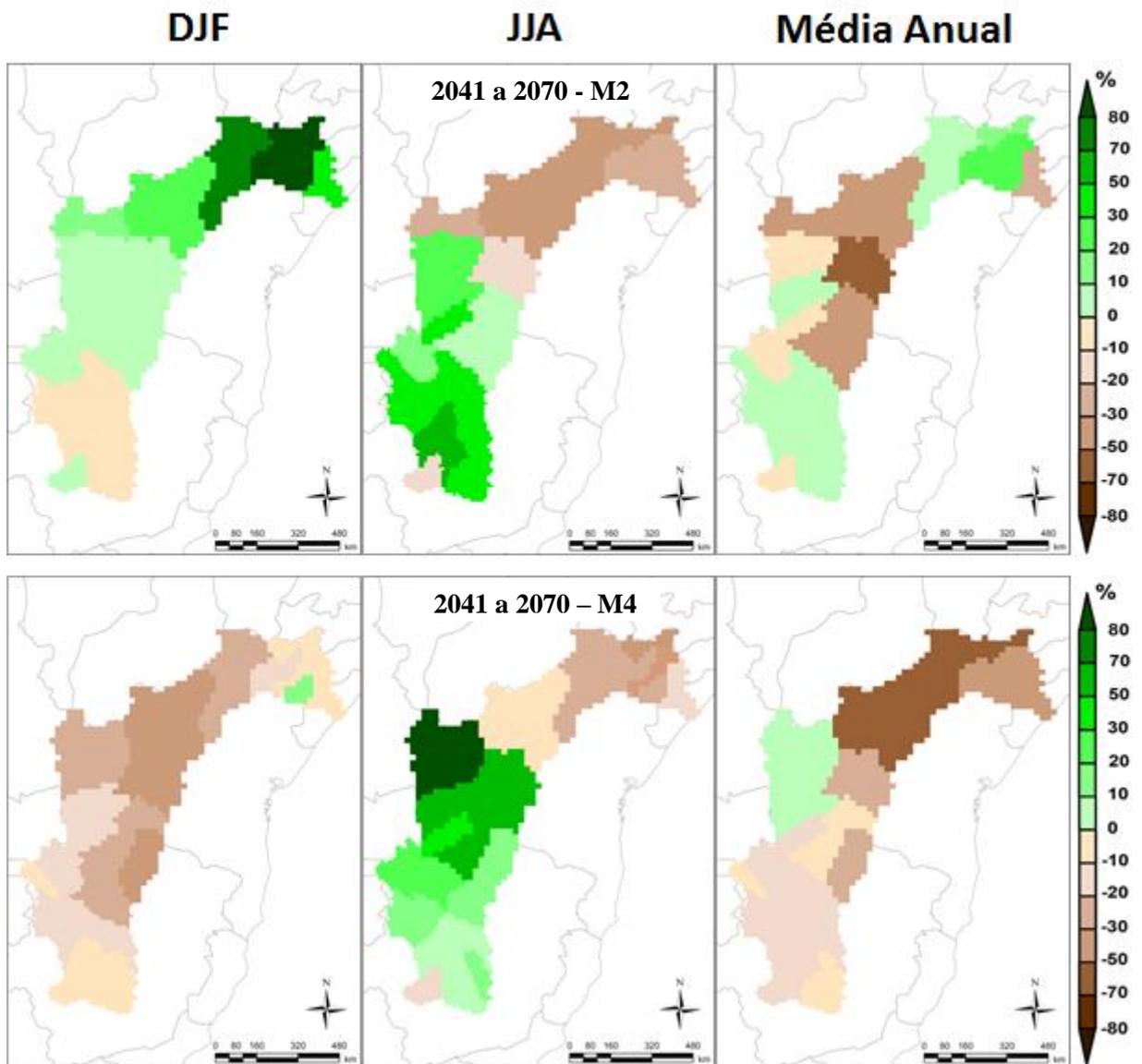
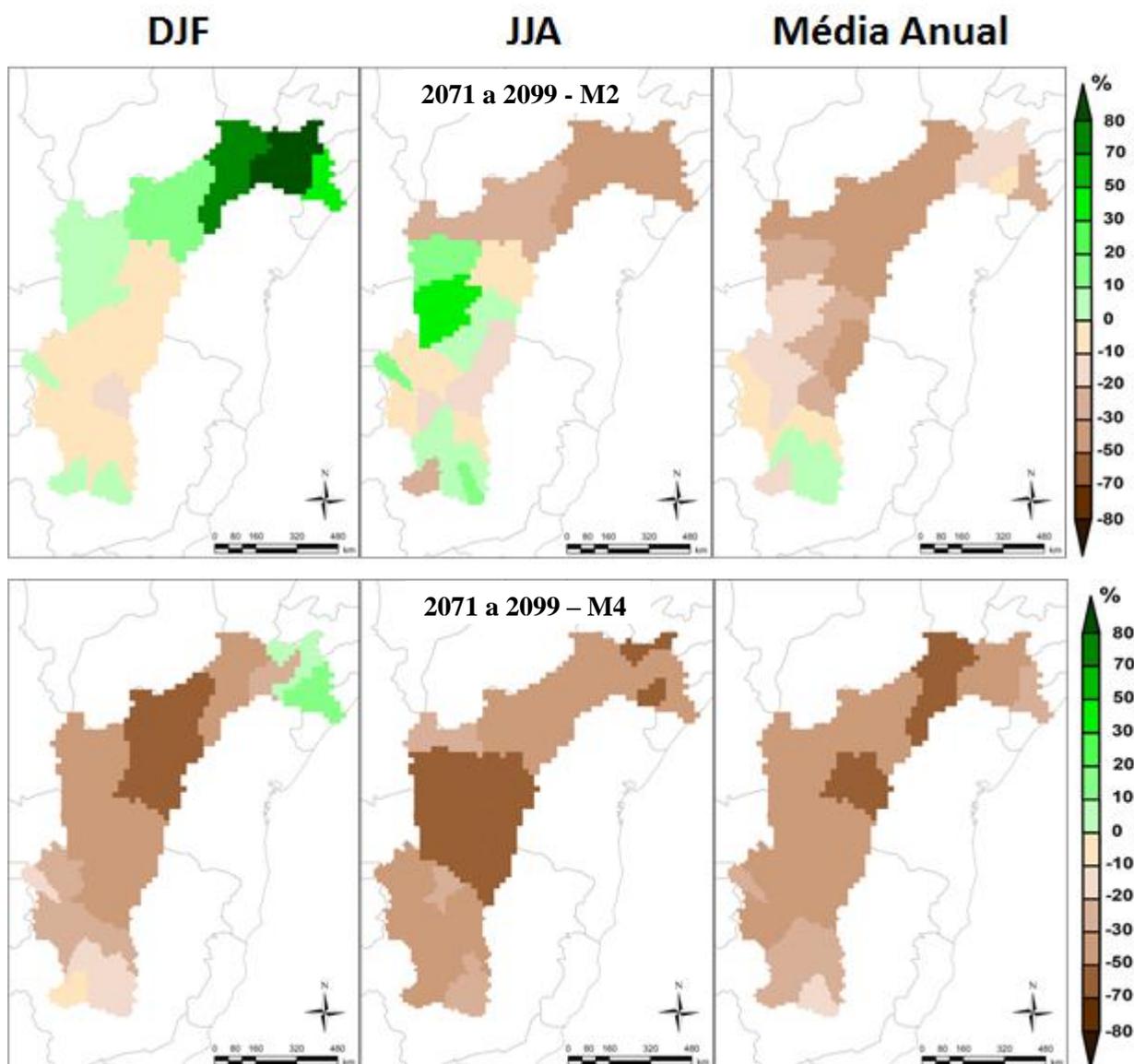


Figura 26. Variações entre as projeções futuras das precipitações com as do clima atual. Dados referentes ao período úmido (DJF), seco (JJA) e média anual. Projeções para o período de 2041 a 2070.



**Figura 27. Variações entre as projeções futuras das precipitações com as do clima atual. Dados referentes ao período úmido (DJF), seco (JJA) e média anual. Projeções para o período de 2041 a 2070.**

Ao analisar as Figura 25 a Figura 27 nota-se que no período úmido (DJF), para o membro M2, há um aumento da precipitação na parte mais baixa da bacia. Na parte alta da bacia observa-se que há uma ligeira redução da precipitação ao longo do tempo. Já para o membro M4 nota-se uma redução gradativa da precipitação ao longo do tempo principalmente na parte média da bacia. No último período nota-se que na parte mais baixa, mais próxima do litoral, apresenta um ligeiro aumento na precipitação.

No período de estiagem (JJA), para o membro M2, nota-se que as regiões da bacia (alta e parte da média-alta) que apresentam aumento na precipitação vão diminuindo ao longo do tempo. O membro M4 apresenta uma tendência de aumento na precipitação nos dois

primeiros períodos principalmente na parte média da bacia, já no último período o quadro se inverte apresentando reduções da precipitação em toda a bacia.

Apesar das projeções de ambos os membros apresentarem ligeiros aumentos na precipitação em determinadas regiões da bacia, esses aumentos não são significativos em termos de volume. Pois naturalmente o volume precipitado neste período é baixo, logo qualquer alteração na precipitação pode ser significativa em termos percentuais.

Continuando a análise das Figura 25 a Figura 27 nota-se as projeções futuras do membro M2 mostram que a parte média da bacia irá sofrer reduções consideráveis, principalmente no primeiro período analisado (2011 a 2040). Já na parte mais alta da bacia, as projeções apontam uma tendência de redução na precipitação à medida que o tempo passa.

As projeções do membro M4 apontam reduções graduais nas precipitações ao longo do tempo na parte alta da bacia. Na parte mais baixa da bacia, para o primeiro período, as projeções futuras apresentam uma tendência de ligeiro aumento na precipitação. Para os demais períodos a situação se inverte e as projeções apontam uma tendência de redução nas precipitações.

Na parte média da bacia, de modo geral, as projeções apontam uma tendência de redução nas precipitações para essa região, com exceção do período de 2041 a 2070, onde as projeções da precipitação apontam uma tendência de ligeiro aumento. As projeções futuras para o último período futuro (2071 a 2099) é a mais crítica dentre todos os períodos analisados, para ambos os membros do modelo Eta.

### **6.3 Temperatura Média Mensal Perturbada**

Outra variável climática importante estudada foi a temperatura média mensal. Foram analisadas quais seriam os seus efeitos em virtude dos cenários de aumento na temperatura média global, sobre o regime hidrológico da bacia do rio São Francisco. Porém, ao contrário da precipitação, a temperatura é uma variável mais simples de ser analisada.

Por motivos de simplificação do MGB, não serão utilizados dados diários, para essa variável. O modelo hidrológico foi ajustado com as normais climatológicas de 26 estações climatológicas que estão dentro ou próximas à bacia (SILVA, 2005).

A metodologia para determinar o quanto será elevada a temperatura média ao longo do século XXI, é praticamente a mesma usada para a precipitação, conforme descrito no item 5.3.

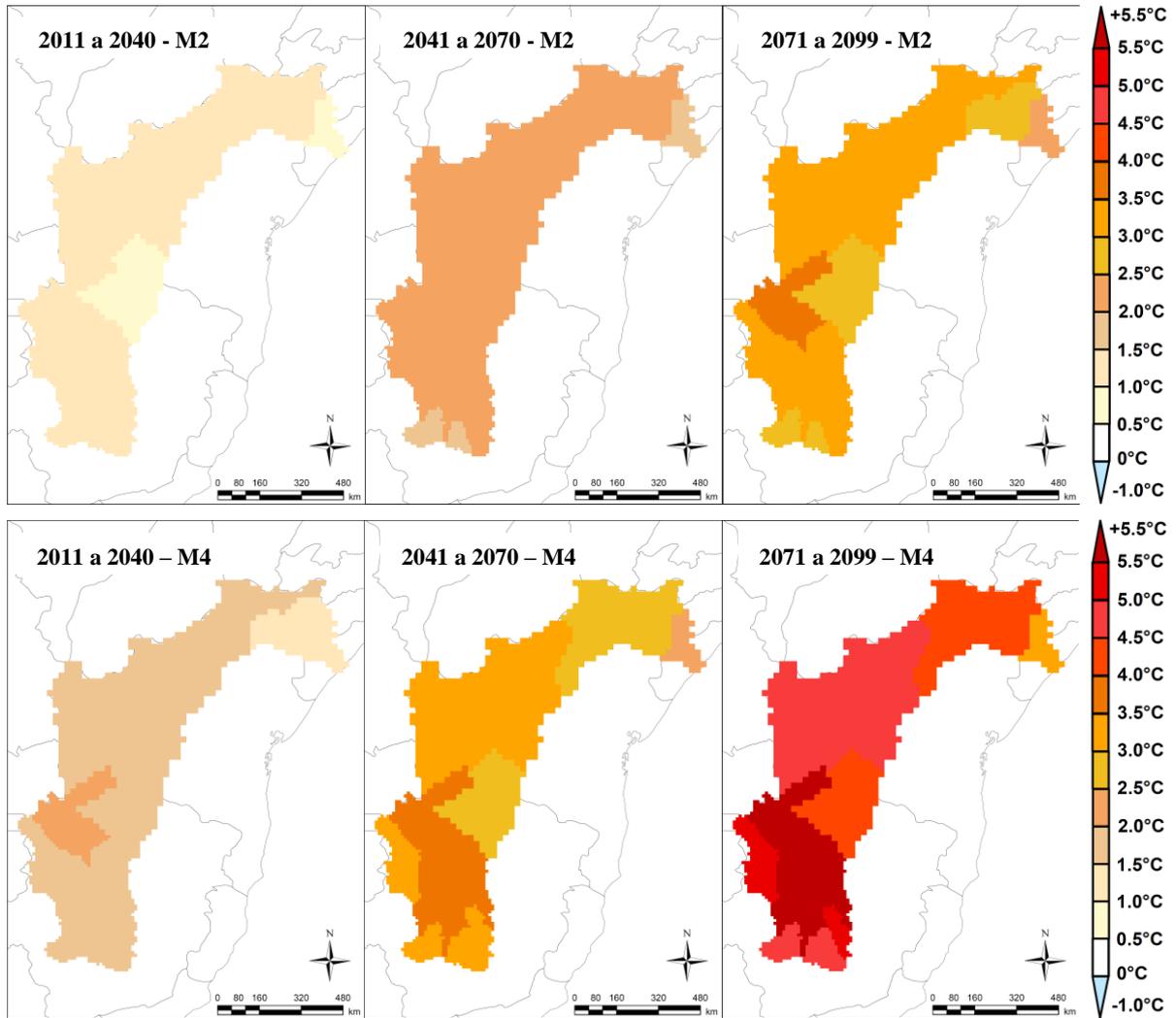
A Tabela 6 apresenta a variação das projeções da temperatura em relação à média observada sobre a bacia. Os dados são referentes a média das temperatura perturbadas em cada estação climatológica.

**Tabela 6. Variação da temperatura média mensal, entre as projeções futuras em relação à observada. Projeções feitas pelos dois membros do modelo Eta.**

<b>Período Futuro</b>	<b>Membro M2</b>	<b>Membro M4</b>
<b>2011 a 2040</b>	0.8 ~ 1.3° C	1.3 ~ 2.1° C
<b>2041 a 2070</b>	1.5 ~ 2.4° C	2.2 ~ 3.8° C
<b>2071 a 2099</b>	2.0 ~ 3.6° C	3.3 ~ 5.7° C

Percebe-se que para o membro M2 a temperatura média tende a aumentar aproximadamente em 1° C a cada 30 anos. Já para o membro M4 essa tendência é ainda maior, de aproximadamente 1.5° C a cada 30 anos. Lembrando que esses valores são uma média geral em toda bacia, podendo variar um pouco dentro da bacia, como o aquecimento de 5.7 ° C em determinados pontos dentro da bacia, segundo as projeções do membro M4.

A Figura 28 ilustra, em escala de cores, os valores da elevação da temperatura média sobre a bacia do rio São Francisco, apresentados na Tabela 6. As cores mais escuras representam um aquecimento maior. Este mapa só faz referência ao aquecimento dentro da bacia, ou seja, não foram representadas ou consideradas as variações da temperatura fora dos limites da bacia.



**Figura 28.** Diferentes níveis de aquecimento na bacia do Rio São Francisco, em relação à média observada. Projeções futuras, de acordo com os dois membros do modelo Eta, para todos os períodos futuros analisados.

Ao analisar a Figura 28, nota-se que as projeções futuras, em ambos os membros, apontam que na parte centro-norte do Estado de Minas Gerais (parte alta da bacia) sofrerá com um maior aquecimento em relação ao restante da bacia.

## 6.4 Cenários de Vazão Futura

Neste tópico serão apresentados os resultados das projeções das vazões futuras, obtidas a partir dos cenários de mudanças climáticas do modelo Eta. Este tópico será

subdividido em três partes. A vazão será simulada pelo modelo hidrológico MGB das seguintes formas:

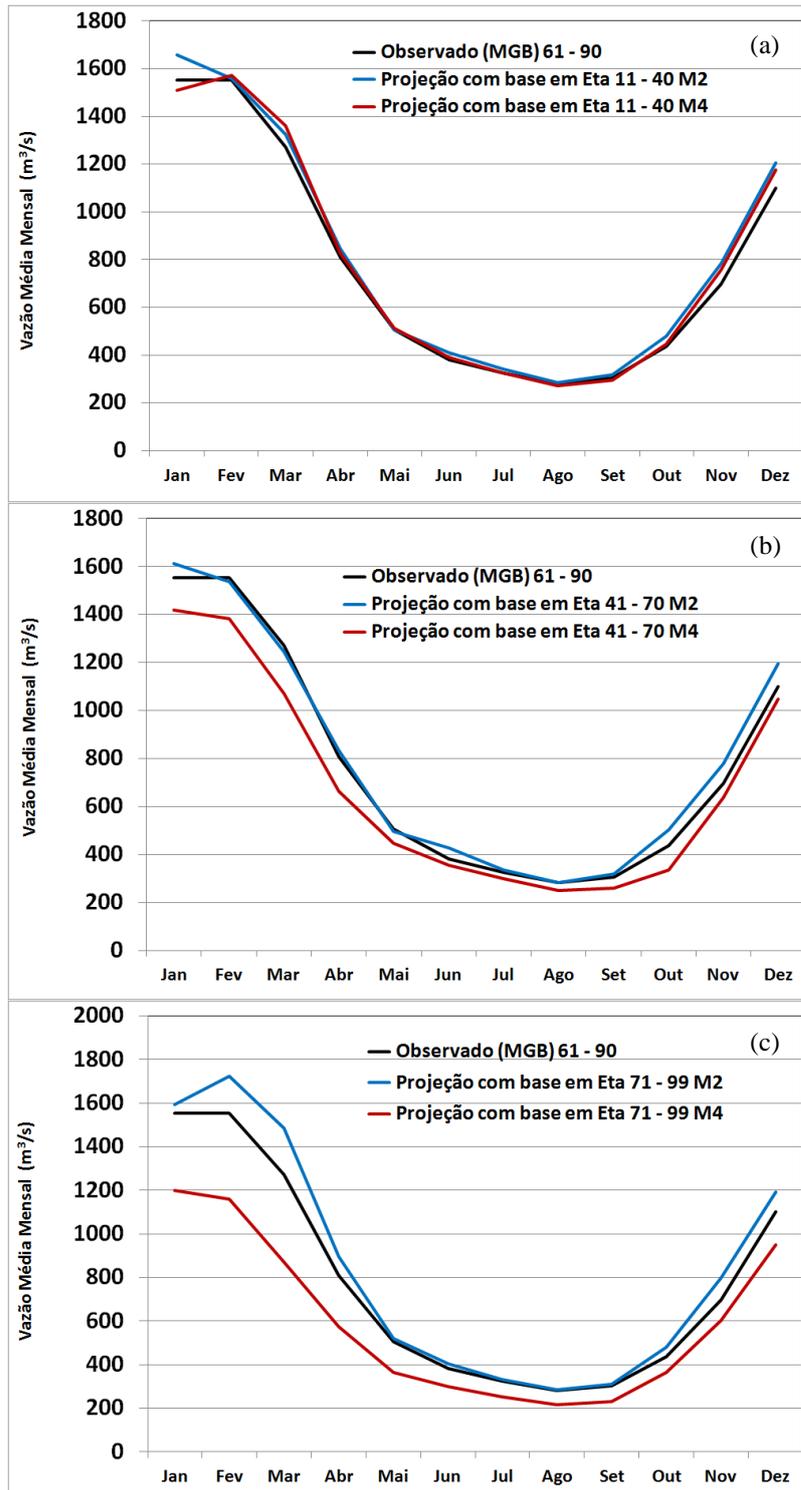
- Para a primeira simulação da vazão, foi considerada apenas a mudança no regime de chuvas, ou seja, o modelo hidrológico é alimentado apenas com as projeções futuras da precipitação, fornecido pelos dois membros do modelo Eta;
- Em uma segunda análise, a simulação da vazão foi feita considerando apenas a variação na temperatura média mensal. Mantendo a precipitação observada inalterada, e
- Por fim foi feita uma simulação mais completa, ou seja, foi feita uma simulação utilizando as projeções futuras das duas variáveis climáticas analisadas, a precipitação e a temperatura média.

#### **6.4.1 Cenário futuro da vazão - Precipitação**

A precipitação é a principal variável de entrada em um balanço hídrico de uma bacia, bem como a vazão na calha do rio é a principal saída desse balanço. Essa resposta da vazão é de suma importância para o setor hidroelétrico, principalmente para as pequenas centrais, pois qualquer mudança no regime natural pode trazer grandes prejuízos para o investidor ou inviabilizar o empreendimento.

Os dados da precipitação que incorporam as condições de cenário de mudanças climáticas foram devidamente inseridos no modelo hidrológico MGB, e como resposta obtém-se dados de vazões diárias, para cada uma das 27 sub-bacias do modelo. Para se reduzir o número de dados, e para facilitar as análises subsequentes, decidiu-se calcular as médias mensais para cada sub-bacia do modelo e em todos os períodos futuros.

A Figura 29 ilustra os resultados da vazão média na parte alta da bacia do rio São Francisco, os resultados abaixo são das projeções futuras das vazões afluentes à usina de Três Marias (sub-bacia de Três Marias do modelo MGB).



**Figura 29.** Comparação entre a vazão média observada (MGB) e as projeções das vazões médias futuras, considerando apenas a alteração na precipitação, de acordo com os dois membros do modelo Eta. Vazões afluentes a usina de Três Marias. (a) 2011 a 2040, (b) 2041 a 2070, (c) 2071 a 2099.

Ao analisar a Figura 29, percebe-se que no período de 2011 a 2040 a vazão média permanece praticamente inalterada em relação à vazão média observada. Para o período de 2041 a 2070, já existe uma discordância entre os membros; essa discordância não aparece de forma clara na precipitação média sobre a bacia, por isso é importante analisar cada região da

bacia separadamente. Essas diferenças entre os membros do modelo Eta podem ser mais intensas em algumas regiões. Para o membro M2, a vazão média tende a se manter praticamente a mesma, com um ligeiro aumento no período úmido. No membro M4 ocorre o contrário, a vazão tende a cair com valores mais expressivos durante o final do período úmido. Por fim, no período de 2071 a 2099 a discordância verificada no período anterior se intensifica.

Essa divergência das projeções das vazões futuras em Três Marias dificulta uma análise mais completa, pois para cada cenário o resultado é diferente. Nas projeções futuras apresentadas, a vazão média futura para essa sub-bacia tende a manter-se constante ou apresentar uma ligeira queda ao longo do tempo.

Serão também analisadas as curvas de permanências para cada um dos períodos. Essa análise é importante, pois nestas curvas é possível identificar o comportamento das vazões futuras, ou seja, em quais tipos de vazões ( $Q_{5\%}$ ,  $Q_{50\%}$ ,  $Q_{95\%}$ ) as alterações futuras são mais significativas.

A Figura 30 mostra a comparação entre as curvas de permanência com as vazões médias mensais observadas (MGB) e as projeções das vazões futuras afluentes da usina de Três Marias. Nota-se que para o primeiro período do futuro (2011 a 2040) não há grandes variações nas vazões futuras, apresentando um ligeiro aumento nas vazões nos eventos de cheia. Para o período de 2041 a 2070, o que chama a atenção é o aumento de quase 10% das vazões extremas no membro M2, ao contrário do membro M4 que, para essa mesma vazão, apresenta uma ligeira redução. Já para o período final do século as curvas de permanência ilustram melhor o ligeiro aumento das vazões de cheia para o membro M2.

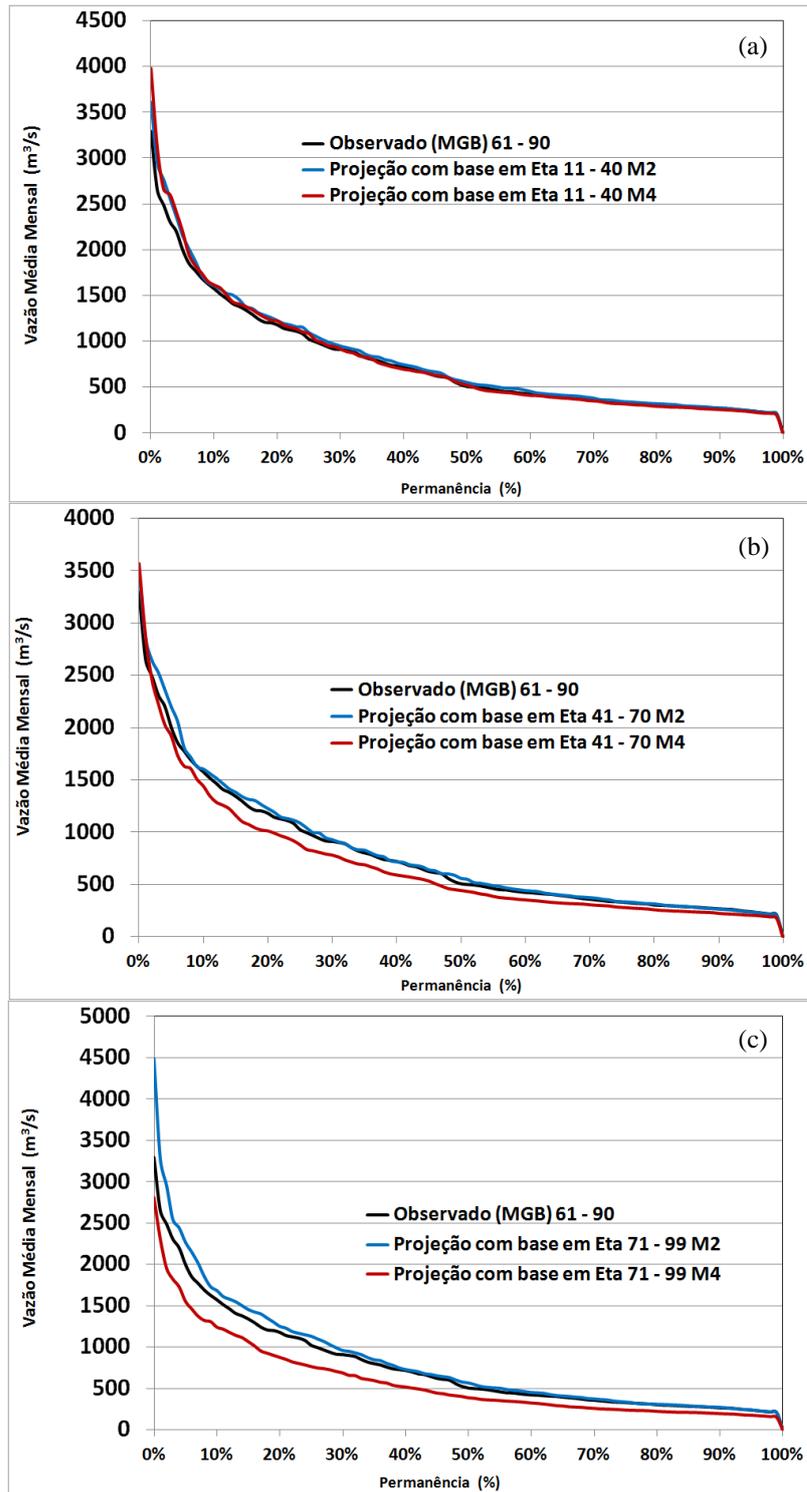
A Tabela 7 faz uma comparação das projeções das vazões características futuras afluentes na usina de Três Marias, em relação à observada (MGB), de acordo com cada membro futuro do modelo Eta.

**Tabela 7. Diferenças em porcentagem entre as projeções das vazões extremas e medianas com relação às observadas (MGB). Projeções referentes às vazões afluentes da usina de Três Marias.**

Vazões Afluente a Usina de Três Marias	Membro M2			Membro M4		
	2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099	2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099
$Q_{5\%}$	+7.7 %	+9.8 %	+13.3 %	+10 %	-4.2 %	-22.2 %
$Q_{50\%}$	+8.6 %	+10.2 %	+12.2 %	+2.7 %	-12.6 %	-23 %
$Q_{95\%}$	+0.6 %	-1.9 %	+1.1 %	-4.7 %	-14.2 %	-25.3 %

Ao analisar a Tabela 7, nota-se que para o membro M2 as vazões de cheia ( $Q_{5\%}$ ) apresentam um aumento crescente ao longo do tempo. Bem como para as vazões medianas ( $Q_{50\%}$ ) que apresentam a mesma tendência. Já para as vazões mais baixas ou de estiagem ( $Q_{95\%}$ ) ela se mantém praticamente constante.

No primeiro período, para o membro M4, as vazões de cheia e a mediana apresentam um ligeiro aumento, mas para a vazão de estiagem apresenta uma pequena queda. Para os demais períodos, todas as vazões analisadas apresentam quedas, sendo mais grave no último período analisado.



**Figura 30.** Curvas de permanência das vazões médias observadas (MGB) e as projeções futuras, considerando apenas a alteração na precipitação. Vazões afluentes a usina de Três Marias. (a) 2011 a 2040, (b) 2041 a 2070, (c) 2071 a 2099.

A Figura 31 apresenta os resultados da vazão na parte média da bacia do rio São Francisco; os resultados abaixo são para a seção onde se localiza o posto fluviométrico de Morpará. Esse é um posto importante, pois ele está localizado no rio São Francisco, a

montante do início do reservatório de Sobradinho, permitindo assim, estimar com razoável representatividade a vazão que chega ao reservatório.

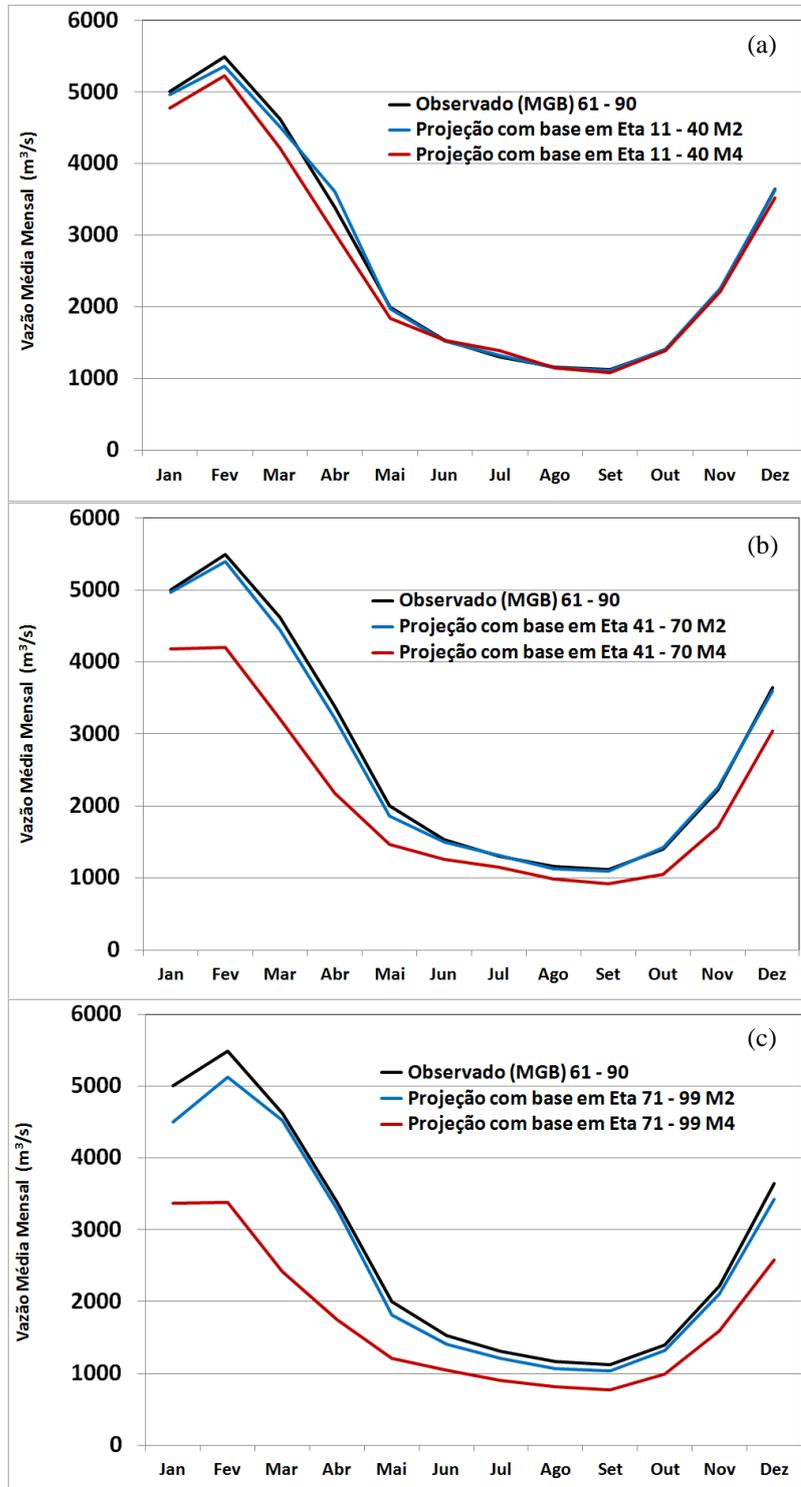


Figura 31. Comparação entre a vazão média observada (MGB) e as projeções das vazões médias futuras afluentes ao posto fluviométrico em Morpará, considerando apenas a alteração na precipitação, (a) 2011 a 2040; (b) 2041 a 2070; (c) 2071 a 2099.

Ao observar a Figura 31 nota-se que o comportamento das vazões futuras do rio São Francisco muda para esse trecho da bacia, com relação às vazões a montante (Três Marias). Para ambos os membros do modelo Eta a vazão média mensal tende a diminuir ao longo do século.

Para o membro M2 essa redução é relativamente pequena, podendo ser notada apenas nos meados do século; a vazão tende a diminuir no fim do período chuvoso. No final do século essa redução é um pouco maior.

O membro M4 apresenta uma tendência de redução da vazão logo no primeiro período futuro, com uma pequena redução no fim do período chuvoso. Essa redução na vazão média mensal se torna mais evidente com o passar do tempo, atingindo o pico no final do século. As vazões de cheia são as com maiores reduções em relação à observada (MGB).

Como no exemplo anterior, serão analisadas também as curvas de permanências para cada um dos períodos, com enfoque nas vazões com as permanências de 5%, 50% e 95% do tempo.

A Figura 32 mostra a comparação entre as curvas de permanência com as vazões médias mensais observadas (MGB) e as projeções das vazões futuras, afluentes ao posto fluviométrico de Morpará.

Ao analisar a Figura 32, nota-se que no primeiro período futuro (2011 a 2040) não há grandes variações nas projeções das vazões futuras. Para o membro M2 há um ligeiro aumento percentual nas vazões de cheias. Para o período de 2041 a 2070, o que chama a atenção é a queda brusca das vazões com maiores volumes de água (de 5% a 50% frequência) no membro M4. Já no período final do século, as vazões extremas do membro M4 têm uma forte queda em relação ao observado e essa diminuição nas vazões se mantém por todo o período; no membro M2 nota-se uma redução significativa nas vazões de  $Q_{95\%}$ .

A Tabela 8 faz uma comparação das alterações das vazões características futuras afluentes ao posto fluviométrico de Morpará, em relação à observada (MGB), de acordo com as projeções das vazões futuras de cada membro do modelo Eta.

**Tabela 8. Diferenças em porcentagem entre as vazões extremas e medianas observadas (MGB) e as projeções futuras, afluente ao posto fluviométrico de Morpará.**

Vazão Afluente ao Posto Fluviométrico de Morpará	Membro M2			Membro M4		
	2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099	2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099
$Q_{5\%}$	+7.2 %	+2.7 %	+1.2 %	-1.3 %	-17.5 %	-34.0 %
$Q_{50\%}$	+0.3 %	-3.1 %	-6.3 %	-3.6 %	-24.7 %	-34.0 %
$Q_{95\%}$	-1.0 %	-3.2 %	-8.8 %	-5.4 %	-20.0 %	-32.6 %

Ao analisar a Tabela 8, nota-se que para o membro M2 as vazões de cheia ( $Q_{5\%}$ ) apresentam uma desaceleração no aumento da vazão ao longo do tempo. Já para as vazões medianas e mais baixas, ou de estiagem ( $Q_{95\%}$ ), a vazão declina rapidamente, principalmente no período de 2071 a 2099.

Para o membro M4, no primeiro período todas as vazões apresentam um ligeiro declínio. O segundo período é proporcionalmente mais crítico de todos, pois as reduções das vazões, na média, mais que quadruplicam em relação ao período anterior. Para o último período as quedas nas vazões se acentuam e passam dos 30% de redução, em relação à observada.

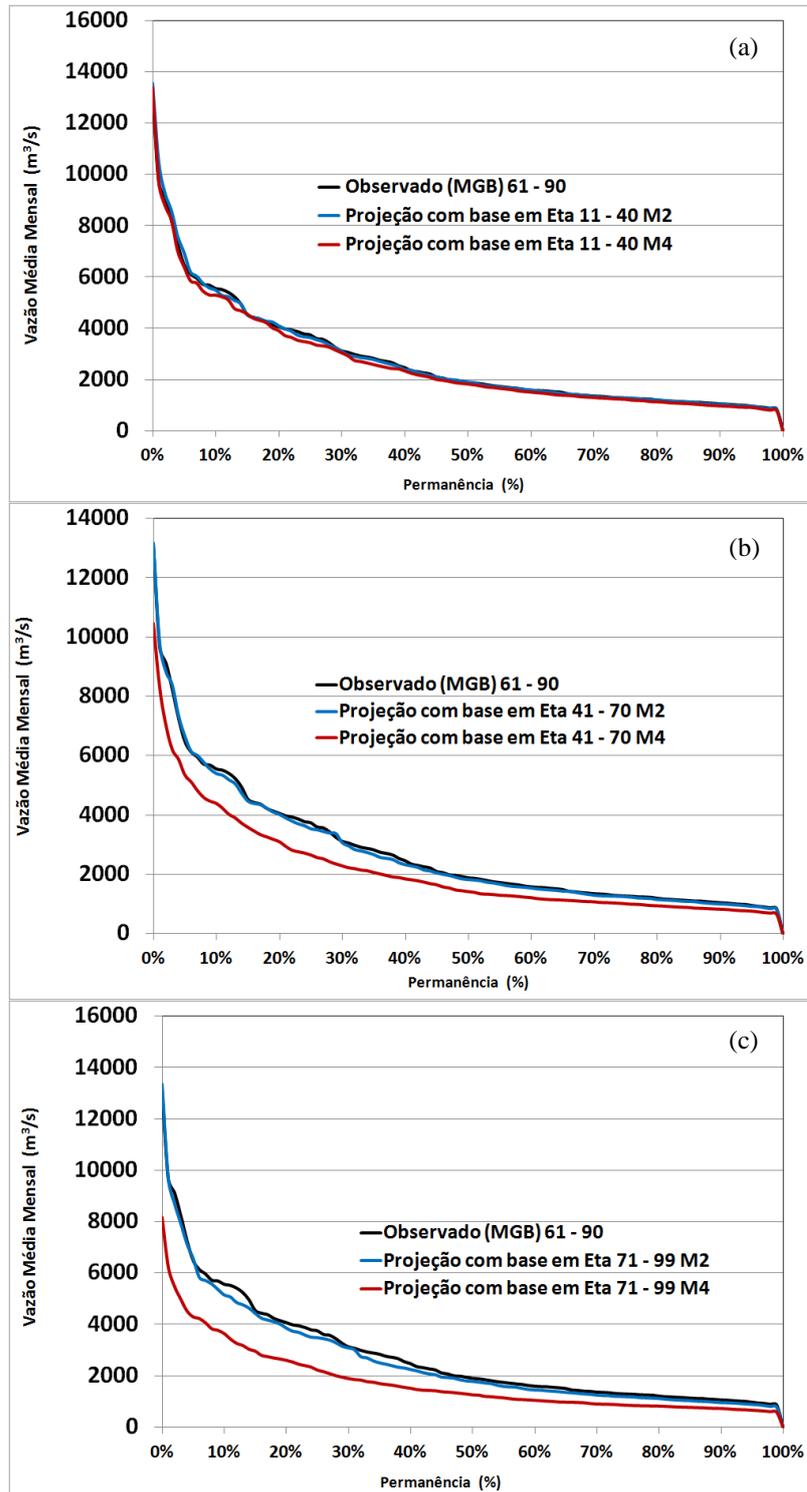


Figura 32. Curvas de permanência das vazões médias observadas (MGB) e as projeções futuras, considerando apenas a alteração na precipitação. Vazões afluentes ao posto fluviométrico de Morpará. (a) 2011 a 2040, (b) 2041 a 2070, (c) 2071 a 2099.

A Figura 33 ilustra os resultados da vazão na parte baixa da bacia, próxima ao exutório. Os resultados abaixo são para as vazões afluentes ao complexo das usinas de Paulo Afonso e Moxotó.

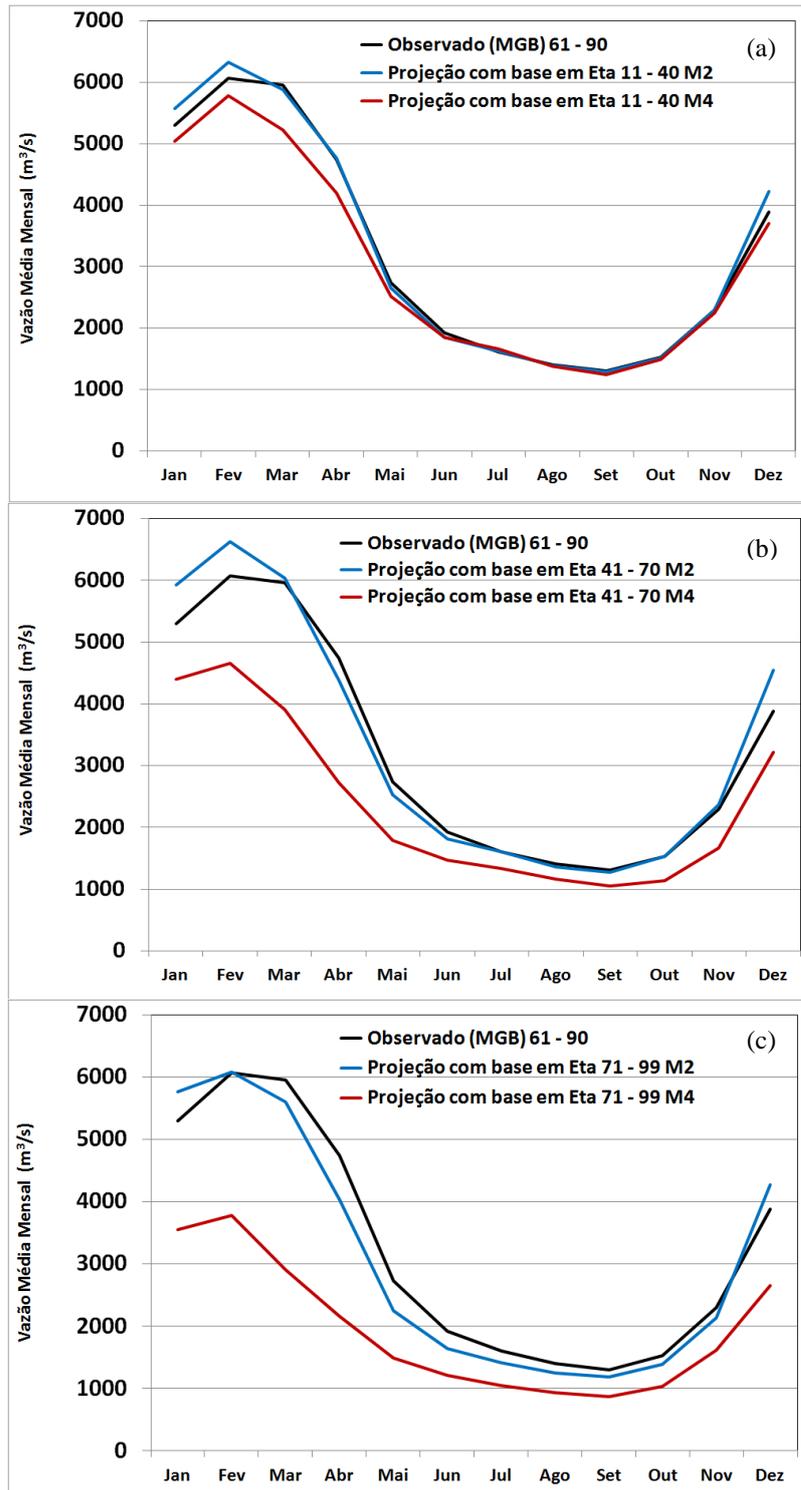


Figura 33. Comparação entre a vazão média observada e as projeções das vazões médias futuras, considerando apenas a alteração na precipitação, de acordo com os dois membros do modelo Eta. Vazões afluentes ao complexo de usinas de Paulo Afonso e Moxotó. (a) 2011 a 2040, (b) 2041 a 2070, (c) 2071 a 2099.

As análises da Figura 33 são praticamente as mesmas do caso anterior. Ambos os membros apontam um declínio das vazões médias ao longo do século. Para o membro M2, esse declínio é mais evidente no período de 2071 a 2099, no qual a vazão é menor,

praticamente todo o ano. No membro M4, no primeiro período, a redução da vazão acontece de forma mais clara, no meio do período chuvoso. À medida que o tempo passa, essa redução nas vazões ficam cada vez maiores, principalmente na redução expressiva da vazão no fim do período chuvoso (Março e Abril).

As curvas de permanência das projeções das vazões afluentes ao complexo de usinas de Paulo Afonso e Moxotó são apresentadas na Figura 34.

Analisando a Figura 34, nota-se que as projeções das vazões seguem a mesma tendência das vazões a montante. Para o primeiro período futuro as vazões tendem a se manter praticamente constantes ou próximas da observada (MGB). Para os demais períodos futuros as projeções das vazões do membro M4 tendem a diminuir mais drasticamente no final do século. Para membro M2 os eventos extremos tendem a ficarem mais intensos, ou seja, as cheias aumentam e no período de estiagens, mais secas.

A Tabela 9 faz uma comparação das projeções das vazões características futuras afluentes ao complexo de usinas de Paulo Afonso e Moxotó, em relação à observada (MGB), de acordo com cada membro futuro do modelo Eta.

**Tabela 9. Diferenças em porcentagem entre as projeções das vazões extremas e medianas com relação às observadas (MGB) Projeções referentes às vazões afluentes ao complexo de usinas de Paulo Afonso e Moxotó.**

Vazão Afluente do Complexo Paulo Afonso e Moxotó	Membro M2			Membro M4		
	2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099	2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099
Q <sub>5%</sub>	+4.3 %	+7.7 %	+2.4 %	-4.2 %	-22.2 %	-36.8 %
Q <sub>50%</sub>	-2.5 %	-3.1 %	-11.8 %	-7.2 %	-28.9 %	-38.2 %
Q <sub>95%</sub>	-3.4 %	-5.1 %	-11.9 %	-9.0 %	-24.5 %	-34.8 %

Ao analisar a Tabela 9, nota-se que para o membro M2, as vazões de cheia apresentam um ligeiro aumento que vai decaindo ao longo do tempo. O último período é o mais crítico, a redução das vazões chega a triplicar em relação ao período anterior. No membro M4, as vazões de cheia vão reduzindo, de forma acelerada, ao longo do tempo. As vazões tem um forte declínio já no período de 2041 a 2070, chegando a triplicar as reduções com relação ao período anterior. As vazões de estiagem sofrem reduções consideráveis em ambos os membros, atingindo o ponto mais crítico no final do período de 2071 a 2099.

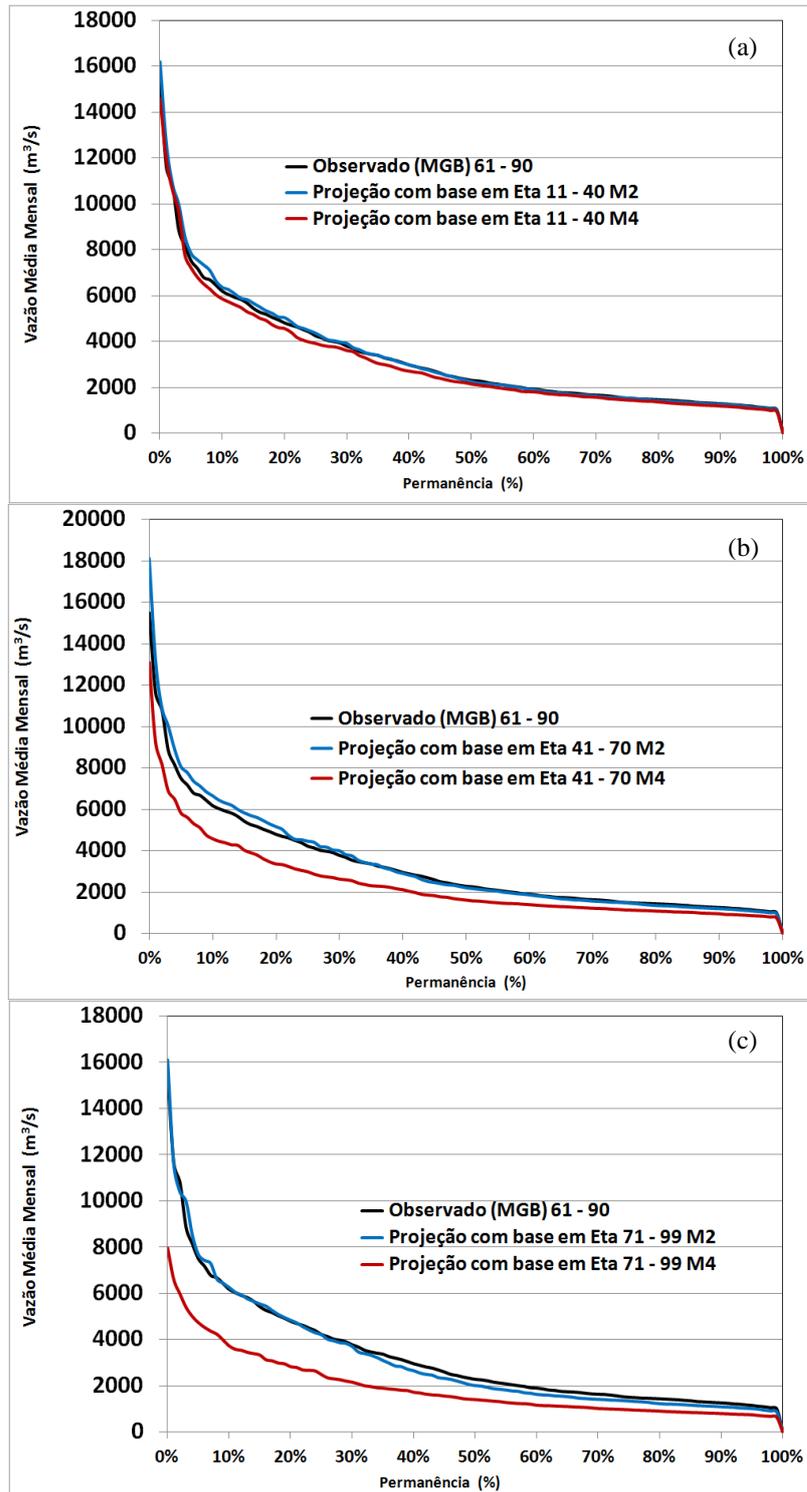


Figura 34. Curvas de permanência das vazões médias observadas (MGB) e as projeções futuras, considerando apenas a alteração na precipitação. Vazões afluentes ao complexo de usinas de Paulo Afonso e Moxotó. (a) 2011 a 2040, (b) 2041 a 2070, (c) 2071 a 2099.

A Tabela 10 faz um resumo das variações entre as vazões médias mensais observadas (MGB) com as projeções das vazões médias mensais futuras. A comparação foi feita em termos percentuais, considerando todos os valores da média, resultando num valor médio para cada período e em cada trecho da bacia.

**Tabela 10. Diferenças, em termos percentuais, entre as vazões médias observadas (MGB) e as projeções das vazões futuras, considerando as variações futuras somente da precipitação. As variações são para diferentes partes da bacia do rio São Francisco**

Região da Bacia	Membro M2			Membro M4		
	2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099	2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099
<b>Alta</b>	+5.4 %	+4.7 %	+7.3 %	+1.8 %	-11.9 %	-22.5 %
<b>Média</b>	+0.1 %	-2.0 %	-6.6 %	-3.3 %	-21.6 %	-34.7 %
<b>Baixa</b>	+0.8 %	+1.3 %	-6.9 %	-4.9 %	-25.0 %	-37.8 %

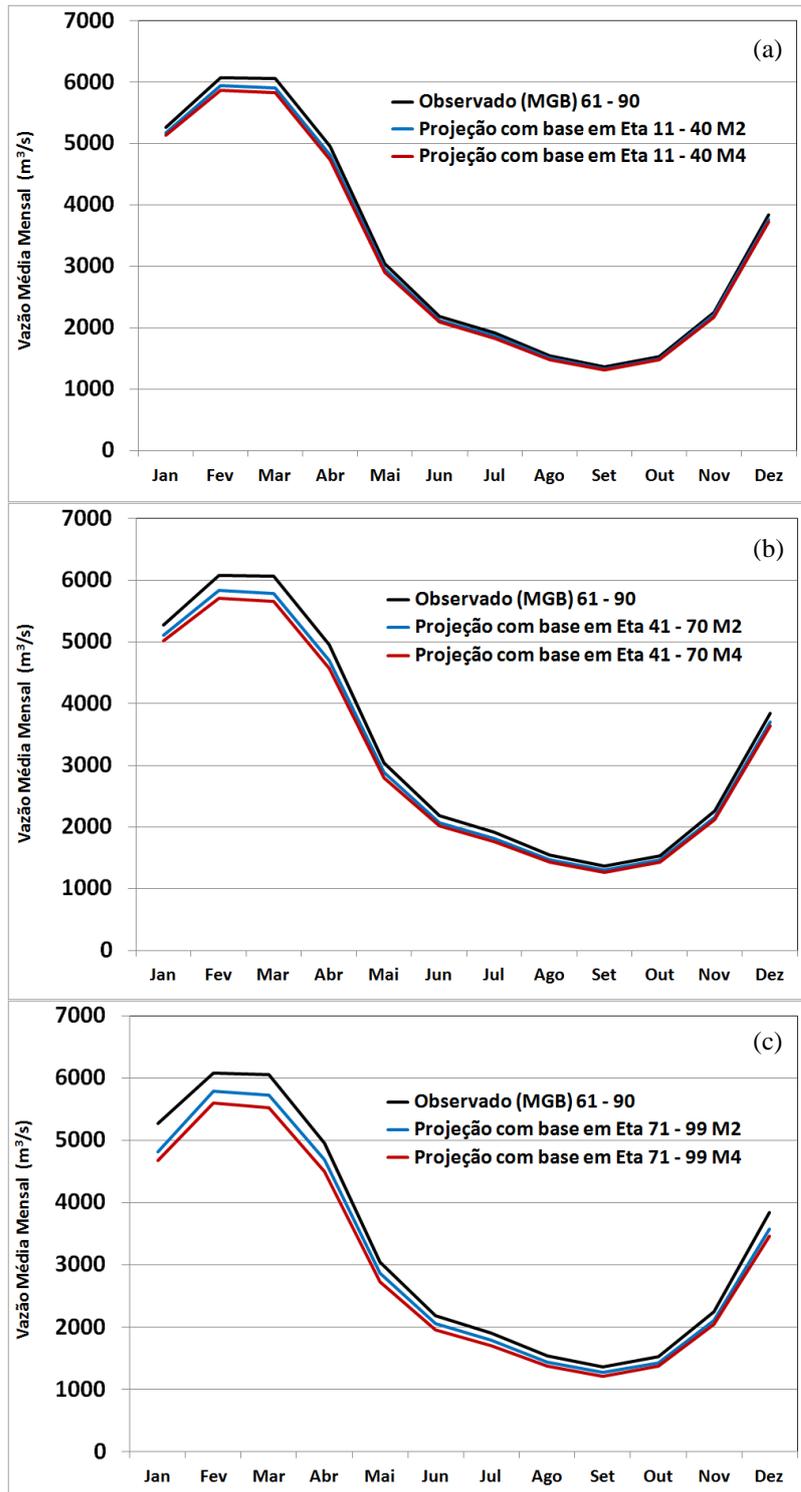
De modo geral, as projeções do membro M2 apresentam uma ligeira tendência de aumento na vazão, principalmente no primeiro período e na parte mais alta da bacia. Para o período 2071 a 2099 há uma clara diferença entre as partes da bacia, ou seja, as projeções apontam aumento das vazões na parte alta e redução na parte média e baixa da bacia, ambas de mesma proporção.

As projeções do membro M4 já mostram o contrário do membro M2. O membro M4 apresenta valores de diminuição da vazão preocupantes, principalmente para as regiões média e baixa da bacia. Para essas regiões as projeções apontam reduções que mais que quadruplicam de um período para outro (do período 2041 a 2070 em relação ao período 2011 a 2040), chegando a valores próximos a 40% de redução no último período.

#### **6.4.2 Cenário futuro da vazão – Variação da Temperatura Média**

A temperatura média é uma variável importante para qualquer estudo climático, pois ela pode interferir em diversos processos físicos e biológicos como a evaporação e a evapotranspiração, por exemplo.

Para uma análise completa de uma possível variação do ciclo hidrológico, essa variável é indispensável. Para simular quais seriam os efeitos desta variável na vazão média mensal observada (MGB), foram inseridos os dados das temperaturas futuras sob os efeitos das projeções futuras pelos dos dois membros do modelo Eta no modelo hidrológico, mantendo constantes ou inalteradas as precipitações observadas no período entre 1961 a 1990. A Figura 35 apresenta a comparação entre a vazão observada (MGB) e as projeções das vazões futuras sob os efeitos somente da temperatura média futura.



**Figura 35. Comparação entre a vazão média mensal observada (MGB) com as projeções das vazões médias futuras, sob o efeito do aumento das temperaturas médias futuras. Dados referentes à Foz do modelo hidrológico.**

As diferenças entre a vazão observada (MGB) e as projeções das vazões futuras sob os efeitos do aumento na temperatura média, são muito menores em termos percentuais, se comparadas com a vazão alterada pela precipitação. Mesmo no pior cenário, a redução das

vazões médias na foz da bacia chega a ser menor que 10% para o final do século, chegando a ser 20 a 30% menor do que o efeito causado pela precipitação.

Porém, mesmo apresentando valores relativamente pequenos, os resultados podem ser mais expressivos se forem combinadas às duas variáveis. Portanto, não se podem descartar os efeitos da variação na temperatura no regime hidrológico. O item a seguir mostrará os resultados combinando as duas variáveis climáticas na vazão da bacia do rio São Francisco.

### **6.4.3 Cenário futuro da vazão – Combinando os Efeitos da Temperatura e Precipitação**

Em uma análise mais completa sobre quais seriam os efeitos das mudanças climáticas sobre a vazão média da bacia do rio São Francisco, fez-se uma combinação das duas variáveis climáticas estudadas, a precipitação e a temperatura média.

Como era de se esperar, os resultados desta combinação são mais pronunciados se comparados com os efeitos de cada variável em separado. Porém, os valores simulados pelo modelo hidrológico não são obtidos apenas com a soma dos efeitos ou dos impactos de cada variável; o modelo hidrológico faz ponderações entre as variáveis e ambas alteram o resultado final.

As vazões apresentadas neste tópico serão para as mesmas localidades analisadas anteriormente, desta forma, é possível avaliar melhor os efeitos do aumento da temperatura média, juntamente com a precipitação na vazão média da bacia como um todo.

A Figura 36 apresenta as projeções das vazões médias mensais futuras afluentes à usina de Três Marias, comparando a vazão média observada (MGB) com as projeções das vazões média futuras sob os efeitos das projeções da temperatura e a precipitação, para ambos os membros do modelo Eta.

Ao comparar os gráficos apresentados na Figura 29, contendo as projeções das vazões sob o efeito das variações futuras da precipitação, com os gráficos da Figura 36, nota-se que os comportamentos das curvas são praticamente os mesmos.

Porém, na Figura 36, a diferença é que as curvas estão deslocadas um pouco para baixo, ou seja, essa redução significa a influência da temperatura média nas projeções das vazões.

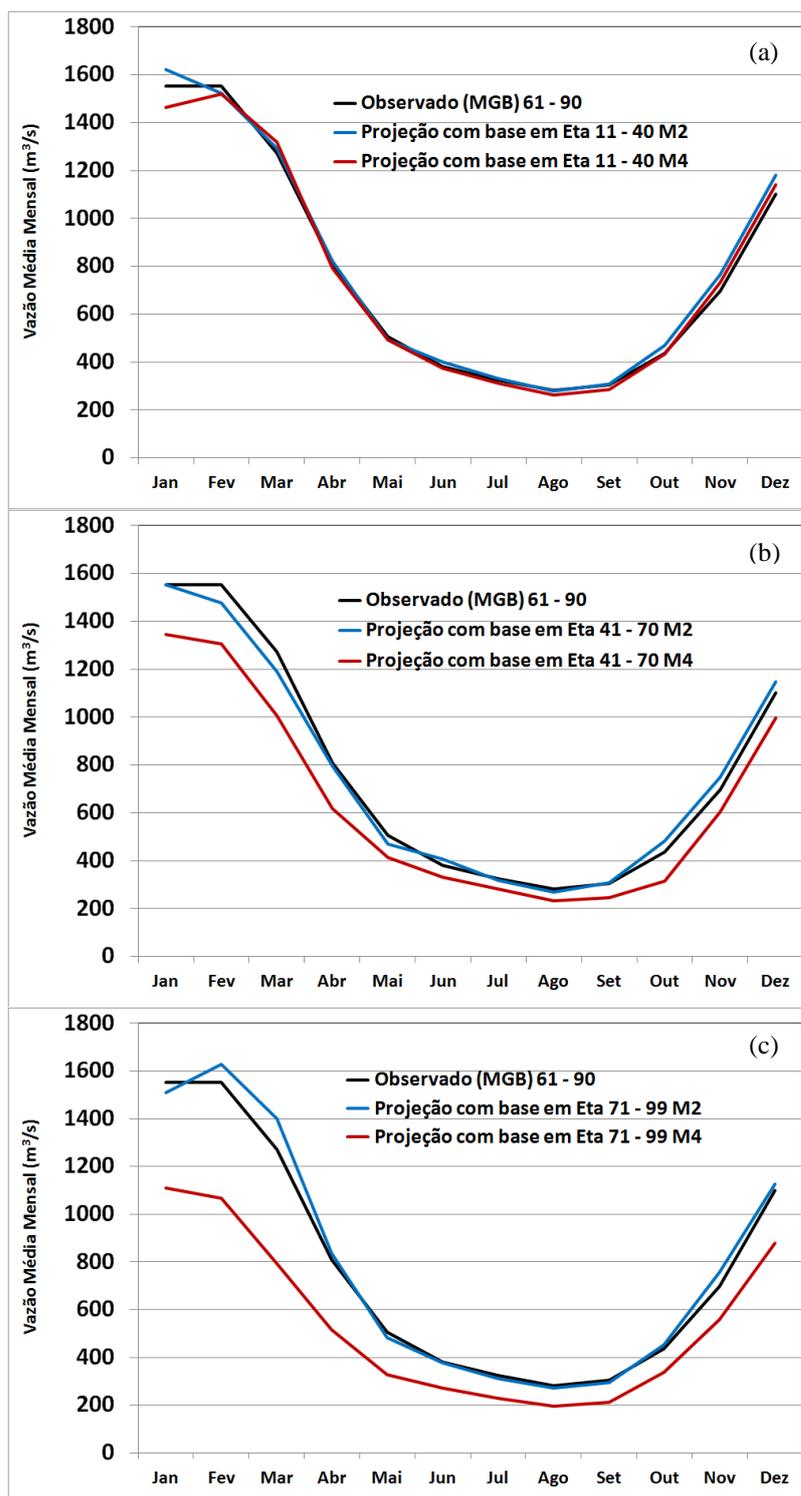


Figura 36. Comparação entre a vazão média mensal observada (MGB) com as projeções das vazões médias futuras sob os efeitos da combinação da temperatura e a precipitação, para ambos os membros do modelo Eta. Vazões afluentes à usina de Três Marias. (a) 2011 a 2040, (b) 2041 a 2070, (c) 2071 a 2099.

As curvas de permanência com as projeções das vazões afluentes à usina de Três Marias são apresentadas na Figura 37.

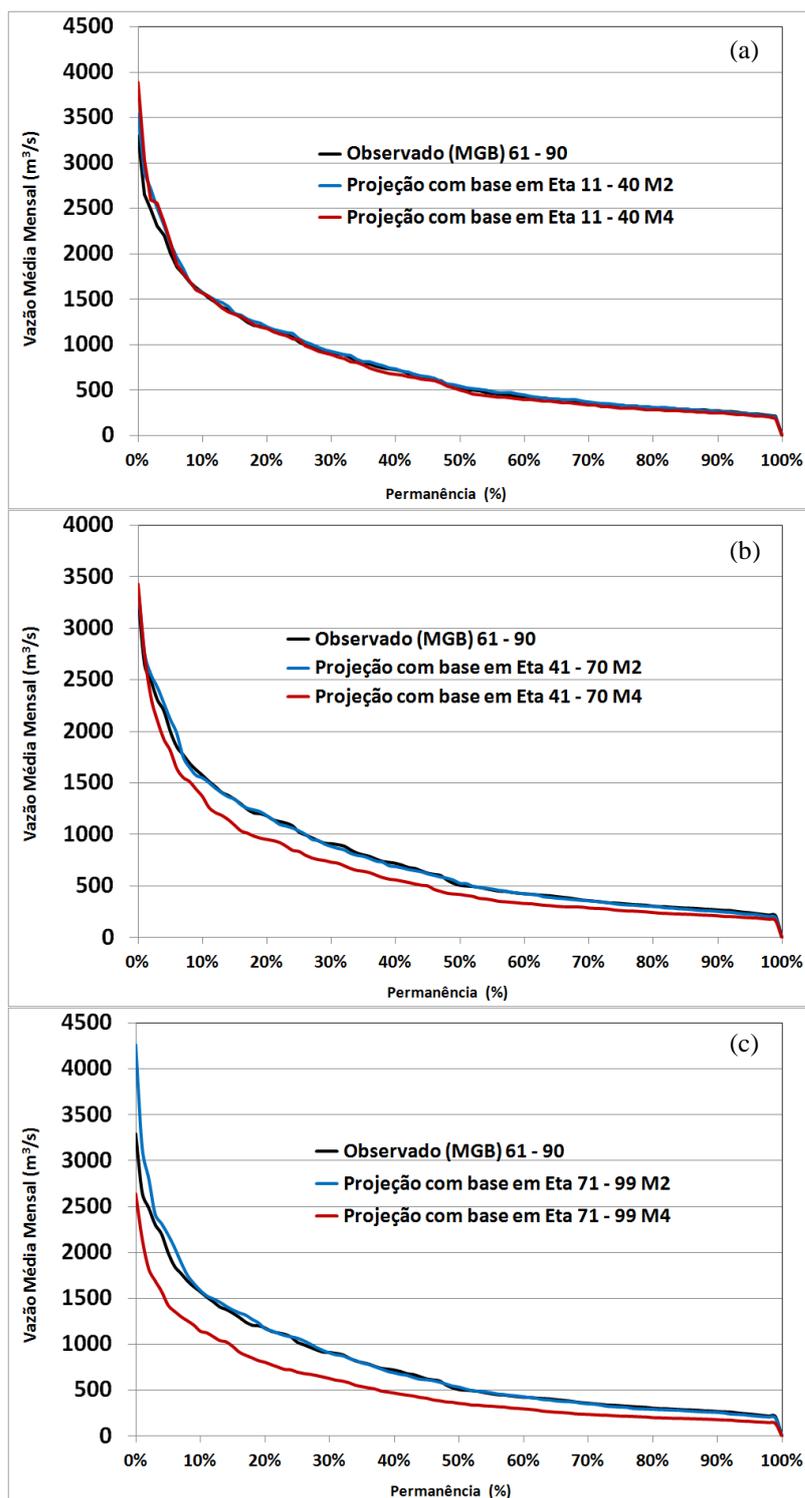


Figura 37. Curvas de permanência das vazões médias observadas (MGB) e as projeções das vazões futuras, sob os efeitos da combinação da temperatura e a precipitação, para ambos os membros do modelo Eta. Vazões afluentes da usina de Três Marias. (a) 2011 a 2040, (b) 2041 a 2070, (c) 2071 a 2099.

Ao analisar a Figura 37 nota-se que para o primeiro período futuro, as vazões, na média, não apresentam grandes variações em relação ao observado (MGB). Com uma pequena ressalva para as vazões de cheia, que apresentam um crescimento relativamente

pequeno. Para os demais períodos futuros, as vazões seguem a mesma tendência das vazões apresentadas na Figura 30, que levam em conta somente a precipitação.

As projeções das vazões do membro M2 não apresentam grandes variações em relação ao observado, com ressalva para as vazões de cheia no último período. Já para as projeções futuras do membro M4, as vazões apresentam um constante declínio, sendo o último período o mais crítico.

A Tabela 11 apresenta a comparação das projeções das vazões características futuras, em relação à observada (MGB), de acordo com cada membro do modelo Eta. Os resultados são referentes às vazões afluentes à usina de Três Marias.

**Tabela 11. Diferenças, em termos percentuais, entre as vazões extremas e medianas observadas (MGB) e as projeções futuras para os diferentes membros do modelo Eta. Projeções referentes às vazões afluentes à usina de Três Marias.**

Vazão Afluente à Usina de Três Marias	Membro M2			Membro M4		
	2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099	2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099
Q <sub>5%</sub>	+5.3 %	+5.8 %	+9.7 %	+6.2 %	-9.4 %	-28.6 %
Q <sub>50%</sub>	+6.1 %	+3.8 %	+5.4 %	-1.2 %	-17.3 %	-29.4 %
Q <sub>95%</sub>	-1.6 %	-6.2 %	-6.6 %	-8.2 %	-20.0 %	-33.3 %

Ao analisar a Tabela 11 nota-se que para o membro M2 há uma tendência de aumento nas vazões com maiores volumes (Q<sub>5%</sub> e Q<sub>50%</sub>) em todos os períodos. Porém, para as vazões com menores volumes há uma tendência de redução progressiva.

Nas projeções do membro M4 há uma predominância na redução das vazões, que vai progredindo a cada período futuro. A vazão Q<sub>50%</sub> apresenta uma redução de quase 15 vezes, passando do período de 2011 a 2040 para o período 2041 a 2070. A vazão de Q<sub>95%</sub> segue a mesma tendência, porém em escala menor. A única exceção é para as vazões de cheia para o período de 2011 a 2040, no qual as vazões apresentam um ligeiro aumento.

Ao comparar os resultados da Tabela 11 com os da Tabela 7, nota-se que as projeções das vazões características futuras apresentam uma redução média de 4.8% para ambos os membros. No membro M2 a vazão Q<sub>50</sub> foi a que apresentou maior redução média ao longo do tempo (5.2%). A vazão Q<sub>95</sub>, no último período, foi a que apresentou a maior redução em relação às demais deste membro (7.7%). Para o membro M4 a vazão Q<sub>95</sub> foi a que apresentou maior redução média ao longo do tempo (5.8%), sendo que o último período foi o que apresentou a maior redução em relação às demais (8.0%).

A Figura 38 ilustra as curvas das projeções das vazões médias mensais afluentes ao posto fluviométrico de Morpará, comparando a vazão média observada (MGB) com as

projeções das vazões média futuras sob os efeitos das projeções futuras, da temperatura e precipitação, realizadas pelos dois membros do modelo Eta.

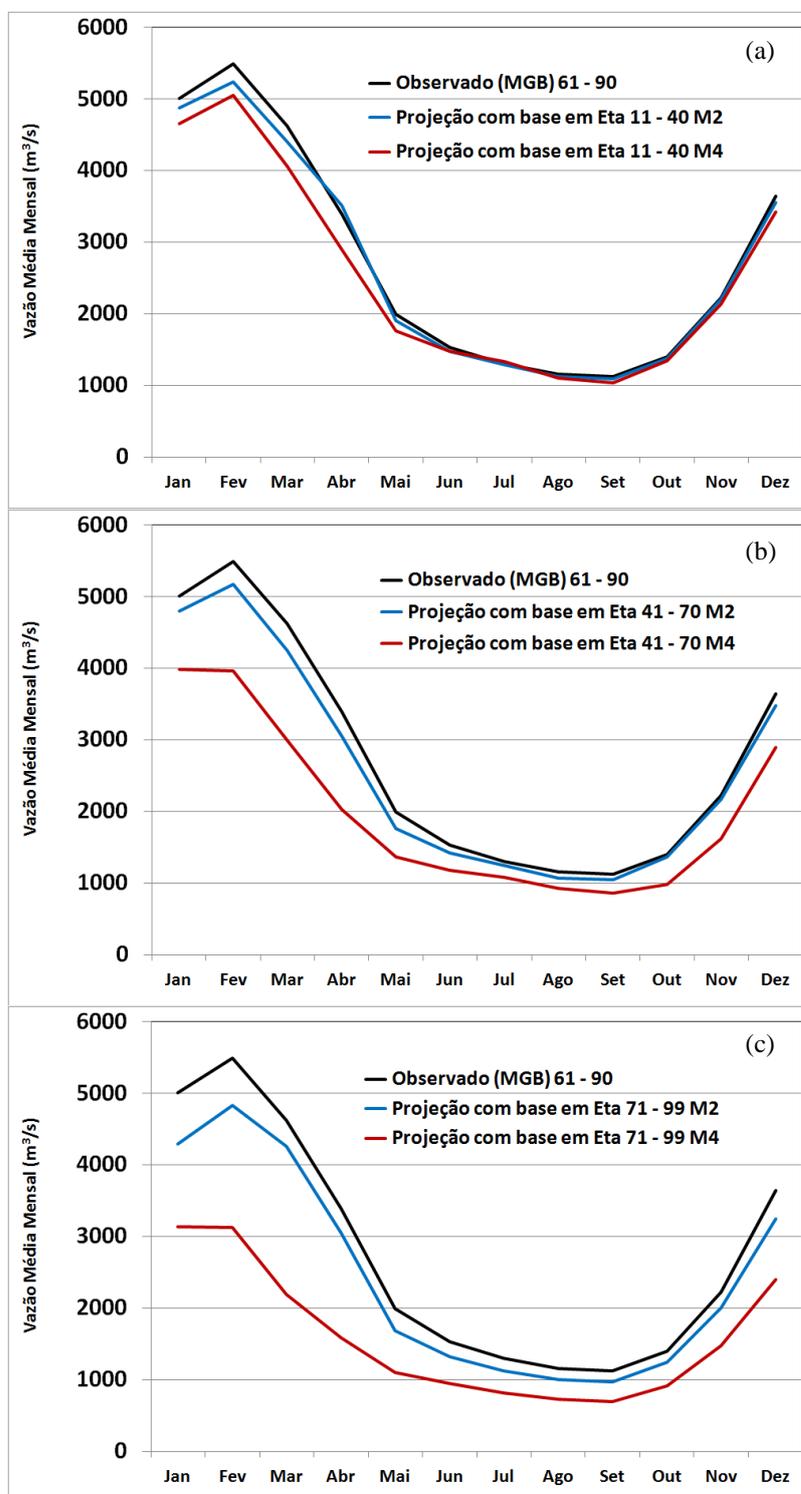


Figura 38. Comparação entre a vazão média mensal observada (MGB) com as projeções das vazões médias futuras sob os efeitos da combinação da temperatura e a precipitação, para ambos os membros do modelo Eta. Vazões afluentes ao posto fluviométrico de Morpará. (a) 2011 a 2040, (b) 2041 a 2070, (c) 2071 a 2099.

Na Figura 39 são apresentadas as curvas de permanência das projeções das vazões futuras, afluentes ao posto fluviométrico de Morpará.

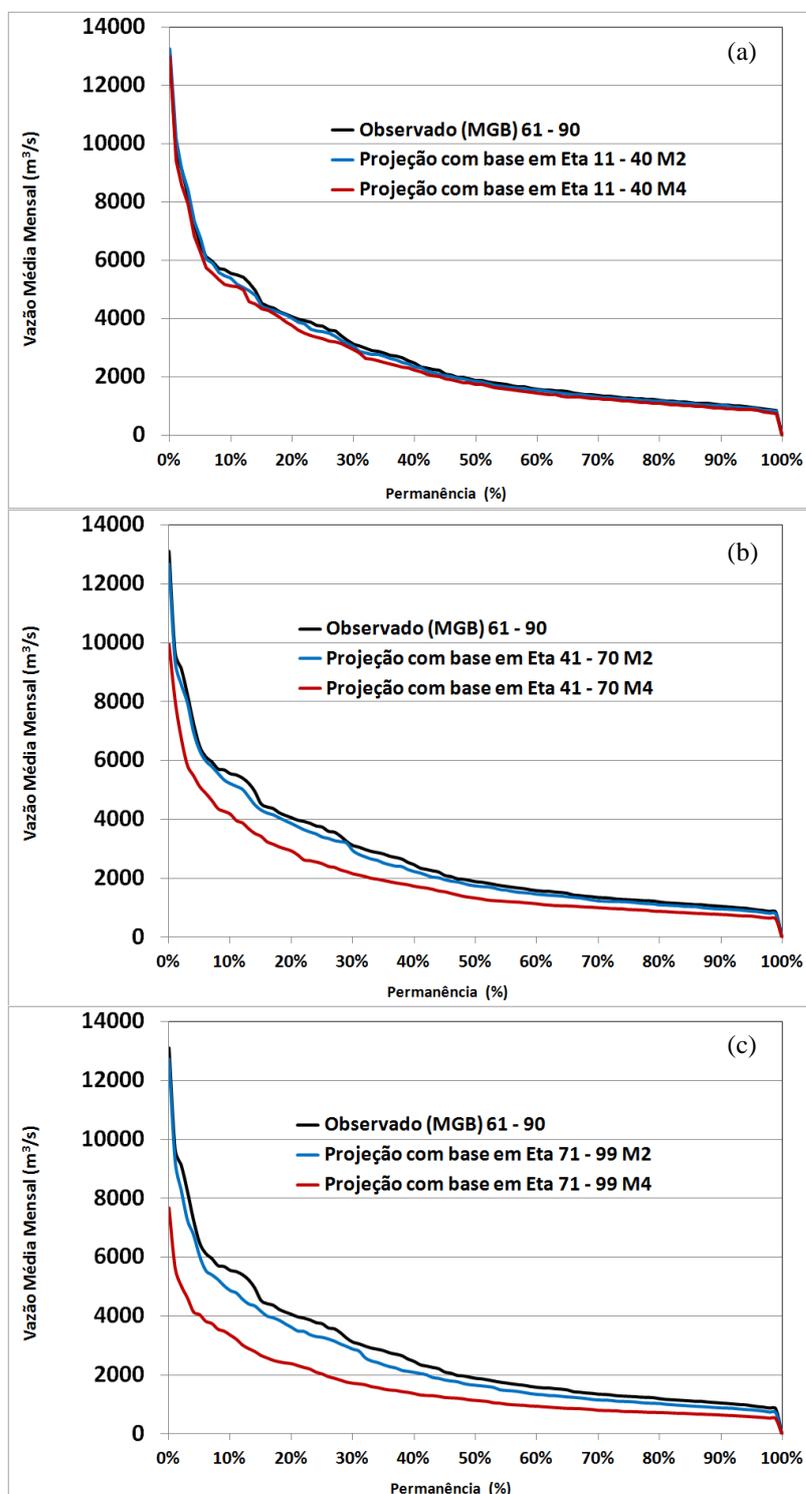


Figura 39. Curvas de permanência das vazões médias observadas (MGB) e as projeções das vazões futuras, sob os efeitos da combinação da temperatura e a precipitação, para ambos os membros do modelo Eta. Vazões afluentes ao posto fluviométrico de Morpará. (a) 2011 a 2040, (b) 2041 a 2070, (c) 2071 a 2099.

Analisando a Figura 39 percebe-se que para o primeiro período futuro, as vazões, na média, não apresentam grandes variações em relação ao observado (MGB). No segundo período, as projeções do membro M4 apontam uma tendência de queda das vazões praticamente por todo o período. O membro M2 tem uma pequena redução nas vazões com maiores volumes. No último período, as projeções de ambos os membros apontam redução nas vazões, sendo o membro M4 mais crítico.

A Tabela 12 apresenta a comparação das projeções das vazões características futuras, em relação à observada (MGB), de acordo com cada membro do modelo Eta. Os resultados são referentes às vazões afluentes ao posto fluviométrico de Morpará.

**Tabela 12. Diferenças, em termos percentuais, entre as vazões extremas e medianas observadas (MGB) e as projeções futuras para os diferentes membros do modelo Eta. Projeções referentes às vazões afluentes ao posto fluviométrico de Morpará.**

Vazão Afluente ao Posto Fluviométrico de Morpará	Membro M2			Membro M4		
	2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099	2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099
Q <sub>5%</sub>	+3.9 %	-2.2 %	-6.8 %	-3.4 %	-21.0 %	-37.6 %
Q <sub>50%</sub>	-2.2 %	-7.6 %	-12.4 %	-7.5 %	-29.5 %	-39.7 %
Q <sub>95%</sub>	-3.5 %	-7.6 %	-14.3 %	-8.9 %	-24.9 %	-39.0 %

Analisando a Tabela 12 nota-se que as projeções de ambos os membros apontam para uma tendência de redução progressiva das vazões em todos os períodos.

As projeções do membro M2 é mais crítica no último período analisado, chegando a praticamente a dobrar a redução das vazões, em relação ao período passado.

Nas projeções do membro M4 há uma predominância na redução das vazões mais acentuadas, que vai progredindo a cada período futuro analisado. As reduções do período 2041 a 2070 mais que triplica se comparado com o período passado. Porém, o último período é o mais crítico em termos de volume, pois as reduções chegam a quase 40%.

Ao comparar os resultados da Tabela 12 com os da Tabela 8 nota-se que as projeções das vazões características futuras apresentam uma redução média de 4.4% para ambos os membros. No membro M2 a vazão Q5 foi a que apresentou maior redução média ao longo do tempo (5.4%). A vazão Q5, no último período, foi a que apresentou a maior redução em relação às demais deste membro (8.0%). Para o membro M4 a vazão Q95 foi a que apresentou maior redução média ao longo do tempo (4.9%), sendo que o último período foi o que apresentou a maior redução em relação às demais (6.4%).

A Figura 40 ilustra as curvas das projeções das vazões médias mensais afluentes ao complexo das usinas de Paulo Afonso e Moxotó, comparando a vazão média observada

(MGB), com as projeções das vazões média futuras sob os efeitos das projeções futuras da temperatura e precipitação realizadas pelos dois membros do modelo Eta.

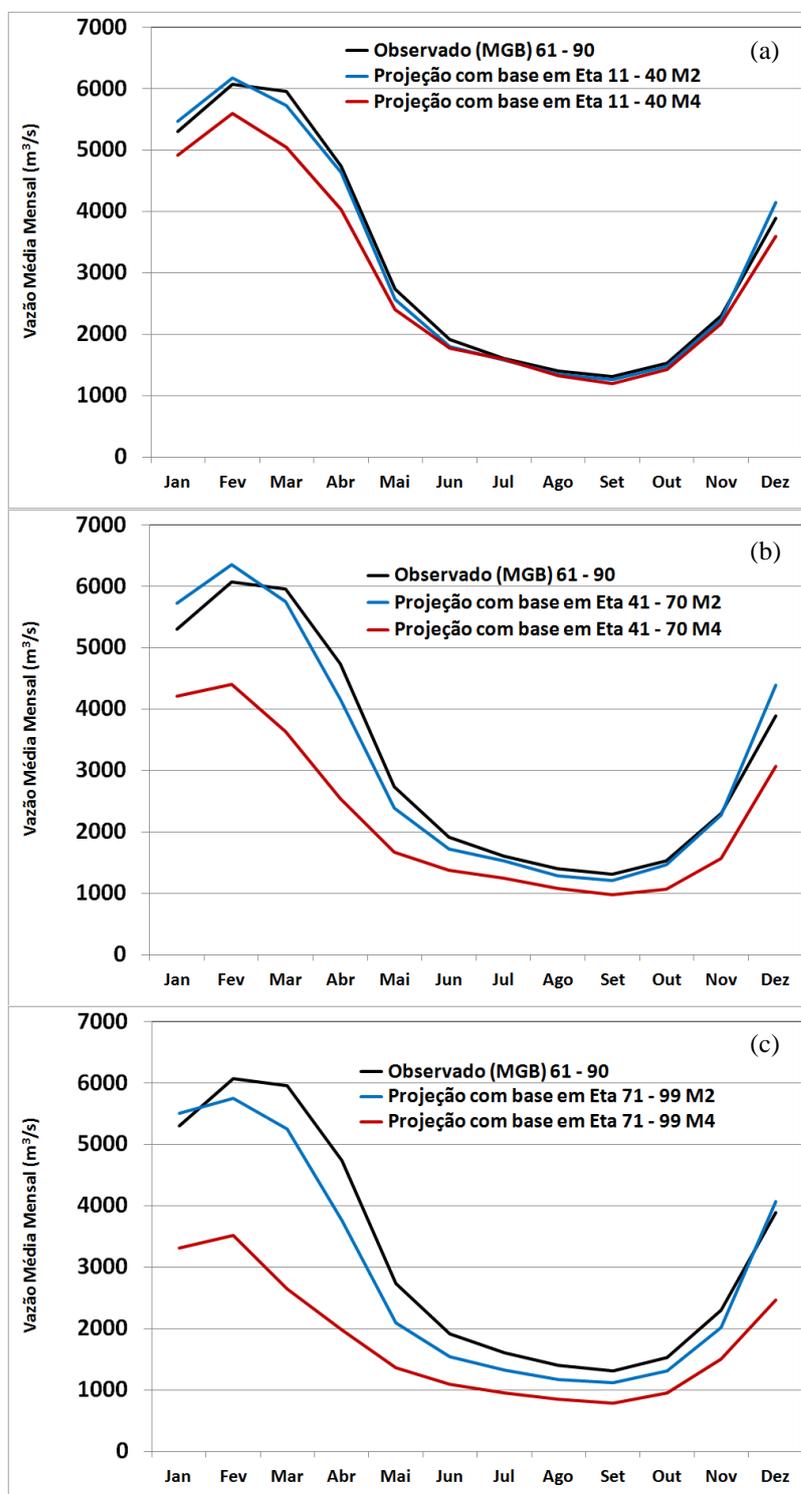


Figura 40. Comparação entre a vazão média mensal observada (MGB) com as projeções das vazões médias futuras sob os efeitos da combinação da temperatura e a precipitação, para ambos os membros do modelo Eta. Vazões afluentes ao complexo de usinas de Paulo Afonso e Moxotó. (a) 2011 a 2040, (b) 2041 a 2070, (c) 2071 a 2099.

Na Figura 41 são apresentadas as curvas de permanência das projeções das vazões futuras, afluentes ao complexo das usinas de Paulo Afonso e Moxotó.

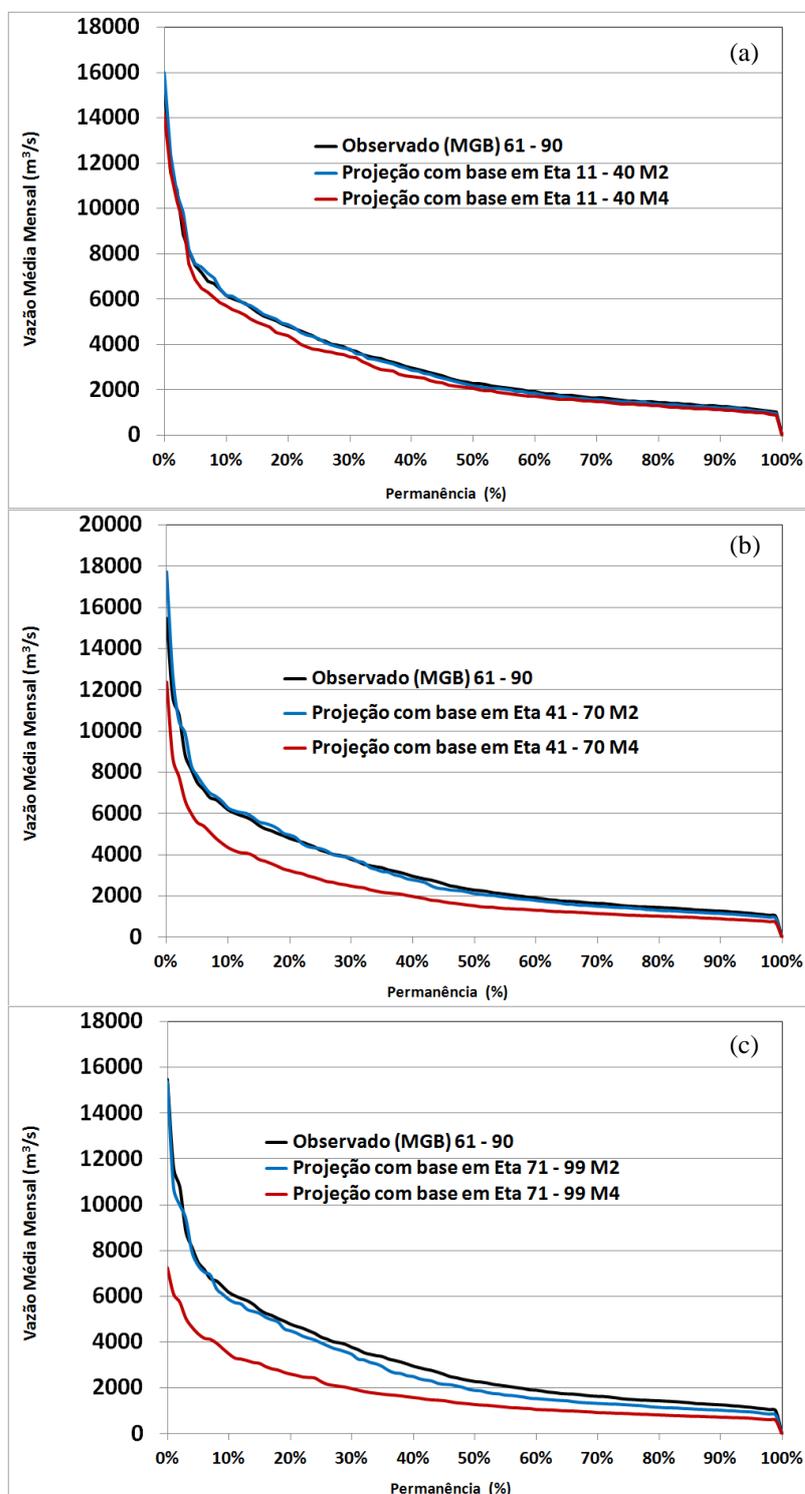


Figura 41. Curvas de permanência das vazões médias observadas (MGB) e as projeções das vazões futuras, sob os efeitos da combinação da temperatura e a precipitação, para ambos os membros do modelo Eta. Vazões afluentes ao complexo de usinas de Paulo Afonso e Moxotó. (a) 2011 a 2040, (b) 2041 a 2070, (c) 2071 a 2099.

Analisando a Figura 41, percebe-se que para o primeiro período, as projeções das vazões do membro M2, na média, não apresentam grandes variações em relação ao observado (MGB). Somente no último período as projeções do membro M2 apontam uma ligeira diminuição nas vazões.

Já as projeções para o membro M4 apresenta uma leve redução nas vazões, principalmente entre Q<sub>5%</sub> e Q<sub>50%</sub>, no primeiro período. Para o período de 2041 a 2070 observa-se uma redução das vazões, mais acentuada que no período passado. No último período, as projeções das vazões apresentam uma redução drástica, principalmente nas vazões de cheia.

A Tabela 13 apresenta a comparação das projeções das vazões características futuras, em relação à observada (MGB), de acordo com cada membro do modelo Eta. Os resultados são referentes às vazões afluentes ao complexo das usinas de Paulo Afonso e Moxotó.

**Tabela 13. Diferenças, em termos percentuais, entre as vazões extremas e medianas observadas (MGB) e as projeções futuras para os diferentes membros do modelo Eta. Projeções referentes às vazões afluentes ao complexo de usinas de Paulo Afonso e Moxotó.**

Vazão Afluente do Complexo Paulo Afonso e Moxotó	Membro M2			Membro M4		
	2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099	2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099
Q <sub>5%</sub>	+1.0 %	+4.2 %	-1.9 %	-8.6 %	-25.8 %	-41.6 %
Q <sub>50%</sub>	-4.6 %	-7.5 %	-16.9 %	-10.4 %	-33.2 %	-43.9 %
Q <sub>95%</sub>	-5.7 %	-9.6 %	-17.3 %	-12.7 %	-29.6 %	-41.0 %

Analisando a Tabela 13 nota-se que as projeções do membro M2, as vazões de cheia, apresentam, na média, um ligeiro aumento. Nas demais vazões características, as projeções apresentam uma tendência de redução nas vazões, sendo o último período o mais preocupante, pois as reduções das vazões mais que dobram, em relação ao período anterior.

Ainda analisando a Tabela 13, as projeções do membro M4 apresentam grandes reduções nas vazões já no primeiro período, chegando a quase 10% na média. No segundo período, as projeções apontam uma redução drástica nas vazões, chegando a triplicar a redução projetada no período anterior. E por fim, o último período do membro M4 é o mais crítico de todos, pois as projeções apontam reduções drásticas nas vazões extremas dessa região da bacia. Reduções essas que passam dos 40%, em relação ao observado (MGB) para o período de 1961 a 1990.

Ao comparar os resultados da Tabela 13 com os da Tabela 9 nota-se que as projeções das vazões características futuras apresentam uma redução média de 4.2% para ambos os membros. No membro M2 a vazão Q<sub>95</sub> foi a que apresentou maior redução média ao longo

do tempo (4.1%). A vazão Q95, no último período, foi a que apresentou a maior redução em relação às demais deste membro (5.4%). Para o membro M4 a vazão Q95 foi a que apresentou maior redução média ao longo do tempo (5.0%), sendo que o último período foi o que apresentou a maior redução em relação às demais (6.2%).

De modo geral, pode-se resumir que em meados do século, já no segundo período, a situação comece a se agravar na bacia. A elevação da temperatura média começa a ser significativa, com um aumento médio entre 1.5°C a 2 °C, coincidindo com a diminuição da precipitação sobre a bacia do rio São Francisco, fazendo com que a redução na vazão seja mais expressiva.

Diferentemente da análise levando em conta somente a precipitação, nas projeções do membro M2 o declínio da vazão é mais evidente nas diferentes partes da bacia. Sempre entre o final do período úmido e início do período seco. Já as projeções do membro M4 apontam tendências de reduções das vazões de forma bem significativa, reduzindo as vazões em quase 30% em determinadas regiões da bacia.

A Tabela 14 faz um resumo das variações entre as vazões médias mensais observadas (MGB), com as projeções das vazões médias mensais futuras. A comparação foi feita em termos percentuais, considerando todos os valores da média, resultando num valor médio para cada período e em cada trecho da bacia, podendo existir valores que superam este valor em determinados períodos ou meses.

**Tabela 14. Diferenças, em termos percentuais, entre as vazões médias observadas (MGB) e as projeções das vazões futuras, considerando as variações futuras da precipitação e temperatura. As variações são para diferentes partes da bacia do rio São Francisco**

Região da Bacia	Membro M2			Membro M4		
	2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099	2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099
<b>Alta</b>	+2.9%	+0.3%	+1.1%	-1.7%	-17.2%	-29.2%
<b>Média</b>	-2.3%	-6.2%	-12.2%	-6.8%	-26.4%	-40.3%
<b>Baixa</b>	-1.8%	-3.2%	-12.3%	-8.3%	-29.5%	-43.0%

Na Tabela 14 nota-se que apenas em uma ocasião, na parte alta para o membro M2, as projeções das vazões apresentam uma ligeira tendência de aumento. Ao longo da bacia do rio São Francisco e no decorrer do tempo futuro, nota-se que a tendência de redução nas projeções das vazões médias futuras vai ficando mais evidentes, até no membro M2. As projeções do membro M4 são mais preocupantes, pois elas mostram uma tendência de forte redução nas vazões médias, passando dos 40% de redução em determinadas áreas, podendo causar danos catastróficos aos habitantes desta bacia.

Ao comparar os resultados da Tabela 14 com os da Tabela 10 nota-se que as projeções das vazões futuras para diferentes partes da bacia apresentam uma redução média na bacia de 4.2% para o membro M2 e de 1.8% para o membro M4. No membro M2 a parte alta da bacia foi a que apresentou maior redução ao longo do período (4.4%). Sendo que o último período da parte alta da bacia foi o que apresentou maior redução em relação aos demais. A mesma tendência ocorreu no membro M4, que apresentou uma maior redução na parte alta da bacia ao longo do tempo (5.2%). Sendo que o último período é o mais crítico, com uma redução de 6.7%.

## **6.5 Análise da Energia Assegurada Futura**

Para a realização das análises dos cálculos de energia assegurada em pequenas centrais hidroelétricas, foram escolhidos quatro aproveitamentos hidroelétricos, classificados como PCHs, localizados dentro da bacia do rio São Francisco, sendo todos eles identificados em inventários hidrelétricos. A opção de escolha dos aproveitamentos hidroelétricos em detrimento a usinas já existentes foi pela facilidade da obtenção de dados em geral, não havendo necessidade de realizar um estudo de caso de uma determinada usina pré-existente.

As análises das vazões e a resposta da energia assegurada foram feitas para os dois membros do modelo Eta, em todos os períodos. Os dados foram comparados com os dados observados no clima presente, ou seja, são os dados observados (MGB) no período entre 1961 a 1990.

Como em alguns dos aproveitamentos não existe uma série de vazões diárias observadas iniciando em 1961, decidiu-se utilizar os dados simulados pelo modelo hidrológico, utilizando como base, os dados de precipitação observada no período entre 1961 a 1990.

Foram identificados em quais células do modelo hidrológico cada um dos empreendimentos estão localizados, e a partir daí, para a realização dos cálculos da energia assegurada, utilizou-se os dados da série de vazão da célula em que se localiza cada empreendimento.

O cenário de vazões escolhido para a análise foi o último cenário apresentado, ou seja, o cenário mais complexo, que contempla a união dos efeitos das projeções futuras das precipitações e temperaturas.

Como os aproveitamentos identificados nos inventários ainda não possuem usinas construídas ou consolidadas, e em vista que os seus nomes, tipo de arranjo, etc. podem mudar, decidiu-se nomear os aproveitamentos de forma bem genérica, como Aproveitamento A, B, C e D.

A Tabela 15 apresenta um pequeno resumo, contendo informações básicas sobre os aproveitamentos escolhidos, como: em quais os municípios os aproveitamentos se encontram, em que rio e até uma estimativa do potencial energético do aproveitamento.

**Tabela 15. Informações básicas dos aproveitamentos escolhidos para análise da energia assegurada.**

<b>Aproveitamento</b>	<b>Nome do Aproveitamento (inventariado)</b>	<b>Município</b>	<b>Rio</b>	<b>Potencial Previsto (MW)</b>
<b>A</b>	Cachoeira das Almas	João Pinheiro/ Buritizeiro (MG)	Rio do Sono	27.2
<b>B</b>	Cachoeira Comprida	São Gonçalo do Abaeté (MG)	Rio Abaeté	20.8
<b>C</b>	Jatobá	São Desidério (BA)	Rio Grande (BA)	14.1
<b>D</b>	Jequitaí II	Jequitaí (MG)	Rio Jequitaí	7.6

As projeções das energias asseguradas nos aproveitamentos serão realizadas ou simuladas nas usinas previstas de acordo com cada inventário. Segue abaixo as análises das energias asseguradas em cada aproveitamento.

### **6.5.1 Aproveitamento A**

O aproveitamento A se localiza no rio do Sono, que é um importante afluente do rio Paracatú, que por sua vez é um afluente do rio São Francisco. Para o modelo hidrológico, esse aproveitamento está localizado em uma célula dentro da sub-bacia de Porto Alegre. Os dados foram obtidos do Inventário Hidrelétrico Simplificado do Rio do Sono.

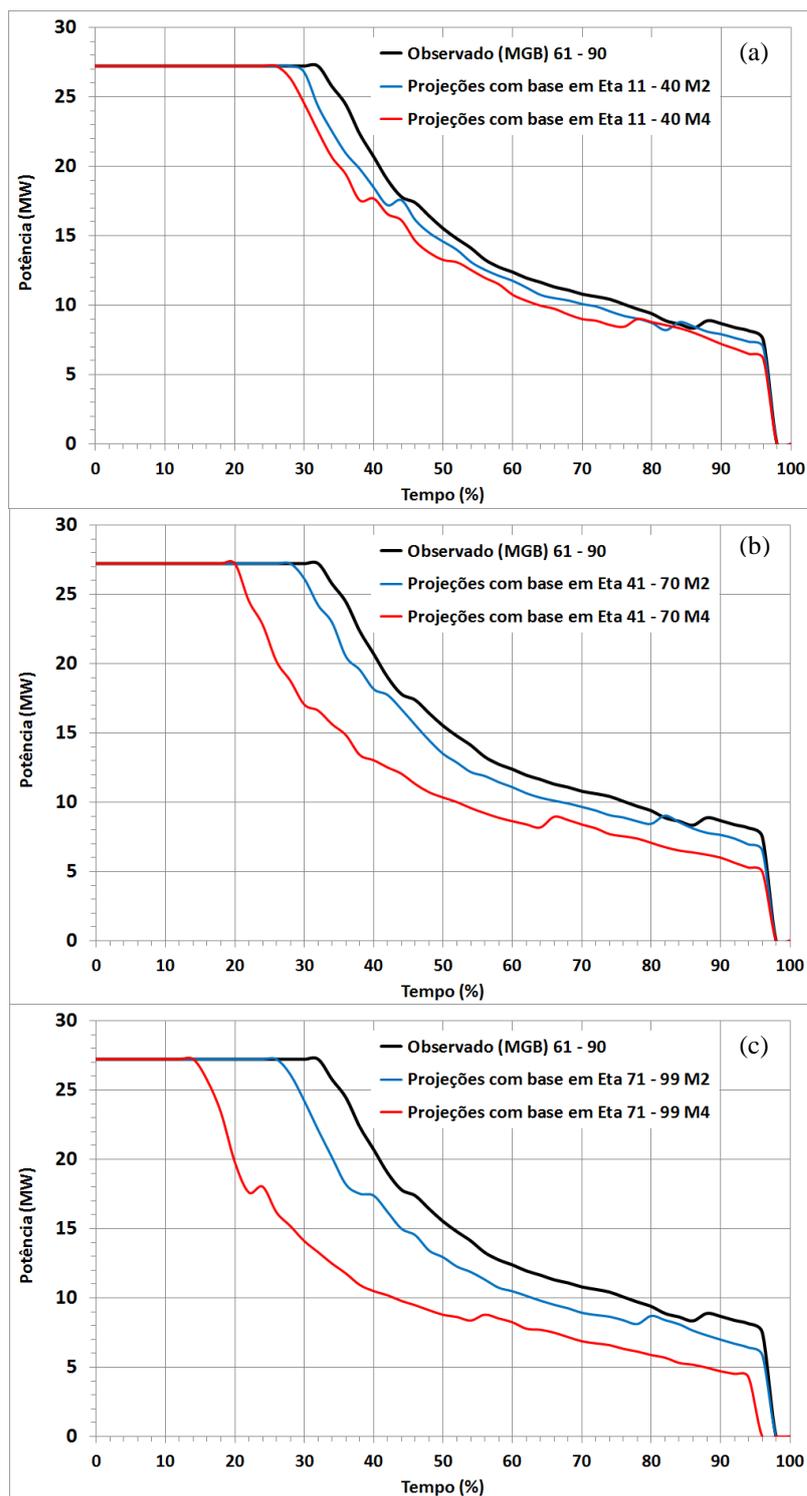
O inventário que contém os dados para esse aproveitamento aponta uma boa área de drenagem com aproximadamente 4350 km<sup>2</sup>, e uma queda bruta de 53.2 m. A vazão de projeto estimada, que é um dado muito importante para se estimar a energia assegurada, é de aproximadamente 61 m<sup>3</sup>/s. Esta vazão foi obtida por meio da transposição de dados de postos de vazões próximos. O arranjo proposto para este empreendimento prevê uma barragem de

terra de 34m de altura, a adução é feita por um dique e desvia a água diretamente para o conduto forçado.

No inventário, foi sugerida a utilização de três turbinas do tipo Francis Dupla com eixo horizontal, com potência de 9.1 MW cada, possibilitando até estimar uma eficiência global do conjunto turbina e gerador de 89%. Para o sistema de adução, foi estimada uma perda de carga de 4%, no que significa uma queda líquida (que chega efetivamente na turbina) de 51.07 m.

Outros dados importantes estimados foram os tempos de paradas programadas (IP) e forçadas (IF), que para esse empreendimento foram considerados iguais a 168 horas/ano. Esses dados são fundamentais para a determinação da energia assegurada.

A Figura 42 apresenta a comparação da simulação da capacidade de geração do aproveitamento A, em relação à porcentagem do tempo em uso. As simulações são baseadas na vazão observada pelo MGB e nas projeções futuras dos membros do modelo Eta.



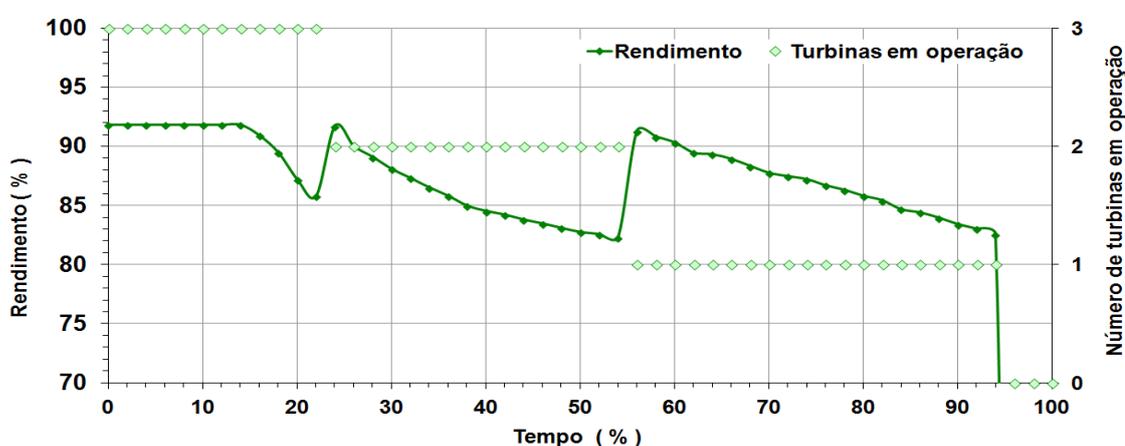
**Figura 42.** Comparação entre as simulações da capacidade de geração no aproveitamento A. Simulações feitas com os dados observados (MGB) e com as projeções futuras do modelo Eta. (a) 2011 a 2040, (b) 2041 a 2071 e (c) 2071 a 2099.

Ao analisar a Figura 42, percebe-se que para o membro M2 não há grandes variações na porcentagem do tempo em que a usina opera a plena carga. As projeções do membro M4 são mais catastróficas, em relação ao outro membro. Há uma clara diferença na porcentagem do tempo em que a usina opera com os dados observados, em relação à usina sob os efeitos

das projeções do membro M4. Para o caso com os dados observados, a usina produz a plena carga a 32% do tempo total, já para o caso das projeções futuras do membro M4, a produção reduz drasticamente, chegando a apenas 14% do tempo.

Nota-se também que em dois momentos nas duas curvas, acontece um leve aumento na potência que volta diminuir lentamente. Esse fato ocorre devido ao desligamento das máquinas, por causa da baixa vazão. Naqueles pontos, a vazão atingiu o limite mínimo que pode ser turbinada. À medida que uma turbina é desligada, a vazão aumenta nas outras máquinas restantes, e como consequência, a eficiência do grupo gerador aumenta também.

A Figura 43 ilustra bem essa explicação do ganho repentino de potência e do aumento da eficiência do sistema, em determinados pontos do gráfico.



**Figura 43. Simulação da variação do rendimento da turbina em relação à porcentagem do tempo de uso. Bem como o número de máquinas em operação, que variam de acordo com a vazão disponível. Os dados são relativos às projeções futuras do membro M4 do modelo Eta, para o período de 2071 a 2099.**

Como no aproveitamento A foi estipulado o uso de três turbinas, facilita a análise da Figura 43. Para esse exemplo foi utilizado os dados referentes às projeções futuras do membro M4. Nota-se que as três turbinas operam com rendimento máximo apenas 14% do tempo, a partir daí a vazão começa a diminuir a ponto de reduzir o rendimento das turbinas, até atingir o limite operacional das turbinas, obrigando o desligamento de pelo menos uma delas. Esse procedimento é feito até não ser possível turbinar as vazões

Para essa usina, no pior cenário de vazões, talvez fosse mais viável reduzir o número de turbinas de três para duas.

A Tabela 16 apresenta de forma resumida todos os resultados de energia assegurada para o aproveitamento A, simulada por meio de projeções das vazões futuras. São

apresentados também outros dados interessantes, como a variação do fator de capacidade da usina e a variação da energia assegurada, em termos percentuais, ao longo do século.

**Tabela 16. Dados energéticos simulados para o aproveitamento A. Comparação das energias asseguradas observada (MGB) com as projeções futuras dos diferentes membros do modelo Eta.**

Estudo Energético	Observado (MGB)	Membro M2			Membro M4		
		2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099	2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099
Energia Gerada no Ano (MWh)	154883	148631	146215	140747	142866	124030	108645
Fator de Capacidade	0.65	0.62	0.61	0.59	0.60	0.52	0.46
Energia Assegurada (MWh)	148943	<b>142930</b>	<b>140607</b>	<b>135349</b>	<b>137386</b>	<b>119273</b>	<b>104478</b>
Variação da Energia Assegurada	-----	<b>-4.0%</b>	<b>-5.6%</b>	<b>-9.1%</b>	<b>-7.8%</b>	<b>-19.9%</b>	<b>-29.9%</b>

Ao analisar a Tabela 16, observa-se que nas projeções do membro M2, a variação na energia assegurada não é tão expressiva até meados do século. Porém para o último período, a redução na energia assegurada chega a quase 10%, se comparado com os dados observados (MGB).

Já para as projeções do membro M4, o quadro é mais crítico. Já no segundo período a redução na energia chega a ser de 20%, mais que o dobro, se comparado com o período anterior. Para o final do século essa redução desacelera um pouco, mas a redução como um todo é muito grande, chegando a quase 30% a menos de energia.

### 6.5.2 Aproveitamento B

O aproveitamento B se localiza no Rio Abaeté, que é um afluente direto do rio São Francisco. Para o modelo hidrológico, este aproveitamento está localizado em uma célula dentro da sub-bacia de Pirapora-Barreiro. Os dados básicos referentes a este aproveitamento estão disponíveis no Inventário Hidrelétrico Simplificado do Rio Abaeté.

Baseado nos dados do inventário, o aproveitamento possui uma área de drenagem de aproximadamente 5592 km<sup>2</sup> e com uma razoável queda bruta de 24.2 m. A vazão de projeto estipulada para esse aproveitamento é de 99.3 m<sup>3</sup>/s. Como não existem postos fluviométricos

muito próximos ao local da barragem do empreendimento, a vazão de projeto foi estipulada pelo método da curva chave na seção em questão.

Como a queda é relativamente baixa e a vazão é muito alta, no inventário sugeriu-se a utilização de duas turbinas do tipo Kaplan com eixo vertical, com uma potência de 10.4 MW cada, devido a suas características construtivas.

Escolhida o tipo de turbina, foi possível estimar um rendimento global do conjunto turbina e gerador de aproximadamente 90% de eficiência. Como a casa de máquinas fica logo abaixo da barragem de concreto, o seu sistema de adução é bem eficiente, com a menor perda em relação aos outros empreendimentos, estimada em aproximadamente 2%, proporcionando uma queda líquida de 23.72 m.

Outro dado importante estimado foi o tempo de parada programada para manutenção dos equipamentos (IP), num total de 168 horas/ano e o tempo de parada forçada (IF) somando 168 horas/ano.

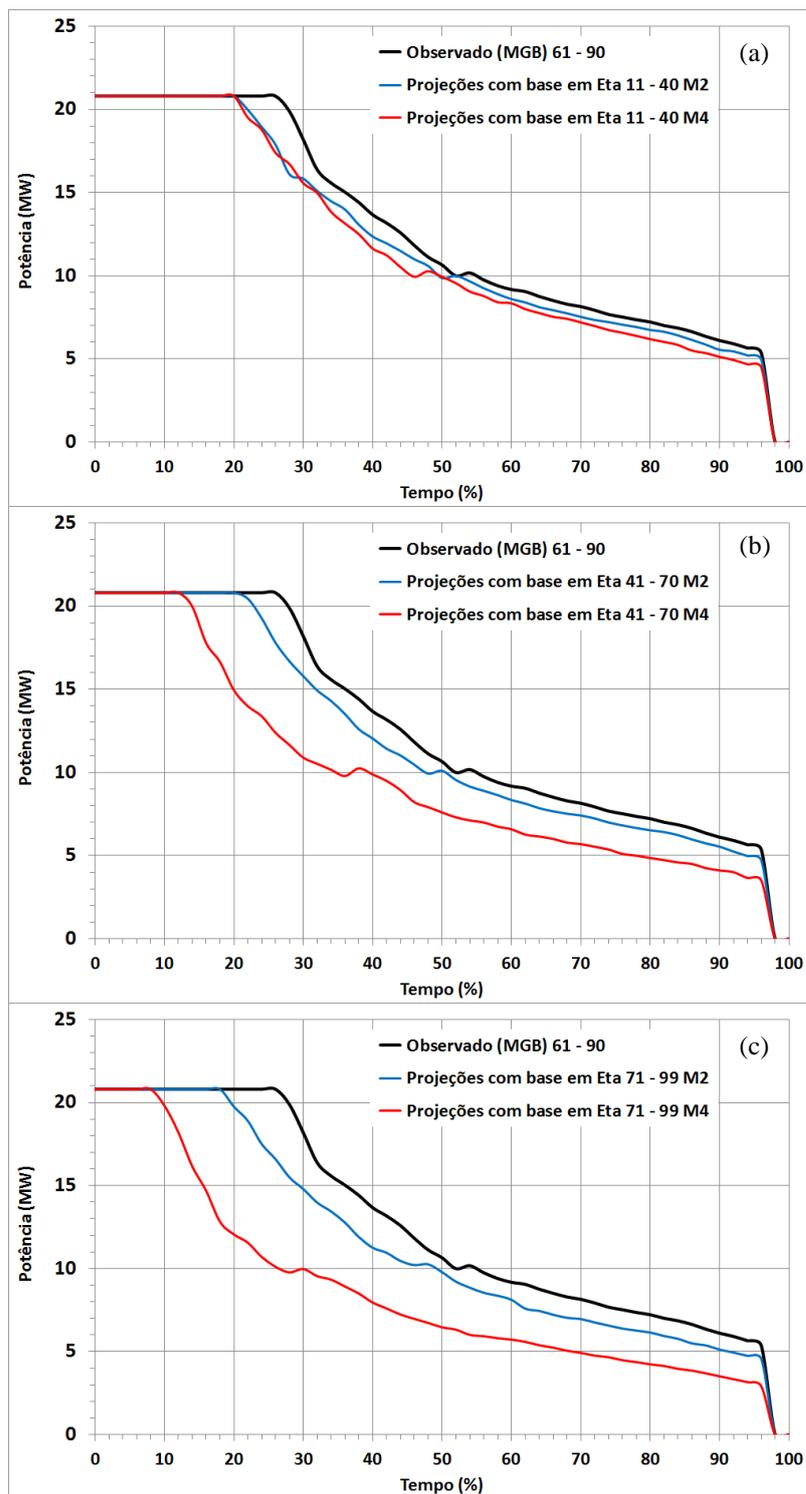
A Figura 44 apresenta a comparação da simulação da capacidade de geração do aproveitamento B, em relação à porcentagem do tempo em uso. As simulações são baseadas na vazão observada pelo MGB e nas projeções futuras dos membros do modelo Eta.

Na Figura 44 nota-se que há uma grande diferença entre as projeções dos membros do modelo Eta na capacidade de geração. Nas projeções do membro M2 a capacidade de geração da usina sofre pequenas alterações, principalmente nos dois primeiros períodos. No último período as projeções apresentam reduções mais significativas, chegando a quase 10% de redução na operação à plena carga.

Para o primeiro período, as projeções do membro M4 são semelhantes ao membro M2, ou seja, as reduções na capacidade de geração são pequenas. Nos demais períodos as reduções são drásticas. Para o último período, as projeções do membro M4 indicam que a usina consegue gerar a plena carga cerca de 8% do tempo total, o que é muito menor se for comparado com a capacidade de geração com os dados observados (MGB).

Essa pequena faixa de geração pode até inviabilizar o empreendimento. E este é o cenário mais crítico e as projeções são para o final do século, porém, esses dados dão indícios que caso este cenário de vazões venha a acontecer, este empreendimento pode não ser lucrativo.

A Tabela 17 apresenta os resultados simulados para a energia assegurada no aproveitamento B. São apresentados também outros dados interessantes, como a variação do fator de capacidade da usina e a variação da energia assegurada, em termos percentuais, ao longo do século.



**Figura 44. Comparação entre as simulações da capacidade de geração no aproveitamento B. Simulações feitas com os dados observados (MGB) e com as projeções futuras do modelo Eta. (a) 2011 a 2040, (b) 2041 a 2071 e (c) 2071 a 2099.**

**Tabela 17. Dados energéticos simulados para o aproveitamento B. Comparação das energias asseguradas observada (MGB) com as projeções futuras dos diferentes membros do modelo Eta.**

Estudo Energético	Observado (MGB)	Membro M2			Membro M4		
		2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099	2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099
<b>Energia Gerada no Ano (MWh)</b>	112586	106720	105361	101530	103665	86523	76410
<b>Fator de Capacidade</b>	0.62	0.59	0.58	0.56	0.57	0.47	0.42
<b>Energia Assegurada (MWh)</b>	108268	<b>102626</b>	<b>101320</b>	<b>97635</b>	<b>99689</b>	<b>83204</b>	<b>73480</b>
<b>Varição da Energia Assegurada</b>	-----	<b>-5.2%</b>	<b>-6.4%</b>	<b>-9.8%</b>	<b>-7.9%</b>	<b>-23.1%</b>	<b>-32.1%</b>

Ao analisar os dados apresentados na Tabela 17, percebe-se que nas projeções futuras do membro M2, entre o primeiro período (2011 a 2040) e o segundo período (2041 a 2070), a diminuição da energia assegurada não é tão significativa; por volta de 5% a 6%. A redução só é mais significativa no último período (2071 a 2099), com uma redução de aproximadamente 10%. Outro fato que chama a atenção é a pequena variação do fator de capacidade do empreendimento, variando apenas 0.06, que por coincidência é a mesma variação do empreendimento anterior, para o mesmo membro.

Já as projeções futuras do membro M4, a redução ocorrida no segundo período (2041-2070), é praticamente triplicada em relação ao período anterior. O período de 2071-2099 é o que apresenta maior redução na energia assegurada, passando dos 30% de redução.

### 6.5.3 Aproveitamento C

O aproveitamento C se localiza no rio Grande na Bahia. Esse rio é um importante afluente do rio São Francisco. Na subdivisão das sub-bacias feita para o modelo hidrológico, esse aproveitamento se localiza em uma célula da sub-bacia de Fazenda Macambira.

Os dados deste aproveitamento foram obtidos por meio do Inventário Hidrelétrico Simplificado do rio Grande da bacia do rio São Francisco. Esse aproveitamento possui uma boa área de drenagem, com aproximadamente 4465 km<sup>2</sup> e possibilitando uma queda bruta de 35 m. A vazão de projeto estimada é de 49 m<sup>3</sup>/s; como não existe nenhum posto fluviométrico

no local do aproveitamento, a vazão de projeto foi estimada pela transposição de vazões de outros postos na bacia.

No inventário foi sugerida a utilização de três turbinas do tipo Francis Dupla com eixo horizontal, possibilitando até estimar uma eficiência global do conjunto turbina e gerador de 87%. Para o sistema de adução foi estimada uma perda de carga de 4%, no que significa uma queda líquida de 33.6 m.

Também foi possível estimar os tempos de paradas da usina, que são de suma importância no cálculo da energia assegurada. O tempo de parada forçada (IF) será de 100 horas e o tempo de parada programada (IP), para manutenção nas máquinas será de 360 horas por ano.

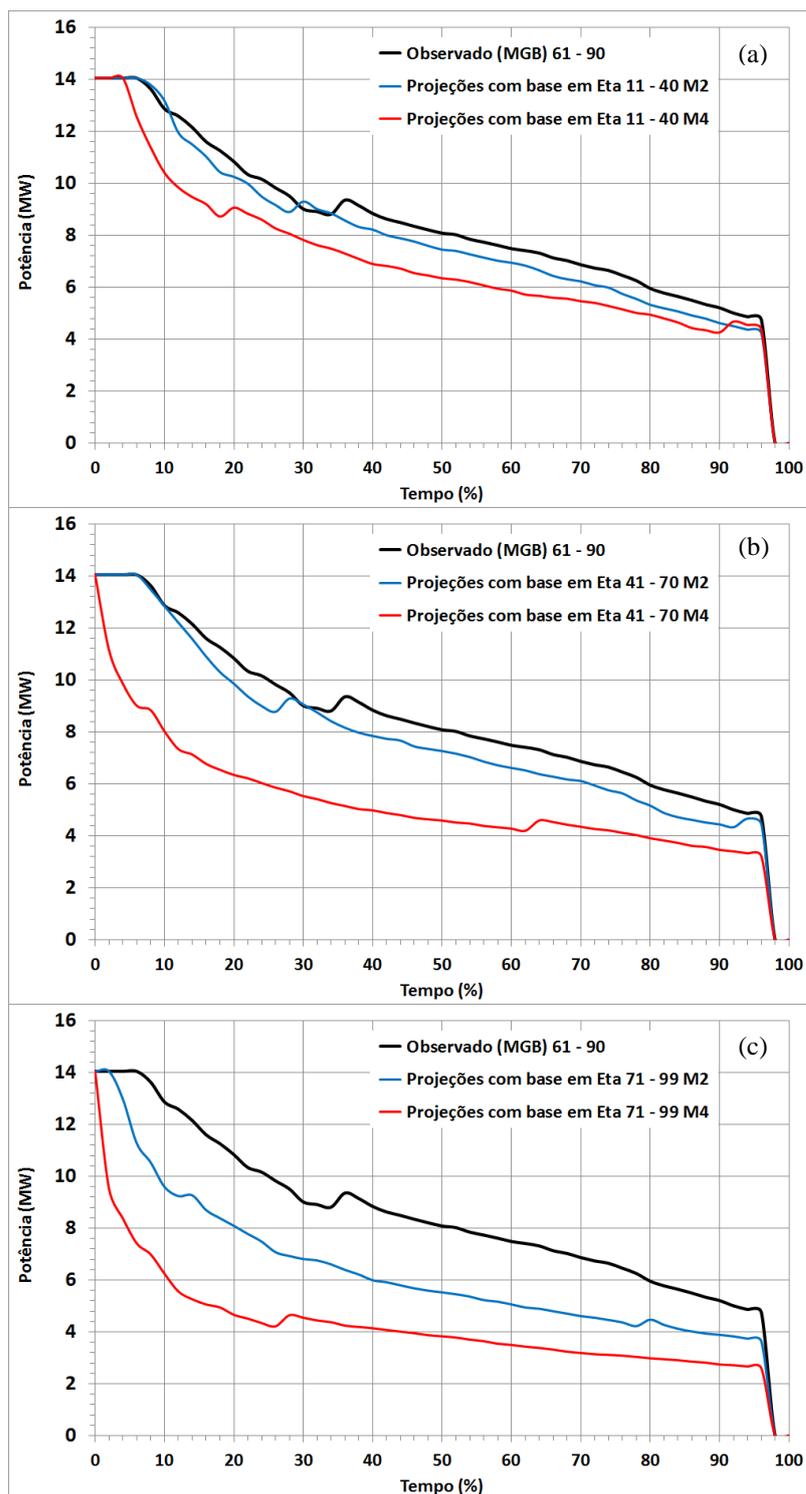
A Figura 45 apresenta a comparação da simulação da capacidade de geração do aproveitamento C, em relação à porcentagem do tempo em uso. As simulações são baseadas na vazão observada pelo MGB e nas projeções futuras dos membros do modelo Eta.

Ao analisar a Figura 45 percebe-se que para o caso da potência gerada a partir das vazões observadas (MGB), o gráfico apresenta apenas um pequeno ganho de potência, isso significa que a partir daquele momento a usina passou a trabalhar com apenas duas turbinas. Nota-se que, na maior parte do tempo, a usina trabalha com duas máquinas, o que é um risco grande, pois se a vazão diminuir um pouco, obriga o operador da usina desligar uma máquina que pode se tornar um grande prejuízo ao empreendedor, sem contar os efeitos das mudanças climáticas.

Nos dois primeiros períodos das projeções do membro M2, não há grandes variações na capacidade de geração da usina. Já para o último período a capacidade cai bastante, gerando a plena carga apenas 2% do tempo.

No caso das projeções futuras do membro M4, logo no segundo período (2041 a 2070) a usina opera apenas com duas das três máquinas. No último período a usina opera a maior parte do tempo com apenas uma máquina.

Provavelmente o número e o tipo de máquinas previsto no inventário podem estar superdimensionados, pois mesmo com os dados observados (MGB) a usina opera a plena carga muito pouco tempo.



**Figura 45.** Comparação entre as simulações da capacidade de geração no aproveitamento C. Simulações feitas com os dados observados (MGB) e com as projeções futuras do modelo Eta. (a) 2011 a 2040, (b) 2041 a 2071 e (c) 2071 a 2099.

A Tabela 18 apresenta de forma sucinta os resultados da energia assegurada para o aproveitamento C. São apresentados outros resultados importantes como a variação do fator de capacidade ao longo do tempo, bem como a variação da energia assegurada em termos percentuais.

**Tabela 18. Dados energéticos simulados para o aproveitamento C. Comparação das energias asseguradas observada (MGB) com as projeções futuras dos diferentes membros do modelo Eta.**

Estudo Energético	Observado (MGB)	Membro M2			Membro M4		
		2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099	2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099
<b>Energia Gerada no Ano (MWh)</b>	74541	70341	68661	55455	62022	46745	37482
<b>Fator de Capacidade</b>	0.61	0.57	0.56	0.45	0.50	0.38	0.30
<b>Energia Assegurada (MWh)</b>	70627	<b>66648</b>	<b>65055</b>	<b>52543</b>	<b>58765</b>	<b>44290</b>	<b>35514</b>
<b>Variação da Energia Assegurada</b>	-----	<b>-5.6%</b>	<b>-7.9%</b>	<b>-25.6%</b>	<b>-16.8%</b>	<b>-37.3%</b>	<b>-49.7%</b>

Ao analisar a Tabela 18, observa-se que nas projeções do membro M2, a variação da energia assegurada cresce muito no final do século, em relação aos períodos anteriores. A redução mais que triplica em relação ao período anterior.

Nas projeções do membro M4 a situação é ainda pior, pois mesmo para o primeiro período, a redução da energia assegurada é grande, com quase 17% de redução. O empreendimento assegura uma energia que chega a ser quase 50% menor que a energia assegurada pelas vazões observadas (MGB).

Levando em conta somente a energia assegurada, esse aproveitamento é um dos que apresentaram as maiores reduções em relação aos dados observados.

#### **6.5.4 Aproveitamento D**

O aproveitamento D está localizado no rio Jequitaiá, que é um afluente direto do rio São Francisco. No modelo hidrológico esse empreendimento está localizado na sub-bacia de Cachoeira da Manteiga.

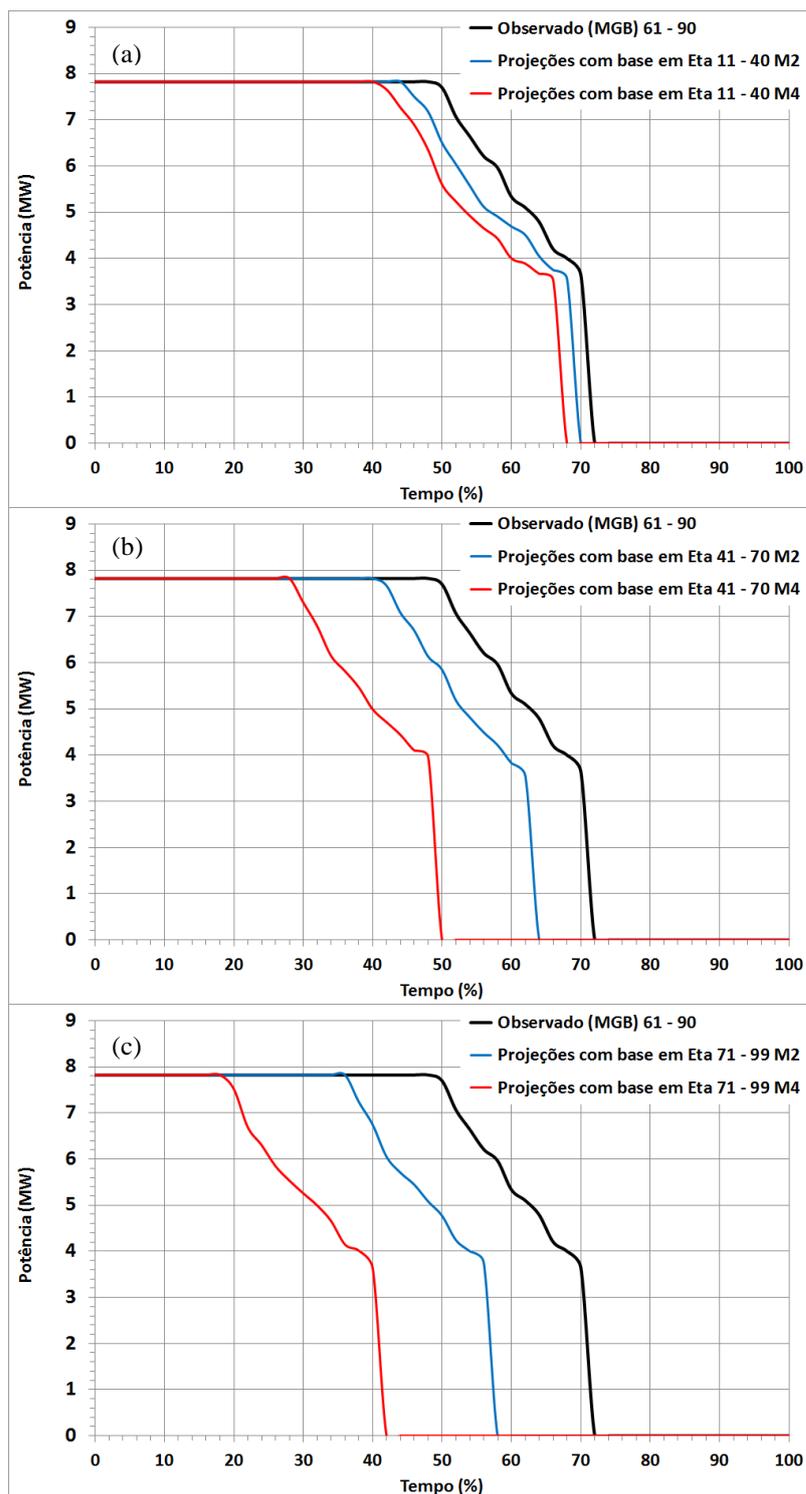
Os dados deste aproveitamento foram obtidos por meio do Inventário Hidrelétrico Simplificado do rio Jequitaiá. Esse aproveitamento possui uma área relativamente grande de drenagem, com aproximadamente 6580 km<sup>2</sup> e possibilitando uma queda bruta de 34.6 m. A vazão de projeto estimada para esse aproveitamento é de 26.6 m<sup>3</sup>/s. Como não existe nenhum

posto fluviométrico no local do aproveitamento, a vazão de projeto foi estimada pela transposição de vazões de outros postos na bacia.

Devido à vazão relativamente baixa, no inventário foi sugerida a utilização de apenas uma turbina do tipo Francis normal de eixo vertical. A partir daí foi possível também estimar um rendimento global do conjunto turbina e gerador com aproximadamente 89.2 %. As perdas no sistema de adução foram estipuladas com no máximo de 2.9%, que no caso de PCHs é um valor muito bom. Retirando as perdas a queda líquida seria aproximadamente 33.59 m.

Os tempos de paradas para a manutenção da turbina foram estipulados em 360 horas para as paradas programadas (IP) e seriam necessárias cerca de 100 horas para as paradas forçadas (IF), no ano todo.

A Figura 46 apresenta a comparação da simulação da capacidade de geração do aproveitamento C, em relação à porcentagem do tempo em uso. As simulações são baseadas na vazão observada pelo MGB e nas projeções futuras dos membros do modelo Eta. Como esse empreendimento possui apenas uma turbina, é normal que em algum momento a vazão atinja a mínima que é possível ser turbinada, zerando, assim, a capacidade de geração da usina por mais tempo, se comparada com os demais aproveitamentos apresentados.



**Figura 46.** Comparação entre as simulações da capacidade de geração no aproveitamento D. Simulações feitas com os dados observados (MGB) e com as projeções futuras do modelo Eta. (a) 2011 a 2040, (b) 2041 a 2071 e (c) 2071 a 2099.

Ao analisar a Figura 46, nota-se que se comparado com os outros empreendimentos simulados, para os dados de vazão observada, a usina do aproveitamento D consegue gerar em plena carga por volta de 48% do tempo de uso. Porém tem uma desvantagem de ficar boa parte do tempo sem poder gerar, quase 30% do tempo, por possuir apenas uma turbina.

As projeções do membro M2 apontam uma tendência de redução gradativa da capacidade de geração da usina, sendo o último período o mais crítico.

Já as projeções do membro M4 a capacidade de geração cai drasticamente a partir do segundo período futuro (2041 a 2070), gerando a plena carga apenas 28% do tempo, e possibilitando a geração apenas 50% do tempo. Para o último período nota-se claramente que a capacidade de geração da usina a plena carga reduz para apenas 18% do tempo, e reduz ainda mais a possibilidade de geração, para apenas de 40% tempo. Reduções dessa magnitude pode inviabilizar o empreendimento a longo prazo.

A Tabela 19 apresenta de forma sucinta os resultados da energia assegurada para o aproveitamento D. São apresentados outros resultados importantes como a variação do fator de capacidade ao longo do tempo, bem como a variação da energia assegurada em termos percentuais.

**Tabela 19. Dados energéticos simulados para o aproveitamento D. Comparação das energias asseguradas observada (MGB) com as projeções futuras dos diferentes membros do modelo Eta.**

Estudo Energético	Observado (MGB)	Membro M2			Membro M4		
		2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099	2011 a 2040	2041 a 2070	2071 a 2099
<b>Energia Gerada no Ano (MWh)</b>	44891	42627	39209	35333	40712	29973	23970
<b>Fator de Capacidade</b>	0.66	0.62	0.57	0.52	0.59	0.44	0.35
<b>Energia Assegurada (MWh)</b>	42534	<b>40388</b>	<b>37150</b>	<b>33478</b>	<b>38575</b>	<b>28399</b>	<b>22711</b>
<b>Variação da Energia Assegurada</b>	-----	<b>-5.0%</b>	<b>-12.7%</b>	<b>-21.3%</b>	<b>-9.3%</b>	<b>-33.2%</b>	<b>-46.6%</b>

Ao analisar Tabela 19, observa-se que a geração futura de energia neste aproveitamento é algo preocupante. As projeções do membro M2 mostram reduções nas energias asseguradas que vão se agravando ao longo do tempo. As reduções vão, praticamente, dobrando a cada período futuro.

Nas projeções do membro M4 a situação é ainda pior, pois logo no segundo período a redução passa dos 30%, bem maior que em outros empreendimentos para o mesmo período. As projeções apontam para reduções para o final do século é acima dos 45%, ficando um pouco atrás do valor simulado para o aproveitamento C.

Tanto para esse empreendimento, quanto para os outros, levando em conta somente a energia assegurada, os cenários de vazões futuras não são nada animadores. A bacia do rio São Francisco terá sérios problemas com a redução de vazões no futuro, não só com a geração de energia, como também em outros usos.

# 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

## 7.1 Conclusões

Apesar do aumento da diversificação das fontes de geração de energia, principalmente ao longo dos últimos 10 anos, o Brasil ainda é fortemente dependente da hidroeletricidade. As hidroelétricas são responsáveis por quase três quartos da potência instalada em todo o país.

Devido a essa forte dependência, a maioria das decisões tomadas no planejamento energético futuro, depende do conhecimento antecipado das condições hidrológicas e do clima futuro. Um exemplo disso é a energia assegurada das usinas, a qual garante ao empreendedor que a sua usina poderá produzir uma determinada quantidade de energia ao longo do tempo.

Como o Brasil é um país de extensões continentais, e por isso existe uma variabilidade hidrológica natural entre as grandes bacias, o período de cheias e o de estiagens não coincide em todo o país. Para aperfeiçoar essa variabilidade natural, o governo implantou um sistema que visa interligar energeticamente todas as principais regiões do país. A solução técnica encontrada pelo governo brasileiro foi a implementação do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Porém, em se tratando de mudanças climáticas, essa tentativa de atenuação da variabilidade hidrológica entre as regiões, devido ao SIN, pode não se tornar muito eficaz, já que as projeções de mudanças no clima afetam todo o globo, de formas ou intensidades diferentes. Por isso há uma grande preocupação não só dos empreendedores do setor elétrico, como de toda a sociedade, sobre quais serão os efeitos da mudança do clima na geração de energia.

A capacidade de prever ou de antecipar períodos prolongados de secas ou identificar tendências de reduções nas vazões ao longo de décadas, tem grande impacto no planejamento da operação das centrais. Principalmente para as centrais que trabalham a fio d'água, pois o risco é maior.

Os modelos computacionais vêm se desenvolvendo muito ao longo dos anos, e por isso vem reproduzindo o clima atual cada vez melhor. Esse fato é muito importante, pois serve como um bom indicativo sobre a possibilidade de descrever com maior confiabilidade

as projeções climáticas futuras. O modelo Eta, desenvolvido pelo INPE, representa muito bem o clima sobre a América do Sul, e sua tendência futura é de aumentar a resolução para que cada vez mais possa representar com maior fidelidade o clima de cada região.

Para o presente estudo fez-se uma análise das variações de duas das principais variáveis climáticas que influenciam no ciclo hidrológico, que são a precipitação e a temperatura média. Essa análise foi feita numa das maiores e uma das mais importantes bacias do Brasil, a bacia hidrográfica do rio São Francisco, que é responsável não só por boa parte da produção de energia elétrica para o país, mas pelo desenvolvimento de milhões de pessoas.

Nesta bacia se encontram grandes empreendimentos como a UHE de Três Marias, UHE de Sobradinho, o complexo de Paulo Afonso e Moxotó, entre outros. Porém, infelizmente, para este trabalho não foi possível realizar estudos sobre a energia assegurada para essas grandes usinas, pois a metodologia atual, proposta pelo governo, para o cálculo da energia assegurada, seria preciso simular um conjunto de séries históricas de vazões para todas as grandes usinas interligadas ao SIN. No momento essa simulação é uma prática inviável, por isso foi feita a escolha de pequenos aproveitamentos ou de PCHs, pois a metodologia do cálculo da energia assegurada é mais simples de ser feita. A definição da energia assegurada em PCHs depende basicamente da série de vazões do local do empreendimento e das horas de funcionamento por ano.

Para o presente trabalho foram analisados dois membros do modelo Eta; os membros escolhidos foram os que apresentaram uma maior sensibilidade a temperatura média (membro M4) e uma menor sensibilidade a temperatura média (membro M2).

As projeções futuras do membro M2 do modelo Eta, para a bacia do rio São Francisco, apresentam menores variações entre as projeções futuras e os dados observados (MGB). As variações futuras na precipitação média diária, na temperatura média mensal, e conseqüentemente nas vazões dos rios, são significativas após meados do século XXI. Somente nos últimos 30 anos do século essas variáveis, bem como a vazão, atingem valores preocupantes.

Em algumas regiões da bacia, principalmente na parte alta da bacia, as projeções das vazões sob a influência do membro M2, tendem a um ligeiro aumento até no final do século, conforme apresentado no exemplo para a bacia afluenta à usina de Três Marias. Em contrapartida, nas regiões média e baixa da bacia, as projeções futuras das vazões apresentam uma tendência de redução em relação à vazão observada (MGB).

As projeções futuras do membro M4 do modelo Eta, são as que apresentam as maiores variações entre as projeções futuras e os dados observados (MGB). As variações nas vazões

dos rios causadas pelas variações da precipitação média diária e da temperatura média mensal, já são significativas logo no primeiro período de 30 anos analisado (2011 a 2040). Esses valores são tão críticos, que em determinadas regiões da bacia, as reduções nas vazões em valores percentuais, chegam próximos aos simulados para o período final do membro M2.

Analisando as projeções do membro M4, verificou-se que, praticamente em toda a bacia, as projeções apontam reduções nas vazões em relação à vazão média observada. Já em meados do século XXI, as reduções das vazões médias chegam a ser pelo menos duas vezes maior em relação ao período anterior. Para o final do século, em algumas partes da bacia, as projeções futuras apontam uma redução da vazão média de aproximadamente 50%. Isso considerando a média anual, ou seja, em determinados períodos do ano essa redução pode ultrapassar esse valor.

De modo geral pode-se dizer que as variações das projeções futuras da temperatura atreladas às variações da precipitação influenciaram de forma significativa nas vazões médias e características em diferentes partes da bacia. Com reduções de 4 a 6% na média.

A variação da vazão em um rio influencia diretamente na variação da geração de qualquer usina hidroelétrica, mesmo para rios com vazão regularizada, dada a variação em escala de várias décadas.

Com base nas projeções futuras dos membros M2 e M4 do modelo Eta, a bacia do rio São Francisco irá sofrer grandes reduções nas suas vazões médias e com isso a energia assegurada das usinas existentes tenderão a diminuir. Para os pequenos aproveitamentos, esse quadro pode ser ainda pior, pois exigirá um alto risco do empreendedor ao apostar que o empreendimento irá ter o retorno financeiro desejável ao longo de toda a concessão.

Os empreendimentos analisados neste trabalho apresentaram grandes perdas de energia gerada e assegurada ao longo do século. Só para ilustrar, a menor perda ou redução da energia assegurada no melhor cenário, é de aproximadamente 10%. Essa redução significa menor ganho da usina, podendo até inviabilizar o investimento no empreendimento.

Caso algum desses cenários de vazões futuras venha a acontecer, à bacia do rio São Francisco terá grandes problemas num futuro próximo, não só na geração de energia, como também nos demais usos da água.

É preciso lembrar e alertar sobre as várias incertezas deste projeto, as incertezas inerentes aos membros futuros do modelo Eta, bem como as incertezas e erros causados por simplificação e interpolação do modelo hidrológico, e na possibilidade da ocorrência de alguns dos acontecimentos simulados pelo modelo Eta.

## 7.2 Recomendações

Os resultados obtidos nessa pesquisa devem ser vistos dentro de um processo evolutivo de conhecimento no qual se busca respostas às necessidades de diversas atividades, como o setor elétrico brasileiro. A seguir são apresentadas algumas recomendações:

- Fazer uma análise considerando mais modelos atmosféricos, globais ou regionais, a fim de possibilitar a comparação de diferentes resultados e não se basear em somente um modelo;
- Fazer simulações com variáveis climáticas menos expressivas, mas não desprezíveis: como a insolação, pressão atmosférica, vento a 10m de altura, e outros;
- Fazer uma análise comparativa entre a evapotranspiração e a precipitação;
- Possivelmente num futuro próximo utilizar o modelo Eta com uma resolução de grade menor, e
- Reduzir ou melhorar alguns erros relativos a aproximações e simplificações de ambos modelos utilizados neste estudo (MGB e Eta).

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, L., MARENGO, J.A. “Assessment of regional seasonal predictability using the PRECIS regional climate modeling system over South America”. *Theor Appl Climatol* 100:337–350. DOI 10.1007/s00704-009-0165-2. 2009
- ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica. Cadernos Temáticos ANEEL: Energia Assegurada. Brasília, DF. Abril 2005.
- ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em: 21/06/2013.
- ARNELL, N.W. “Uncertainty in the relationship between climate forcing and hydrological response in UK catchments”. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 897–912, doi:10.5194/hess-15-897-2011. 2011.
- BÁRDOSSY, A., PEGRAM, G.”Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology”. *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 47, W04505, doi:10.1029/2010WR009689, 2011.
- BRASCAN ENERGÉTICA S.A. Estudo de Inventário Hidrelétrico Simplificado da Bacia do Rio do Sono. Aprovado pelo Despacho da ANEEL nº 1764, de 4 de Agosto de 2006.
- CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Disponível em: <www.ccee.org.br>. Acesso em: 15/03/2013
- CLARK, D.A., PIPER, S.C., KEELING, C.D. E CLARK, D.B. “Tropical rain forest tree growth and atmospheric carbon dynamics linked to interannual temperature variation during 1984-2000”. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 100, 5852-5857. 2003.
- CHAVES, D. R.; IZAURRALDE, R. C.; THOMSON, A. M.; GAO, X. “Long-term climate change impacts on agricultural productivity in eastern China”. *Agric For Meteorol.* 149:11 pag 18 a 28. 2009.
- CHIEW, F.H.S. “Estimation of rainfall elasticity of streamflow in Australia”. *Hydrological Sciences Journal*, 51(4), pp. 613 – 625. 2006
- CHIEW, F.H.S., TENG, J., VAZE, J., KIRONO, D.G.C. “Influence of global climate model selection on runoff impact assessment”. *J. Hydrol.*, 379, 172-180. 2009.
- CHOU, S.C., BUSTAMANTE, J.F., GOMES, J.L. “Evaluation of Eta model seasonal precipitation forecasts over South America”. *Nonlinear Process in Geophys* 12(4):537–555. doi:10.5194/npg-12-537-2005. 2005
- CHOU, S.C., MARENGO, J.A., LYRA, A.A., SUEIRO, G., PESQUERO, J.F., ALVES, L.M., KAY, G., BETTS, R., CHAGAS D.J., GOMES, J.L., BUSTAMANTE, J.F., TAVARES, P. “Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs”. *Clim Dyn.* DOI: 10.1007/s00382-011-1002-8. 2011.
- CHOU, S. C; MARENGO, J. A.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J. F.; ALVES, L.; KAY G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. “Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs”. *Climate Dynamics*. DOI 10.1007/s00382-011-1002-8. 2011

CHRISTENSEN, J.H., HEWITSON, B., BUSUIOC, A., CHEN, A., GAO, X., HELD, I., JONES, R., KOLLI, R.K., KWON, W.T., LAPRISE, R., MAGAÑA RUEDA, V., MEARN, L., MENÉNDEZ, C.G., RÄISÄNEN, J., RINKE, A., SARR, A., WHETTON, P., REGIONAL CLIMATE PROJECTIONS. IN: SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K.B., TIGNOR, M., MILLER, H.L. (eds) *Climate change 2007: the physical science basis*. Chap 11, contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, UK, 2007.

CICS – Canadian Institute for Climate Studies, que em 2006 virou PCIC – Pacific Climate Impacts Consortium. Disponível em: <[http://www.cics.uvic.ca/scenarios/index.cgi?More\\_Info-Fine\\_Resolution\\_Scenarios](http://www.cics.uvic.ca/scenarios/index.cgi?More_Info-Fine_Resolution_Scenarios)>. Acessado em: 12/06/2013.

CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. Estudo de Inventário Hidrelétrico Simplificado da Bacia do Rio Jequitáia. Despacho da ANEEL nº 324, de 20 de Fevereiro de 2006.

COLLISCHONN, W. Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. UFRGS, IPH, Porto Alegre. 194 p. 2001

CLIMATEPREDICTION.net. Disponível em: <<http://climateprediction.net/content/modelling-climate>>. Acessado em: 13/06/2012.

DORAN, P.T., ZIMMERMAN, M.K. “*Examining the scientific consensus on climate change*”. EOS. Transactions American Geophysical Union 90, 22–23. 2009

FREITAS, M. A. V., SOITO, J. L. S. “*Mudança do Clima no Brasil: Vulnerabilidade, impactos e adaptação*”. Parcerias Estratégicas: CGEE. 2008.

GFDL – Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton University, 9 maio de 2011. Disponível em: <<http://www.gfdl.noaa.gov/climate-modeling>>. Acessado em: 12/06/2013.

GIORGI, F., BI, X., PAL, JS. “*Mean, interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. I: presentday climate (1961–1990)*”. Clim Dyn 22:733–756. doi: 10.1007/s00382-004-0467-0. 2004.

GOHARI, A., ESLAMIAN, S. ABEDI-KOUPAEI, J., BAVANI, A. M., WANG, D., MADANI, K. “*Climate change impacts on crop production in Iran’s Zayandeh-Rud river basin*”. Science of the Total Environment. Vol. 442. pag 405 a 419. 2013.

HAY L.E.; CLARK, M.P.; WILBY, R.L.; GUTOWSKI JR., W.J.; LEAVESLEY, G.H.; PAN, Z.; ARRITT, R.W.; TAKLE, E.S. “*Use of Regional Climate Model Output for Hydrologic Simulations*”. Journal of Hydrometeorology. V.3, out, p.571-590. 2002.

HAY, L.E; CLARK, M.P. “*Use of statistically and dynamically downscaled atmospheric model output for hydrologic simulations in three mountainous basins in the western United States*”. Journal of Hydrology. V. 282, p.56-75. 2003.

HUGHES, D.A., KINGSTON, D.G., TODD, M.C. “*Uncertainty in water resources availability in the Okavango River basin as a result of climate change*”. Hydrol. Earth Syst. Sci., 15, 931–941, doi:10.5194/hess-15-931-2011. 2011.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. *Climate Change: the scientific basis IPCC WG I*, TAR. Cambridge Univ. Press, 881p. 2001

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE IPCC: Climate Change 2007: The Physical Science Basis- Working Group I Contribution to the IPCC Fourth Assessment Report. Brussels, February 2007a.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE IPCC: Climate Change 2007: Impacts Adaptation and Vulnerability - Working Group II Contribution to the IPCC Fourth Assessment Report. Brussels, April 2007b.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE IPCC, QUARTO RELATÓRIO DE AVALIAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS – QRA. Climate Change 2007: Synthesis Report, Valencia, November 2007c.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Disponível em: <[www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)>. Acessado em: 14/3/2013.

ISLAM, MD. M.; BARNES, A.; TOMA, L. An investigation into climate change scepticism among farmers. *Journal of Environmental Psychology*, Volume 34, Junho 2013, Pag. 137-150. 2013

JONES, R.G., NOGUER, M., HASSELL, D., HUDSON, D., WILSON, S., JENKINS, G., MITCHELL, J. “*Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS, Hadley Centre for Climate Prediction and Research*”. Met Office Hadley Centre, UK, p 40. 2004

JONES, R.G., MURPHY, J.M., HASSELL, D.C., WOODAGE, M.J. “*A high resolution atmospheric GCM for the generation of regional climate scenarios*”. Submetido ao *Clim Dyn*. 2007

KERR, R.A. “*Storm-in-a-Box Forecasting*”. *Science*. Vol.304, mai, p.946-948. 2004.

KIMURA, R. “*Numerical weather prediction*”. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. V.90, p.1403-1414. 2002.

KUNDZEWICZ, Z.W., ULBRICH, U., BRUCHER, T., GRACZYK, D., KRUGER, A., LECKEBUSCH, G.C., MENZEL, L., PINSKWAR, I., RADZIEJEWSKI, M. E SZWED, M. “*Summer floods in central Europe: climate change track?*”. *Nat. Hazards*, 36, 165-189. 2005.

KUNDZEWICZ, Z.W., MATA, W., ARNELL, L. J., DÖLL, N. W., KABAT, P., JIMÉNEZ, P., MILLER, B., OKI, K. A., SEM, T., SHIKLOMANOV, I. Freshwater resources and their management. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 173-210, 2007.

KRUG, T. *Mudança do Clima no Brasil: Vulnerabilidade, impactos e adaptação. Parcerias Estratégicas: CGEE*. 2008.

LÁZARO, Y. M. C., SILVEIRA, C. S. E FILHO F. A. S. Avaliação de desempenho dos modelos do IPCC-AR4 no nordeste setentrional do Brasil quanto à variabilidade plurianual da precipitação no século XX. XIX Simpósio de Brasileiro de Recursos Hídricos, Dezembro de 2011.

LENDERINK G., VAN ULDEN A, VAN DEN HURK, B, AND KELLER, F. “*A study on combining global and regional climate model results for generating climate scenarios of temperature and precipitation for the Netherlands*”. *Clim Dyn*, 29, 157-176, DOI: 10.1007/s00382-007-0227-z. 2007.

LORENCOVÁ, E., FRÉLICOVÁ, J., NELSON, E., VAČKÁŘ, D. “*Past and future impacts of land use and climate change on agricultural ecosystem services in the Czech Republic*”. *Land and Use Policy*, vol. 33, pag 183 a 194. 2013.

LIMA, W. P. Hidrologia Florestal Aplicada ao Manejo de Bacias Hidrográficas, USP, Departamento de Ciências Florestais, 2008.

MASELLI, F.. “*Monitoring forest conditions in a protected Mediterranean coastal area by the analysis of multi-year NDVI data*”. *Remote Sens. Environ.*, 89, 423-433. 2004.

MARENGO, J.A., AMBRIZZI, T. “*Use of regional climate models in impacts assessments and adaptations studies from continental to regional and local scales: the CREAS (Regional Climate Change Scenarios for South America) initiative in South America*”. Proceedings of 8 ICISHMO, Foz do Iguaçu, Brasil, pp 291–296. 2006.

MARENGO, J.A. Mudanças Climáticas Globais e seus Efeitos sobre a Biodiversidade: Caracterização do Clima Atual e Definição das Alterações Climáticas para o Território Brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. Série Biodiversidade, v.26, 2007.

MARENGO, J.A., NOBRE, C.A., TOMASELLA, J., OYAMA, M.D., DE OLIVEIRA, G.S., OLIVEIRA, R., CAMARGO, H., ALVES, L.M., AND BROWN, I.F. “*The drought of Amazonia in 2005*”. *Journal of Climate*, 21, 495-516. DOI: 10.1175/2007 JCLI1600.1. 2008a.

MARENGO, J.A. “*Regional Climate Change Scenarios for South America-The CREAS project*”. Conference on Climate Change and Official Statistics Oslo, Norway, 14-16 April 2008b.

MARENGO, J. A., AMBRISI, T., ROCHA, R. P., ALVES, L. M., CUARTA, S. V., VALVERDE, M. C., TORRES, R. R., SANTOS, D. C., FERRAZ, S. E. T. “*Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models*”. *Clim Dyn*. DOI 10.1007/s00382-009-0721-6. Dezembro, 2009.

MARENGO, J.A., CHOU, S.C., KAY, G., ALVES, L.M., PESQUERO, J.F., SOARES W.R., SANTOS, D.C., LYRA, A.A., SUEIRO, G., BETTS, R., CHAGAS D.J., GOMES, J.L., BUSTAMANTE, J.F., TAVARES, P. “*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 Parana River Basins*”. *Clim. Dyn*. DOI 10.1007/s00382-011-1155-5. Julho de 2011.

MCGUFFIE, K. HENDERSON-SELLER, A. A Climate Modelling Primer. England: John Wiley & Sons. 253p. 1997.

MENZEL, A., VON VOPELIUS J., ESTRELLA, N., SCHLEIP, C., DOSE, V. “*Farmer’s annual activities are not tracking speed of climate change*”. *Journal Climate Research*. Vol 32: 201-207, 2006.

MILLY, P.C.D., WETHERALD, R.T., DUNNE, K.A. E DELWORTH, T.L. “*Increasing risk of great floods in a changing climate*”. *Nature*, 415, 514-517. 2002.

NAKICENOVIC ,N., DAVIDSON, O., DAVIS, G., GRUBER, A., KRAM, T., LA ROVERE, E. L., METZ, B., MORITA, T., PEPPER, W., PITCHER, H., SANKOVSKI, A., SHUKLA, P., SWART, R., WATSON, R., DADI, Z. Relatório Especial Sobre Cenários de Emissões – RECE. Working Group III Contribution to the Third Assessment Report, IPCC. 27 p. 2000.

NÓBREGA, M. T., COLLISCHONN, W., TUCCI, C. E. M., PAZ, A. R. “*Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil*”. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 7,6099-6128, doi: 10.5194/hessd-7-6099-2010, 2010.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. Disponível em: <[www.ons.org.br](http://www.ons.org.br)>. Acessado em: 21/06/2013

PESQUERO, J., CHOU, S.C., NOBRE, C.A., MARENGO, J.A. “*Climate downscaling over South America for 1961–1970 using the Eta Model*”. Theor Appl Climatol. doi:10.1007/s00704-009-0123-z. 2009

PEZZA, A.; SIMMONDS, I. “*The first South Atlantic Hurricane: unprecedented blocking, low shear and climate change*”. Geophysical Research Letters, v. 32 (L15712), 2005.

POENTE ENGENHARIA E CONSULTORIA S/C. Estudo de Inventário Hidrelétrico Simplificado da Bacia do Rio Abaeté. Aprovado pelo Despacho da ANEEL nº 340, de 9 de Junho de 2003.

RCA ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO. Estudo de Inventário Hidrelétrico Simplificado da Bacia do Rio Grande. Aprovado pelo Despacho da ANEEL nº 978, de 4 de Dezembro de 2001.

ROADS, J.; CHEN, S.-C.; KANAMITSU, M. U.S. “*Regional climate simulations and seasonal forecasts*”. Journal of Geophysical Research. V.108, n.16, p.1(1-17). 2003.

ROSENZWEIG, C., CASASSA, G., KAROLY, D.J., IMESON, A., LIU, C., MENZEL, A., RAWLINS, S., ROOT, T.L., SEGUIN, B., TRYJANOWSKI, P. “*Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems*”. Climate Change 2007, Cap. 3 Impacts, Adaptation and Vulnerability, pag. 79 – 131. 2007.

SEMENOV, S.M., YASUKEVICH, V.V. E GEL'VER, E.S. “*Identification of Climatogenic Changes*”. Publishing Center, Meteorology and Hydrology, Moscow, 2006.

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA DE BOLIVIA, SENAMHI, 2007. Boletín Climatológico, Dic-Ene-Feb 2007. Disponível em <<http://www.senamhi.gov.bo/meteorologia/climatologia.php>>. Acesso em 10 de abril. 2011.

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA DE ARGENTINA – SNM. Boletín Climatológico, May 2007. Disponível em <<http://www.smn.gov.ar/?mod=clima&id=50>>. Acesso em 11 de abril. 2011.

SILVA, B., C., Previsão hidroclimática de vazão para a bacia do Rio São Francisco, Teses submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da UFRS, Porto Alegre, outubro de 2005.

SILVEIRA, C. S., FILHO, F. A. S., LÁZARO, Y. M. C., FERNANDES, W. S., Avaliação de Desempenho dos Modelos de Mudança Climático do IPCC-AR4 Quanto a Sazonalidade e os Padrões de Variabilidade Interanual de Precipitação Sobre a América do Sul. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Maceió, Novembro de 2011.

TERCEIRO RELATÓRIO DE AVALIAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS – TRA-IPCC. Climate Change 2001: Synthesis Report, Cambridge Univ. Press 2001.

THORNE, R. “*Uncertainty in the impacts of projected climate change on the hydrology of a subarctic environment: Liard River Basin*”. Hydrol. Earth Syst. Sci., 15, 1483–1492, doi:10.5194/hess-15-1483-2011. 2011

TOMASELLA, J., RODRIGUEZ, D. A., CUARTAS, L. A., FERREIRA, M., FERREIRA, J. C., MARENGO, J.A. “*Estudo de impacto das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos superficiais e sobre os níveis dos aquíferos na Bacia do Rio Tocantins*”. CCST/INPE, Cachoeira Paulista. 2009.

TREUT, H. L., GASTINEAU, G., LI, L. "*Uncertainties attached to global or local climate changes*". External Geophysics, Climate and Environment. p 584 - 590. 2008.

TUCCI, C. E. M. AND DAMIANI, A. "*Potential impacts of climate change on the Uruguay river*", Revista Brasileira de Engenharia – Caderno de Recursos Hídricos, ABRH, 12, 2, 1994.

TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T.; COLLISCHONN, W.; DIAS, P.L.S.; SAMPAIO, G.O." *Long term flow forecast based on climate and hydrological modeling: Uruguay River basin*". Water Resources Research. V.39, n.7, p.3(1-11). 2003.

VALVERDE, M. C., MARENGO, J. A. "*Mudanças na circulação atmosférica sobre a América do Sul para cenários futuros de clima projetado pelos modelos globais do IPCC AR4*". Revista Brasileira de Meteorologia, v.25, n.1, 125 - 145, 2010

WHITMARSH, L. "*Scepticism and uncertainty about climate change: Dimensions, determinants and change over time*". Global Environmental Change, p. 690 - 700. 2011.

WMO, World Meteorological Organization. Disponível em: <[http://www.wmo.int/pages/themes/climate/climate\\_models.php](http://www.wmo.int/pages/themes/climate/climate_models.php)>. Acessado em: 01/05/2013

YOU, L., ROSEGRANT, M. W., WOOD, S., SUN, D. "*Impact of growing season temperature on wheat productivity in China*". Agric For Meteorol. 149:10. pag 09 a 14. 2009.

XU, H., TAYLOR, R.G., XU, Y. "*Quantifying uncertainty in the impacts of climate change on river discharge in sub-catchments of the Yangtze and Yellow River Basins, China*". Hydrol. Earth Syst. Sci., 15, 333–344, doi:10.5194/hess-15-333-2011. 2011.