



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CLEITON DA SILVA SILVEIRA

*MODELAGEM INTEGRADA DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS EM
MÚLTIPLAS ESCALAS TEMPORAIS E ESPACIAIS: APLICAÇÃO NO CEARÁ E NO
SETOR HIDROELÉTRICO BRASILEIRO*

FORTALEZA-CE

2014

CLEITON DA SILVA SILVEIRA

*MODELAGEM INTEGRADA DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS EM
MÚLTIPLAS ESCALAS TEMPORAIS E ESPACIAIS: APLICAÇÃO NO CEARÁ E NO
SETOR HIDROELÉTRICO BRASILEIRO*

Tese submetida Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho

FORTALEZA – CE

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

-
- S587m Silveira, Cleiton da Silva.
Modelagem integrada de meteorologia e recursos hídricos em múltiplas escalas temporais e espaciais: aplicação no Ceará e no setor hidroelétrico brasileiro / Cleiton da Silva Silveira. – 2014.
351 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Fortaleza, 2014.
Área de Concentração: Recursos Hídricos.
Orientação: Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho.
1. Recursos hídricos. 2. Precipitação - Previsão. 3. Previsão de vazões. I. Título.

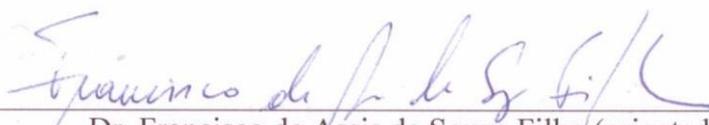
CLEITON DA SILVA SILVEIRA

*MODELAGEM INTEGRADA DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS EM
MÚLTIPLAS ESCALAS TEMPORAIS E ESPACIAIS: APLICAÇÃO NO CEARÁ E NO
SETOR HIDROELÉTRICO BRASILEIRO*

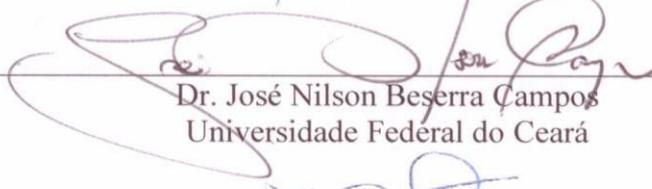
Tese apresentada à Coordenação do
Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Civil da Universidade Federal do Ceará,
como parte dos requisitos para obtenção
do título de Doutor em Engenharia Civil.
Área de concentração: Recursos
Hídricos.

Aprovado em: 16/07/2014.

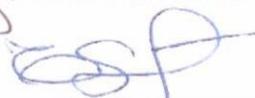
BANCA EXAMINADORA



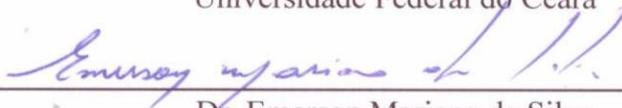
Dr. Francisco de Assis de Souza Filho (orientador)
Universidade Federal do Ceará



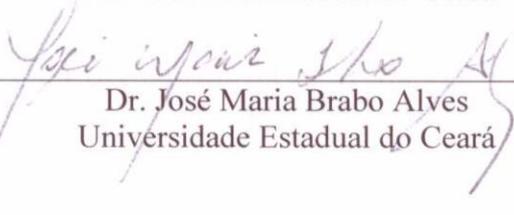
Dr. José Nilson Beserra Campos
Universidade Federal do Ceará



Dra. Ticiania Marinho de Carvalho Studart
Universidade Federal do Ceará



Dr. Emerson Mariano da Silva
Universidade Estadual do Ceará



Dr. José Maria Brabo Alves
Universidade Estadual do Ceará

A Deus, fonte de tudo.

A minha esposa Patrícia Silveira pelo apoio e compreensão incondicional.

Aos meus pais.

Ao Prof. Assis Filho e família pelo apoio, orientação e contribuição.

Aos meus amigos pelo apoio e companheirismo.

Ao meu filho Felipe Silveira pela felicidade que me traz por simplesmente existir.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser fonte inesgotável de energia para a conclusão deste trabalho.

Ao meu orientador-professor Francisco de Assis de Souza Filho, que aceitou o desafio do desenvolvimento desta tese; sempre presente, paciente e entusiasta.

Aos meus amigos Samuellson Cabral, Wictor Lemos, Luizinho, Marcelo, Paulo Henrique, Chaguinha, Juliana, Thiago, Samiria, Jacqueline, Socorro e Talitha pela troca de informações e companheirismos.

A meu filho, pela inspiração e felicidade que me proporciona.

Aos meus pais, Cláudio e Raimunda, pela formação moral que me proporcionaram.

A minha esposa, Patrícia Silveira, pelo carinho, atenção e compreensão incondicional.

Aos meus irmãos, Fábria e Nilton, pela amizade e pela compreensão nos momentos difíceis vividos em família.

A Terezinha, pelo apoio e amizade.

Aos servidores do DEHA, sempre prontos a nos ajudar.

A CAPES, pelo auxílio financeiro através de Bolsa de Doutorado.

A toda e qualquer pessoa que por ventura tenha contribuído de alguma forma com este trabalho.

RESUMO

O presente trabalho visa elaborar um sistema de planejamento em múltiplas escalas temporais e espaciais e aplicá-lo ao setor elétrico brasileiro e ao sistema Jaguaribe-Metropolitano do Estado do Ceará. Para realização desta proposta, foram consideradas algumas escalas temporais: curtíssimo prazo (até um mês), curto prazo (até um ano) e médio e longo prazo (1 a 10 anos e até 30 anos, respectivamente). Para obtenção das previsões de vazões de curtíssimo prazo são utilizadas as previsões de precipitação a partir de modelos atmosféricos, para posterior entrada no modelo hidrológico chuva-vazão. Para escala de curto prazo foram considerados modelos estocásticos e estatísticos, como do tipo Periódico Autorregressivo (PAR), Periódico Autorregressivo com variáveis exógenas (PARx) e K-vizinhos, e o uso de modelos atmosféricos globais como entrada do modelo hidrológico chuva-vazão *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP). Na escala de médio prazo foram considerados modelos autorregressivos (AR) e as transformadas de *Fourier* e ondeletas. Para escala de longo prazo foram utilizados dados provenientes do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5) como dados de entrada no modelo hidrológico chuva-vazão. Quanto à previsão de tempo, à medida que o limiar de chuva adotado na construção da tabela de contingência aumenta, a qualidade das previsões diminui, exceto para o índice acerto. Dessa forma, o sistema de previsão numérica mostra-se eficiente em detectar a ocorrência de chuvas de menor intensidade, apresentando resultados mais satisfatórios nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. Na escala sazonal, os modelos apresentam-se melhor que a climatologia. Da mesma forma, na escala de médio prazo, os modelos baseados na série de Fourier e ondeletas apresentam melhor verossimilhança do que a climatologia. Na escala plurianual, há divergências quanto ao futuro mostrado pelas projeções dos modelos do CMIP5 que foram analisados para os cenários RCP8.5 e RCP4.5 do século XXI, porém no setor Norte do Sistema Interligado Nacional (SIN), a maioria dos modelos sinaliza tendência negativa, divergindo apenas em magnitude.

Palavras-chave: Previsão de Vazões; Múltiplas escalas temporais; Sistema Interligado Nacional; Sistema Jaguaribe-Metropolitano.

ABSTRACT

This study aims to develop a planning system on multiple spatial and temporal scales, and apply it to the Brazilian electric sector and Ceará State, Jaguaribe Metropolitan System. For realization of this proposal, we have been considered some temporal scales: short-term (up to 1 month), short term (up to one year) and medium to long term (1-10 years and 10-30 years, respectively). To obtain estimates of the flow of short-term rainfall forecasts from atmospheric models for later entry in the hydrological rainfall-runoff model are used. To short term scale were considered stochastic and statistical models, as the Periodic Autoregressive type (PAR), Periodic Autoregressive with exogenous variables (PARx) and K-nearest neighbor models, and the use of global atmospheric models as input to hydrological rainfall-runoff model Soil Moisture Accounting Procedure (SMAP). For the range of the medium term were considered autoregressive models (AR) and Fourier and wavelets. We used data from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) as input in hydrological rainfall-runoff model for long-term scale. For the weather forecast, as the rain threshold adopted in the construction of the contingency table increases, the quality of the forecasts decreases, except for the adjustment index. Thus, the system of numerical prediction proves efficient in detecting the occurrence of rainfall of less intensity, with most satisfactory results in the North and Northeast regions of Brazil. On seasonal scale the models feature up better than the climatology. Likewise, in the range of medium-term models based on Fourier series and wavelets have better likelihood than the weather. In multi-scale, there are differences in the future shown by the projections of the CMIP5 models that were analyzed for RCP8.5 and RCP4.5 the XXI century scenarios, but in the North sector of the National Interconnected System (SIN), most models indicate negative trend, diverging only in magnitude.

Keywords: Stream flow Forecasting; Multiple timescales; National Interconnected System; Jaguaribe-Metropolitano System.

Lista de Figuras

Figura 1- Níveis hierárquicos do planejamento e escalas temporais.....	27
Figura 2- As escalas temporais de planejamento e o clima.....	32
Figura 3-Climatologia da precipitação média sobre o Ceará no período de 1912 a 2013 a partir da base de pluviômetros da FUNCEME e SUDENE.	33
Figura 4-Precipitação média anual em Fortaleza-CE e a média móvel de 10 anos de precipitação para o período de 1849 a 2006.	34
Figura 5-Horizonte de operação do estudo de alocação de água.....	36
Figura 6- Interação entre os modelos hidrológicos cadeia de planejamento da operação do SIN.....	43
Figura 7-Fases da Oscilação Decadal do Pacífico – a esquerda a fase positiva e a direita a fase negativa (Anomalia de temperatura em °C).....	50
Figura 8-Oscilação da Temperatura da Superfície do Mar do Pacífico durante 1900 – 2010 (Anomalia de temperatura em °C).....	50
Figura 9- Reservatórios do Ceará por Região Hidrográfica. Onde: 1-Orós, 2-Castanhão, 3-Banabuiú, 4-Pacoti-Riachão.....	64
Figura 10 - Energia Natural Afluente em MW (a unidade usada é relação entre a energia gerada e o tempo de funcionamento das instalações) dos sub-sistemas do setor elétrico brasileiro no período de 2002 a 2011.	67
Figura 11-Horizontes de previsão propostos.	70
Figura 12-Bacias do setor elétrico brasileiro utilizadas no trabalho.	72
Figura 13-Distribuição espacial dos Postos Base utilizados na análise de previsão de vazão.....	75
Figura 14- Bacias ou trechos selecionados para a avaliação, com seu respectivo número, designado na Tabela 4.	76
Figura 15- Localização dos pluviômetros usados no estudo.	77
Figura 16-Regiões homogêneas do Ceará, destaque para região de Jaguaribana (em vermelho os pontos de grade e em azul a área de influência de cada ponto).	78
Figura 17-Sistema de previsão proposto para escala temporal de médio prazo.....	80
Figura 18-Sistema de previsão proposto para escala temporal de curto prazo.....	81
Figura 19- Diagrama esquemático do <i>downscaling</i> com acoplamento entre modelos hidrológicos e atmosféricos, modo unidirecional.....	82
Figura 20 - Cenários do IPCC-AR5 e forçante radiativa antropogênica global para cada um deles.....	85
Figura 21 - Esquema conceitual do modelo chuva-deflúvio SMAP.	88
Figura 22 - Correção de viés usando a função de distribuição gama para precipitação.	89
Figura 23 - Vazões médias anuais observadas e as obtidas pelo SMAP com dados de precipitação do CRU para o período de 1961 a 1990 para as bacias:(a)Furnas; Itá(b) e (c) Três Marias.....	98
Figura 24 - Impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos(2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 em relação ao século XX (1950-1999) para : (a) Emborcação e (b) Furnas.	105

Figura 25 - Impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos(2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 em relação ao século XX (1950-1999) para : (a) Porto Primavera, (b) Itaipu e (c) Itá.	106
Figura 26 - Impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos(2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 em relação ao século XX (1950-1999) para : (a) Três Marias e (b) Sobradinho.	107
Figura 27 - Impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos(2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 em relação ao século XX (1950-1999) para : (a) Tucuruí, (b) Belo Monte e (c) Santo Antônio.	109
Figura 28 - Anomalia das vazões dos clusteres para o periodo de 2010 a 2039 e centroide dos mesmos. Cluster 1: modelos em vermelho; Cluster 2: modelos em azul; Cluster 3: modelos em verde; Centroíde 1: representado por x; Centroíde 2: representado por círculos e C.	110
Figura 29 - Anomalia das vazões dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 mais próximos dos centroides, para o período de (a)2010 a 2039; (b)2040 a 2069 e (c) 2070 a 2098.	112
Figura 30 - Tendências das séreis de vazões para Furnas dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 Anos e tranformada em ondeletas.....	116
Figura 31 - Tendências das séries de vazões para Itaipu dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.	117
Figura 32 - Tendências das séries de vazões para Santa Cecília dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 mais próximos dos -centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.	118
Figura 33 - Tendências das séreis de vazões para Sobradinho dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e tranformada em ondeletas.....	120
Figura 34 - Tendências das séries de vazões para Sobradinho dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e tranformada em ondeletas.....	121
Figura 35 - Tendências das séries de vazões para Tucuruí dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.	123
Figura 36 - Tendências das séries de vazões para Belo Monte dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.	124
Figura 37 - Tendências das séries de vazões para Santo Antônio dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.	125
Figura 38 - Impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos(2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 em relação ao século XX (1950-1999) para : (a) Emborcação e (b) Furnas.	130
Figura 39 - Impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos (2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5	

em relação ao século XX (1950-1999) para : (a) Porto Primavera; (b) Itaipu; (c)Rosana e (d)D. Francisca.....	132
Figura 40 - Impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos(2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 em relação ao século XX (1950-1999) para : (a) Três Marias e (b) Sobradinho.	133
Figura 41 - Impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos(2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 em relação ao século XX (1950-1999) para : (a) Tucuruí e (b) Santo Antônio.	135
Figura 42 - Anomalia das vazões dos clusteres para o periodo de 2010 a 2039 ecentroide dos mesmos. Cluster 1: modelos em vermelho; Cluster 2: modelos em azul; Cluster 3: modelos em verde; Cluster 4: modelos em amarelo; Centroíde 1: representado por x; Centroide.....	136
Figura 43 - Anomalia das vazões dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 mais próximos dos centroides,para o período de (a)2010 a 2039; (b)2040 a 2069 e (c) 2070 a 2098.	139
Figura 44 - Tendências das séries de vazões para Furnas dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.	142
Figura 45 - Tendências das series de vazões para Itaipu dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.	144
Figura 46 - Tendências das séries de vazões para D.Francisca dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.	145
Figura 47 - Tendências das séries de vazões para Sobradinho dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.	147
Figura 48 - Tendências das séries de vazões para Xingó dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.	148
Figura 49 - Tendências das séreis de vazões para Tucuruí dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e tranformada em ondeletas.....	150
Figura 50 - Tendências das series de vazões para Belo Monte dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.	151
Figura 51 - Tendências das series de vazões para Santo Antônio dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.	152
Figura 52-Climatologia dos Modelos do CMIP5 para século XX (1950-1999) para a Bacia do Orós: (a) Quantidade de precipitação por mês; (b) Percentual de chuva por mês.....	155
Figura 53-Variação percentual na média anual de vazões no século XXI para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 para: (a) Óros , (b) Castanhão, (c) Banabuiu e (d) Pacoti-Riachão.	157

Figura 54-Variação percentual na média anual de vazões no século XXI para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 para: (a) Óros , (b) Castanhão, (c) Banabuiú e (d) Pacoti-Riachão.	159
Figura 55-Tendências das séries de vazões para a bacia do Óros dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5: BNU-ESM,bcc-csm1-1 e IPSL-CM5A-LR.	162
Figura 56-Tendências das séries de vazões para a bacia do Pacoti-Riachão dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5: BNU-ESM,bcc-csm1-1 e IPSL-CM5A-LR	163
Figura 57-Tendências das séries de vazões para a bacia do Orós dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5: BNU-ESM, bcc-csm1-1, HadGEM2-CC e IPSL-CM5A-LR.	165
Figura 58-Tendências das séries de vazões para a bacia do Pacoti-Riachão dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5: BNU-ESM,bcc-csm1-1, HadGEM2-CC e IPSL-CM5A-LR.....	166
Figura 59 - Opções de modelos auto-regressivos usados para projeção decadal-ARs(coluna 1), ARsMedia(coluna 2) e ARsMediana (coluna 3).....	172
Figura 60 - Opções de modelos baseados na série de Fourier para projeção decadal-FA(coluna 1), FMedia(coluna 2) e FMediana(coluna 3).....	175
Figura 61 - Mapa de distribuição espacial das tendências de Sen das vazões médias mensais naturalizadas dos postos do ONS. O tamanho do círculo indica a intensidade da declividade de Sen,.....	181
Figura 62-Ausência de tendência de Sen – Posto Furnas (6).	183
Figura 63 - Tendência de Sen Negativa – Posto Sobradinho (169).....	183
Figura 64 - Tendência de Sen Positiva – Posto Porto Primavera (246).	183
Figura 65 - Espectro de potência das vazões anuais normalizadas usando transformada de Fourier para Furnas, Sobradinho, Itaipu e Tucuruí.....	185
Figura 66 – Série observada e reconstruídas a partir dos Harmônicos de <i>Fourier</i>	187
Figura 67 - Harmônico de frequência 0,059 para Furnas, Sobradinho, Itaipu e Tucuruí.	188
Figura 68 - Harmônico de frequência 0,118 para Furnas e Itaipu.	189
Figura 69 - Harmônico de frequência 0,088 para Sobradinho e Tucuruí.	189
Figura 70-Projeção composta pelos harmônicos selecionados para as vazões anuais em Furnas e Sobradinho Incremental.	190
Figura 71-Comparação entre as funções de distribuição de probabilidade acumulada previstas pelo modelo FA para 10 anos, a climatologia e a observação para diferentes horizontes de previsão. Para Furnas e Sobradinho Incremental.....	191
Figura 72-(a) Mapa das proporções da variância explicada pela banda de alta frequência (1 a 8 anos); (b) Mapa das proporções da variância explicada pela banda de média frequência (9 a 39 anos); e (c) Mapa das proporções da variância explicada pela banda de baixa frequência (mais de 40 anos).....	192
Figura 73– Wavelet de Morlet – Posto Furnas (6).	193
Figura 74- Wavelet de Morlet – Posto Sobradinho (169).	194
Figura 75- Wavelet de Morlet – Posto Porto Primavera (246).....	194
Figura 76-Bandas de variação da transformada em ondeletas e calibração do modelo WARs. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: banda de 2 a 8 anos, banda 9 a 39 anos e resíduo para Furnas e Sobradinho.	195

Figura 77-Bandas de variação da transformada em ondeletas e projeção do modelo WARs para o período de 1999 a 2008. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: banda de 2 a 8 anos, banda 9 a 39 anos, resíduo e projeção para Furnas e Sobradinho.	196
Figura 78-Razão de verossimilhança obtida entre o modelo WARs e climatologia para os postos bases do SIN. Em azul razão de verossimilhança maior do que 1 e em vermelho menor do que 1.	197
Figura 79- Calibração para cada uma das bandas de ondeletas para o modelo FW e CDF para o período de 10 anos.	198
Figura 80- Projeções do modelo FW para Furnas, Sobradinho e Itaipu.....	199
Figura 81 - Calibração do modelo ARs para o período de 1912 a 2002.	200
Figura 82 - Calibração do modelo ARsMediana para o período de 1912 a 2002.	201
Figura 83 - Previsão do modelo ARsMediana para o período de 2003 a 2011.....	201
Figura 84 - Calibração do modelo ARsMédia para o período de 1912 a 2002.....	202
Figura 85 - Previsão do modelo ARsMédia para o período de 2003 a 2012.....	203
Figura 86 - Espectro de potência da precipitação anual padronizada para o estado do Ceara usando transformada de Fourier.	204
Figura 87 - Calibração do modelo FA para o período de 1912 a 2002.	205
Figura 88 - Harmônicos utilizados para a construção do modelo baseado na série de Fourier e suas respectivas projeções.....	206
Figura 89 - Previsão composta pelos quatro harmônicos selecionados.....	207
Figura 90 - Comparação entre as funções de distribuição de probabilidade acumulada previstas pelo modelo FA, a climatologia e a observação para diferentes horizontes de previsão. Da esquerda para a direita e de cima para baixo os seguintes horizontes de previsões	208
Figura 91 - Espectro de potência da média móvel da precipitação de 5 anos da precipitação anual para o estado do Ceara usando transformada de Fourier.....	209
Figura 92 - Calibração do modelo FMédia para o período de 2003 a 2012.	210
Figura 93 - Previsão composta pelos quatro harmônicos selecionados.....	211
Figura 94 - Harmônicos utilizados para a construção do modelo baseado na série de Fourier e suas respectivas projeções.....	212
Figura 95 - Comparação entre as funções de distribuição de probabilidade acumulada previstas pelo modelo FMédia, a climatologia e a observação para diferentes horizontes de previsão. Da esquerda para a direita e de cima para baixo os seguintes horizontes de previsões: 4 anos, 5 anos, 6 anos, 7 anos, 8 anos, 9 anos e 10 anos.....	213
Figura 96 - Espectro de potência da média móvel da precipitação de 5 anos da precipitação anual para o estado do Ceara usando transformada de Fourier.....	214
Figura 97 - Calibração do modelo FMédia para o período de 1912 a 2002.	215
Figura 98 - Previsão composta pelos quatro harmônicos selecionados.....	215
Figura 99 - Harmônicos utilizados para a construção do modelo baseado na série de Fourier e suas respectivas projeções.....	216
Figura 100 - Espectro global de ondeletas para a precipitação no Estado do Ceará. ...	217
Figura 101 - Bandas de variação da transformada em ondeletas e calibração do modelo WARs. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: banda de 2 a 7 anos, banda de banda 8,2 a 16,6 anos, banda 17 a 27,8 anos e resíduo.	219

Figura 102 - Bandas de variação da transformada em ondeletas e projeção do modelo WARs para o período de 2003 a 2012. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: banda de 2 a 7 anos, banda de banda 8,2 a 16,6 anos, banda 17 a 27,8 anos e resíduo.	220
Figura 103 - Previsão do modelo WARs para o período de 2003 a 2012.	221
Figura 104 - Bandas de frequência de ondeletas e a reconstrução segundo os harmônicos de Fourier.	223
Figura 105 - Previsão composta pelos quatro harmônicos selecionados.	224
Figura 106 - Comparação entre as funções de distribuição de probabilidade acumulada previstas pelo modelo FW, a climatologia e a observação para diferentes horizontes de previsão. Da esquerda para a direita e de cima para baixo os seguintes horizontes de previsões.	225
Figura 107-Exemplo do uso da Função Kernel.	236
Figura 108-CORREL espacial dos membros do modelo ECHAM em comparação ao CRU para o trimestre DJF. Membros do 11 ao 34 na sequência numérica da esquerda para direita e de cima para baixo.	239
Figura 109-CORREL espacial dos membros do modelo ECHAM em comparação ao CRU para o trimestre MAM. Membros do 11 ao 34 na sequência numérica da esquerda para direita e de cima para baixo.	240
Figura 110- CORREL espacial dos membros do modelo ECHAM em comparação ao CRU para o trimestre JJA. Membros do 11 ao 34 na sequência numérica da esquerda para direita e de cima para baixo.	241
Figura 111-CORREL espacial dos membros do modelo ECHAM em comparação ao CRU para o trimestre JJA. Membros do 11 ao 34 na sequência numérica da esquerda para direita e de cima para baixo.	242
Figura 112-Climatologia da precipitação média mensal por bacia do Ensemble Médio dos membros do modelo ECHAM em comparação aos dados fornecido pelo CRU no período de 1950 a 1999. Da esquerda para a direita e de cima para baixo as bacias são: Emborcação, Nova Ponte, Itumbiana, São Simão, Furnas, Água Vermelha, Nova Avanhandava, Porto Primavera, Rosana, Itaipú, Santa Cecília, Salto Caxias, Itá, Dona Francisca, Três Marias, Sobradinho, Xingó, Serra da Mesa, Lageado, Tucuruí, Belo Monte, Teles Pires, São Luiz do Tapajós e Santo Antônio.	244
Figura 113-Pesos dos membros do GERVAZp para Furnas para fevereiro de 2005...	245
Figura 114-Série de vazões no posto Furnas, da mediana do GERVAZP e da mediana Método dos vizinhos da mediana do SMAP. Acrescidos das séries da mediana do GERVAZP somada e subtraída de um desvio padrão e das séries da mediana do método em questão somado e subtraído de um desvio padrão.	246
Figura 115-Pesos dos membros do GERVAZp para Furnas para fevereiro de 2005...	247
Figura 116-Pesos dos membros do GERVAZp para Furnas para fevereiro de 2005 usando o método de Kernel.(a) Kernel Epanechnikov e (b) Kernel Epanechnikov- Tri-cúbica.	248
Figura 117-(a) Série observada em FURNAS, mediana dos membros do GERVAZP, mediana dos membros do KERNEL 1 Epanechnikov e Kernel 1 Epanechnikov- Tri-cúbica. (b) Desvio padrão dos membros do GERVAZP e dos métodos de Kernel.	249
Figura 118-(a) Desvios padrões da Função Kernel 1 Epanechnikov e (b) Desvios padrões da Função Kernel 1 Epanechnikov- Tri-cúbica para Furnas em função de	

Lambda (sendo este parâmetro associado a um escalar multiplicado pelo desvio padrão dos membros do Gervazp naquele mês).	250
Figura 119-(a) Desvios padrões e (b) Valores máximos e Mínimos do SMAP, reamostragem e GERVAZp para Furnas.	251
Figura 120-CDF das vazões para FURNAS, CAPIVARA e CANOAS, respectivamente. Para as previsões geradas em fevereiro de 2005 válidas para março de 2005. (figuras a, b e c) e para as previsões geradas em novembro de 2005 válidas para dezembro de 2005 (figuras d, e e f).	254
Figura 121-Coefficiente do modelo PAR para os postos bases para dezembro, janeiro e fevereiro.	256
Figura 122-Coefficiente do modelo PAR para os postos bases para março, abril e maio.	257
Figura 123-Coefficiente do modelo PAR para os postos bases para junho, julho e agosto.	258
Figura 124-Coefficiente do modelo PAR para os postos bases para setembro, outubro e novembro.	259
Figura 125-Valores de EMPA (eixo y) das vazões médias observadas e estimadas (1998-2003) a partir do Modelo PAR definidos para cada Posto Base (eixo x).	261
Figura 126-Valores de coeficiente de NASH (eixo y) das vazões médias observadas e estimadas (1998-2003) a partir do Modelo PAR definidos para cada Posto Base (eixo x).	263
Figura 127-Valores de EMPA (eixo y) das vazões médias observadas e estimadas (1998-2003) a partir do Modelo PARx definidos para cada Posto Base (eixo x).	266
Figura 128-Valores de coeficiente de NASH (eixo y) das vazões médias observadas e estimadas (1998-2003) a partir do Modelo PARx definidos para cada Posto Base (eixo x).	268
Figura 129-Valores dos coeficientes das variáveis usadas para construção do modelo K-vizinhos.	270
Figura 130-Grade utilizada pelos modelos regionais.	275
Figura 131 - Correção de viés via CDF observada x modelada.	283
Figura 132 - Correlação entre as séries de precipitação diária (em mm) do modelo ETA40 sem correção e observada para cada bacia avaliada.	285
Figura 133 - (a) Correlação e (b) Bias entre as séries de precipitação acumulada (em mm) do modelo ETA40 sem correção e observada para cada bacia avaliada.	287
Figura 134 - Correlação entre as séries de precipitação acumulada de 10 dias do modelo ETA-40 e observada para cada bacia avaliada.	288
Figura 135 – BIAS entre as séries de precipitação acumulada 10 dias (em mm) do modelo ETA-40 e observada para cada bacia avaliada.	288
Figura 136 - Função de distribuição de Probabilidades Acumuladas dos eventos de precipitação acumulada de 10 dias (em mm) do modelo ETA 40 sem correção e a observação para as regiões: (a) bacia do Uruguai; (b) Bacia do Grande- Trecho: Jusante Furnas; (c) Bacia do São Francisco –Trecho: Três Marias – Sobradinho e (d) Bacia do Tocantins- trecho: Lajeado – Tucuruí.	289
Figura 137 - Índices estatísticos obtidos pelo modelo ETA 40 para precipitação acumulada de 10 dias para o trimestre DJF para bacia do Grande- Jusante Furnas para o limiar P20. Onde SC é modelo ETA 40 sem correção.	291

Figura 138 - Índice de Heidke. Na primeira linha é mostrado o IH para o trimestre DJF para o limiar P20 para o modelo ETA40 na sequência SC, EMP, GAMA e RAZÃO. Na segunda linha o limiar P80 do trimestre MAM na mesma sequência da primeira linha, ambos para precipitação acumulada de 10 dias.....	292
Figura 139 - H, POD, FAR e BIAS das regiões:(a) bacia do Uruguai; (b) Bacia do Grande- Trecho: Jusante Furnas; (c) Bacia do São Francisco –Trecho: Três Marias – Sobradinho e (d) Bacia do Tocantins- trecho: Lajeado – Tucuruí.	295
Figura 140 - Comparação entre a correlaçãodos modelos ETA-15 e ETA40 para precipitação acumulada nos 10 dias para todas as regiões avaliadas, dada pela subtração do valor absoluto das correlações (ETA15 – ETA40).....	297
Figura 141 - comparação entre a correlaçãodos modelos ETA-15 e BRAMS para precipitação acumulada ao longo dos dias para todas as regiões avaliadas, dada pela subtração do valor absoluto das correlações (ETA15 – BRAMS).	299
Figura 142 - Verificação das previsões de 24 horas para os limiares de: (a) 1 mm; (b) 5 mm e (c)10 mm. O índice de acerto(H) é mostra para cada modelo na seguinte sequência (da esquerda para direita e de cima para baixo): RCKF, RCKU, RGKF, RGKU, WGKF, WGGR, EM e Persistência.	301
Figura 143 - Verificação das previsões de 24 horas para o limiar de 1 mm: (a)FAR; (b)POD e (c)BIAS. Modelo a esquerda WGKF e a direita RGKF.	303
Figura 144 - BIAS das previsões de 24 horas para o limiar de 10 mm. Modelo a esquerda RCKF e a direita RGKF.	304
Figura 145 - Verificação das previsões de 72 horas para os limiares de: (a) 5 mm e (b)10 mm. Cada índice (H, FAR, POD e BIAS) mostra os resultados de cada modelo na seguinte sequência (da esquerda para direita e de cima para baixo): RCKF, RGKF, WGKF, EM, RCKU, RGKU, WGGR e Persistência.	305
Figura 146 - Função de probabilidade de frequência (PDF) de precipitação para a região de Jaguaribana para todos os modelos e para previsão de 24 horas.	306
Figura 147 - Comparação dos modelos após correção estatística para o horizonte de 24h e para o limiar de 1mm para a região de Jaguaribana: (a) RGKU e (b)WGGR.....	307
Figura 148 - Verificação das previsões corrigidas de 24 horas usando os índices : (a)IH, (b)PC, (c)FAR ,(d)F, (e)POD e (f)BIAS para os limiares de 1 mm, 5 mm e 10 mm para a região de Jaguaribara e para os anos de 2009/2010.....	308
Figura 149 - Verificação das previsões corrigidas de 48 horas usando os índices : (a)IH, (b)PC, (c)FAR ,(d)F, (e)POD e (f)BIAS para os limiares de 1 mm, 5 mm e 10 mm para a região de Jaguaribara e para os anos de 2009/2010.....	309
Figura 150 - Verificação das previsões corrigidas de 72 horas usando os índices : (a)IH, (b)PC, (c)FAR ,(d)F, (e)POD e (f)BIAS para os limiares de 1 mm, 5 mm e 10 mm para a região de Jaguaribara e para os anos de 2009/2010.....	310
Figura 152- Critérios de avaliação dos modelos do CMIP5 no período de 1901 a 1999.	337
Figura 153-Climatologia dos Modelos do CMIP5 para século XX (1901-1999) para o Nordeste Setentrional do Brasil: (a) Quantidade de precipitação por mês; (b) Percentual de chuva por mês.	342
Figura 154-Climatologia dos Modelos do CMIP5 para século XX (1901-1999) para a Região Amazônica: (a) Quantidade de precipitação por mês; (b) Percentual de chuva por mês.	345

Figura 155-Climatologia dos Modelos do CMIP5 para século XX (1901-1999) para
bacia da Prata: (a) Quantidade de precipitação por mês; (b) Percentual de chuva por
mês..... 348

Lista de Tabelas

Tabela 1- Interação entre os modelos hidrológicos cadeia de planejamento da operação do SIN e horizontes de previsão dos modelos usados pela ONS.	42
Tabela 2- Potência instalada nas bacias utilizadas no experimento.	73
Tabela 3-Postos Bases utilizados na análise de previsão de vazões. Os valores entre parênteses representam os indicadores de postos fictícios do ONS	74
Tabela 4-Bacias do setor elétrico do Brasil selecionadas para avaliação dos modelos numéricos de previsão do tempo.	75
Tabela 5- Modelos do CMIP5 analisados.....	84
Tabela 6- Valores máximos e mínimos obtidos pelos índices de avaliação da climatologia da precipitação considerando o conjunto de modelos para cada bacia.....	99
Tabela 7-AVAL dos modelos para as bacias do setor elétrico.....	100
Tabela 8 - Anomalias percentuais máximas e mínimas de vazões anuais sinalizadas pelo conjunto de modelos CMIP5 usados no experimento para os períodos de 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098 em relação ao período de 1950 a 1999 para as bacias da ONS.	103
Tabela 9 - Modelos do CMIP5 utilizados para o cenário RCP4.5 e seus respectivos clusteres.	110
Tabela 10 - Tendência identificada para as vazões anuais normalizadas dos modelos do CMIP5 do cenário RCP4.5 mais próximos do centroíde de cada cluster.....	113
Tabela 11 - Anomalias percentuais máximas e mínimas de vazões anuais sinalizadas pelo conjunto de modelos CMIP5 usados no experimento para os períodos de 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098 em relação ao período de 1950 a 1999 para as bacias da ONS.	128
Tabela 12 - Modelos do CMIP5 utilizados para o cenário RCP8.5 e seus respectivos clusteres.	137
Tabela 13 - Tendência segundo o Teste de Man-Kendal-Sen identificada para as vazões anuais padronizadas dos modelos do CMIP5 do cenário RCP8.5 mais próximos do centroíde de cada cluster.....	140
Tabela 14-Modelos do CMIP5, CORREL,, RMSE e AVAL para $\alpha = \alpha_r = 0,5$ para as bacia do Orós, Castanhão, Banabuiú e Pacoti-Riachão.....	153
Tabela 15- Tendência identificada para as vazões anuais padronizadas (desvios padrões por ano) dos modelos do CMIP5 para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 o sistema Jaguaribe-Metropolitano do Ceará.	160
Tabela 16 - Declividade de Sen para 21 dos 192 postos selecionados neste estudo. ...	182
Tabela 17 - Coeficientes de Fourier para os harmônicos selecionados para construção do modelo baseado em Fourier.....	184
Tabela 18 - Razão entre a verossimilhança observada e modelada (ARsMédia).....	203
Tabela 19 - Coeficientes de Fourier para os harmônicos selecionados para construção do modelo baseado em Fourier.....	204
Tabela 20 - Razão entre a verossimilhança observada e modelada (WARs).....	221

Tabela 21-Postos Bases utilizados na análise de previsão de vazões no estudo em desenvolvimento. Os valores entre parênteses representam os indicadores de postos fictícios do ONS.	230
Tabela 22-Índices estatísticos do Ensemble médio dos membros do ECHAM em relação a série históricas das estações do ano do CRU.....	243
Tabela 23- Postos Base onde não foi possível à determinação de regressões estatisticamente significantes ($\alpha=5\%$) a partir do Modelo PAR	260
Tabela 24- Postos Base onde não foi possível à determinação de regressões estatisticamente significantes ($\alpha=5\%$) a partir do Modelo PARx.	265
Tabela 25- Anos utilizados para verificação daa previsões, classificação por tercil(chuvoso-C, normal-N e seco-S), probabilidade de ocorrência de um ano igual ou inferior e vazões observadas.....	270
Tabela 26- Probabilidade de cada tercil para o grupo de meses selecionados, considerando os 30 anos mais próximos das condições do ano previsto com a técnica dos K-vizinhos.....	271
Tabela 27- Probabilidade de cada tercil para o grupo de meses selecionados, considerando os 30 anos mais próximos com a técnica dos K-vizinhos.....	272
Tabela 28-Membros do ensemble regional	274
Tabela 29 - Período de avaliação dos modelos e número de eventos avaliados.	275
Tabela 30 - Tabela de contingência 2 x 2.....	277
Tabela 31 - Pesos usados por critério na aplicação do método multiobjetivo.....	280
Tabela 32 - Classificação das alternativas de correção de viés da precipitação acumulada de 10 dias do modelo ETA 40(EMP/GAMA/RAZÃO/SC) usando o método Electre. 296	
Tabela 33 - Classificação das alternativas (ETA15/ETA40) usando o método Electre II.	298
Tabela 34 - Classificação das alternativas (ETA15/BRAMS/EM) usando o método Electre II.	300
Tabela 35- Modelos do CMIP5 analisados.....	336
Tabela 36-Modelos do CMIP5, CORREL, RMSE_PC, RMSE, AVAL e classificação para $\alpha_c = \alpha_r = 0,5$ para o Nordeste Setentrional do Brasil.	344
Tabela 37-Modelos do CMIP5, CORREL, RMSE_PC, RMSE, AVAL e classificação dos para $\alpha_c = \alpha_r = 0,5$ para a Região Amazônica.....	346
Tabela 38-Modelos do CMIP5, CORREL, RMSE_PC, RMSE, AVAL e classificação para $\alpha_c = \alpha_r = 0,5$ para a bacia da Prata.	349

Lista de Siglas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

BCC - *Beijing Climate Center*

CCCMA - *Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis*

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CMIP3 - *Coupled Model Intercomparison Project Phase 3*

CMIP5 - *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*

CNRM - *Centre National de Recherches Meteorologiques*

COGERH - Companhia de Gestão de Recursos Hídricos

CRU - *Climate Research Unit*

CSIRO - *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization*

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica

ECMWF - *European Centre For Medium Range Weather Forecast*

ENA - Energia Natural Afluyente

ENSO - El Niño-Oscilação Sul

FCF - Função de Custo Futuro

FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

GFS - *Global Forecast System*

GISS - *Goddard Institute for Space Studies*

HadCM - *Met Office Hadley Centre*

INM - *Institute of Numerical Mathematics*

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

IPH - Instituto de Pesquisas Hidráulicas

IPSL - *Institut Pierre-Simon Laplace*

JMA - *Japan Meteorological Agency*

MCGs - Modelos de Circulação Geral

MCRs - Modelos Climáticos Regionais

MGB - Modelo hidrológico de Grandes Bacias

MME - Ministério das Minas e Energia

NEB - Nordeste do Brasil

NCEP - *National Centers for Environmental Prediction*

NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration*

ODP - Oscilação Decadal do Pacífico

OAN - Oscilação do Atlântico

OMM - Organização Mundial de Meteorologia

ONS - Organizador Nacional de Sistemas

PAR - Periódico Autorregressivo

PARX - Periódico Autorregressivo com variáveis exógenas

PB - Postos Base

PNUA - Programa das Nações Unidas para o Ambiente

PSICO - Previsão de Sistemas Convectivos: Observações, Modelagem e Nowcasting

RAMS - *Regional Atmospheric Modeling System*

RCPPs - *Representative Concentration Pathways*

RMF - Região Metropolitana de Fortaleza

RSM - *Regional Spectral Model*

RSS - *Remote Sensing Systems*

SCS - *Soil Conservation Service*

SIN - Sistema Integrado Nacional

SMAP - *Soil Moisture Accounting Procedure*

TO - Transformada em ondeletas

TSM - temperatura da superfície do mar

TW - Transformada de *Wavelets*

WARM - *Wavelet autoregressive model*

WRF - Weather Research & Forecasting

ZCIT - zona de convergência intertropical.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	26
1.1.	Objetivo Geral	28
1.2.	Objetivos específicos	28
1.3.	Escopo	29
1.4.	Contribuição científica e técnica	29
1.5.	Estruturação	30
2.	A PROBLEMÁTICA DAS MÚLTIPLAS ESCALAS TEMPORAIS	32
2.1.	A problemática do clima e as múltiplas escalas de planejamento aplicadas ao Ceará	32
2.1.1.	Variabilidade das séries hidrológicas do Ceará	33
2.1.2.	A operação de reservatórios como ferramenta de planejamento e outorga sobre o Ceará	34
2.1.3.	Variabilidade de baixa frequência e outorga	37
2.1.4.	Mudanças Climáticas e Variabilidade climática	38
2.1.5.	Importância das múltiplas escalas temporais no planejamento no Ceará... ..	39
2.2.	Setor elétrico e as múltiplas escalas de planejamento	40
2.2.1.	Modelos utilizados no planejamento e programação da operação do Sistema Interligado Nacional	42
2.2.2.	Importância das múltiplas escalas temporais no planejamento do SIN.....	44
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	46
3.1.	Caracterização climática e aspectos sobre variabilidade climática	46
3.1.1.	Variabilidade e mudança climática na escala global	46
3.1.2.	Caracterizações da variabilidade climática regional nas escalas de tempo para o Brasil	47
3.1.3.	Variabilidade decadal da precipitação	48
3.2.	Diferentes escalas de previsão	51
3.2.1.	Variabilidade e mudanças climáticas	51
3.2.2.	Previsão sazonal ou previsão de curto prazo	55
3.2.3.	Previsão do tempo ou previsão de curtíssimo prazo	58
4.	LOCAL DE APLICAÇÃO	62
4.1.	Ceará: Sistema Jaguaribe-Metropolitano	62
4.2.	Setor Elétrico brasileiro	64

4.2.1. Caracterização das regiões que compõem o SIN	65
4.2.2. O processo de planejamento no setor elétrico	67
5. ESTRATÉGIA METODOLÓGICA DAS MÚLTIPLAS ESCALAS TEMPORAIS	69
5.1. Obtenção dos dados	70
5.2. Delimitação espacial do problema das múltiplas escalas temporais	71
5.2.1. Setor elétrico	71
5.2.2. Ceará- sistema Jaguaribe-Metropolitano	76
5.3. Estudo da Variabilidade hidrológica	78
5.4. Previsão em multi-escalas	79
5.4.1. Projeções de longo prazo	79
5.4.2. Projeções de médio prazo	79
5.4.3. Previsão de Curto prazo	80
5.4.4. Previsão de curtíssimo prazo	82
6. METODOLOGIA: ESCALA DE LONGO PRAZO	83
6.1. Dados observacionais	83
6.2. Modelos do CMIP5	84
6.3. Critérios de Avaliação do Desempenho dos modelos do IPCC quanto à representação da sazonalidade	85
6.4. O modelo hidrológico SMAP	87
6.5. Correção estatística das precipitações via Função de distribuição de probabilidade gama	88
6.6. Modelo de Estimativa de Evapotranspiração Penman-Monteith	90
6.6. Análise das Projeções	92
6.6.1. Cálculo das Anomalias Médias Anuais	92
6.6.2. Análise de tendência das precipitações anuais	92
6.6.3. Seleção dos Agrupamentos (<i>Clusteres</i>)	97
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES: ESCALA DE LONGO PRAZO - SIN	98
7.1. Validação dos dados do CRU	98
7.2. Avaliação da representação da sazonalidade da precipitação	99
7.3. Cenário RCP 4.5	101
7.3.1. Análise das Anomalias nas médias Anuais	101
7.3.2. Análise de agrupamento	109
7.4. Cenário RCP8.5	126

7.4.1. Análise das Anomalias nas médias Anuais.....	126
7.4.2. Análise de Agrupamento.....	135
8. RESULTADOS E DISCUSSÕES: ESCALA DE LONGO PRAZO – CEARÁ .	153
8.1. Avaliação dos Modelos do CMIP5	153
8.2. Anomalia das médias anuais de vazões.....	156
8.2.1. Cenário RCP4.5	156
8.2.2. Cenário RCP8.5	157
8.3. Análise de tendência.....	159
8.3.1. Análise de tendência do cenário RCP4.5	160
8.3.2. Análise de tendência do cenário RCP8.5	164
9. METODOLOGIA- ESCALA DE MÉDIO PRAZO:	168
9.1. Dados Utilizados	168
9.2. Modelos auto regressivos	168
9.3. O modelo baseado na série de <i>Fourier</i>	170
9.3.1. Transforma discreta de Fourier	170
9.3.2. A geração do modelo baseado na série de Fourier.....	172
9.4. O modelo baseado na série de <i>Ondeletas</i>	175
9.5. Modelos Baseado nas transformadas de Fourier e ondeletas	177
9.6. Métricas para avaliação de desempenho dos modelos	177
9.6.1. Estimador de máxima verossimilhança.....	177
10. RESULTADOS E DISCUSSÕES: ESCALA DE MÉDIO PRAZO- SIN	180
10.1. Análise de tendência usando métodos clássicos.....	180
10.2. Modelo baseado na série de Fourier.....	184
10.3. Análise da transformada em ondeletas	191
10.4. Fourier-ondeletas (FW)	198
11. RESULTADOS E DISCUSSÕES: ESCALA DE MÉDIO PRAZO- CEARÁ....	200
11.1. Modelo auto regressivo (ARs)	200
11.2. Modelo auto regressivo da mediana móvel de 5 anos (ARsMediana)	200
11.3. Modelo auto regressivo da média móvel de 5 anos (ARMédia)	202
11.4. Modelo baseado na transformada de <i>Fourier</i> (FA).....	203
11.5. Modelo baseado na série de Fourier das médias móveis (FMédia).....	209
11.6. FMediana.....	214
11.7. Modelo auto regressivo baseado na transformada de ondeletas (WARs)....	217

11.8. Modelo baseado nas transformadas de Fourier e ondeletas (FW).....	221
12. METODOLOGIA: ESCALA DE CURTO PRAZO	226
12.1. Métodos Estocásticos de Previsão de Vazões Mensais	226
12.1.1 Modelo periódico autorregressivos	226
12.1.2. Uso de Índices Climáticos em Modelos Estatísticos de Previsão de Vazões Mensais - PARX	229
12.1.3. K-vizinhos	230
12.2. Método de Previsão Acoplada.....	231
12.3. Modelo Estocástico GERVAZP e integração entre modelos hidrológicos e estocásticos	232
13. RESULTADOS E DISCUSSÕES: ESCALA DE CURTO PRAZO - SIN.....	239
13.1. Avaliação do modelo ECHAM 4.5 para precipitação	239
13.2. Reamostragem dos membros do GERVAZP	245
13.2.1. Método dos vizinhos da mediana do SMAP	245
13.2.2. Métodos dos vizinhos de todos os membros do SMAP	246
13.2.3. Método de Kernel	247
13.2.4. Método de reamostragem do Gervazp pelo SMAP	251
13.2.5. CDF dos Métodos de reamostragem.....	252
13.3. Modelo periódico autorregressivo	255
13.3.1. Calibração do modelo	255
13.3.2. Previsão de vazões.....	261
13.4. Periódico autorregressivo com variáveis exógenas (PARX).....	264
13.4.1. Calibração do modelo	264
13.4.2. Previsão de vazões.....	266
14. RESULTADOS E DISCUSSÕES: ESCALA DE CURTO PRAZO-CEARÁ.....	269
14.1. K-vizinhos	269
15. METODOLOGIA: ESCALA CURTISSIMO PRAZO	273
15.1. Características dos modelos regionais utilizados no SIN.....	273
15.2. Sistema de previsão numérica do tempo utilizado no Ceará.....	273
15.3. Período avaliado e dados de observação do modelo usados no SIN.....	275
15.4. Avaliação usando limiares.....	276
15.4.1 Índices Estatísticos	277
15.5. Avaliando o comportamento da série de precipitações modelada	279
15.5.1 Índices estatísticos	279

15.6. Análise Multiobjetivo.....	280
15.6.1 Electre	280
15.7. Proposição de Correções Estatísticas	282
15.7.1 Correção via CDF empírica (EMP)	282
15.7.2 Correção via CDF Gama (GAMA).....	283
15.7.3 Correção via razão precipitação observada e modelada por estação do ano (RAZÃO)	284
16. RESULTADOS: ESCALA DE CURTISSIMO PRAZO - SIN	285
16.1. Análise da Previsão diária do modelo ETA40	285
16.2. Análise da Previsão Acumulada do modelo ETA40.....	286
16.3. Comparação entre as metodologias de correção de viés para o modelo ETA40	290
16.4. Comparação entre os modelos ETA40 e ETA15	297
16.5. Comparação entre os modelos ETA15 e BRAMS	298
17. RESULTADOS: ESCALA DE CURTISSIMO PRAZO - CEARÁ	301
18. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	311
18.1. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES: ESCALA DE LONGO PRAZO.....	314
18.1.1. Setor elétrico.....	314
18.1.2. Ceará.....	314
18.2. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES: ESCALA DE MÉDIO PRAZO.....	315
18.2.1. Setor elétrico.....	316
18.2.2. Ceará.....	316
18.3. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES: ESCALA DE CURTO PRAZO	317
18.3.1. Setor elétrico.....	317
18.3.2. Ceará.....	319
18.4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES- ESCALA DE CURTISSIMO PRAZO .	319
18.4.1Setor elétrico.....	319
18.4.2Ceará.....	321
19. REFERÊNCIAS.....	322
ANEXO	334

1. INTRODUÇÃO

A gestão dos recursos hídricos é influenciada pela variabilidade de fenômenos meteorológicos, especialmente no que concerne à distribuição temporal e espacial da chuva e conseqüentemente do regime de vazões. Diante disso, existe uma demanda pelo Estado e pelas empresas privadas de informações climáticas para tomada de decisão ao nível nacional/local.

A tomada de decisão em sistemas complexos é, de modo geral, uma das mais difíceis tarefas enfrentadas pelos gestores, pois quase sempre tais decisões precisam atender múltiplos objetivos, e frequentemente seus impactos não podem ser previamente identificados (GOMES et al., 2006).

As decisões podem acarretar abrangência bem diversa. Em sistemas hídricos complexos, as conseqüências advindas das decisões podem apresentar impactos:

- a) Imediatos;
- b) De curto prazo;
- c) De médio prazo;
- d) De longo prazo;
- e) Multitemporal.

Em sistema em que prevalece o caráter multitemporal no processo decisório, as estratégias adotadas precisam considerar o risco e a incerteza nas múltiplas escalas temporais e espaciais, e as mesmas precisam conectar-se mutuamente. Nesse sentido, estratégias desse tipo exigem uma visão sistêmica, a seleção de alternativas ou otimização de opções em busca de minimização de determinados riscos.

Segundo Porto et al.(1997), os problemas decisórios podem ser classificados em três grandes níveis hierárquicos de planejamento: planejamento estratégico, planejamento e controle gerencial e controle operacional. Conforme mostra a Figura 1.

No planejamento estratégico encontra-se a política de longo prazo, no Brasil um dos exemplos dessa política são os “Planos Diretores de Recursos Hídricos”. Esse nível de planejamento tem horizonte temporal típico de três anos a algumas décadas, em virtude disso necessita que sejam inseridos, em caráter estratégico, a variabilidade do clima e as mudanças climáticas.

O controle gerencial tem por objetivo a destinação e utilização de recursos da forma mais eficaz possível visando à obtenção de metas e resultados de médio prazo (PORTO et al., 1997). Esse nível de planejamento tem horizonte temporal típico de alguns meses a alguns anos, podendo ser atribuído a essa etapa de planejamento o planejamento da operação de reservatórios, planejamento da operação de redes hidrológicas e de monitoramento, orçamentos anuais etc. Nesse sentido, previsões sazonais (curto prazo) e de tempo (curtíssimo prazo) de vazões de qualidade podem fortalecer o processo decisório nesta escala.

O controle operacional refere-se a atividades repetitivas e de curto prazo, de algumas horas a alguns meses. Como por exemplo, a operação de sistemas de recursos hídricos em tempo real e também a operação de redes hidrológicas ou monitoramento. O fortalecimento do sistema de suporte a decisão nesta fase pode ser o uso de informações observacionais de precipitação, a modelagem de tempo e ainda previsões sazonais de precipitações e vazões.

Figura 1- Níveis hierárquicos do planejamento e escalas temporais



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Portanto, a definição da política ótima de planejamento de sistema hídrico seria o atendimento da demanda hídrica para cada intervalo de tempo do planejamento, ao mínimo custo, preservando a confiabilidade da operação do mesmo.

1.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo contribuir para a inclusão da informação meteorológica ao processo de planejamento e gestão de recursos hídricos por meio da identificação e desenvolvimento de modelos de previsão, projeção e cenarização vazões e precipitações e vazões médias e extremas aos reservatórios do estado do Ceará e setor elétrico brasileiro.

1.2. Objetivos específicos

- Pesquisar e propor mecanismos de incorporação da informação meteorológica no processo de tomada de decisão para a alocação de água;
- Desenvolver metodologias que integre as informações meteorológicas oriundas das diversas escalas temporais aplicadas a sistemas hídricos;
- Analisar a incerteza associada a diferentes escalas temporais;
- Analisar as projeções dos modelos globais do CMIP5 (publicados pelo quarto relatório do IPCC-AR5) para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 para o século XXI, buscando identificar tendências nas variações interanuais nas bacias que compõe o setor elétrico do Brasil e Ceará;
- Analisar as tendências e os padrões de variação das séries históricas de vazões naturalizadas médias mensais, disponibilizadas pelo ONS;
- Analisar a variabilidade climática da série de precipitação para o Estado do Ceará;
- Desenvolver metodologias de projeções decadais para o setor elétrico e Ceará;
- Desenvolver metodologias de previsão de vazões sazonais aos aproveitamentos hidroelétricos do Sistema Interligado Nacional (SIN) a partir de modelos estatísticos que levam em consideração a manutenção da estrutura espacial dos reservatórios e suas correlações com aspectos climáticos visando, assim, a contribuir para o aprimoramento operação sistema hidrelétrico brasileiro.
- Desenvolver modelo de previsão de vazão simultânea para todos os locais SIN através de modelos Periódicos Autorregressivos (PAR) e periódicos Autorregressivos com

variáveis exógenas (PARX) utilizando índices climáticos, preservando a estrutura espacial através da correlação dos resíduos preditivos;

- Apresentar um sistema de verificação de desempenho da previsão numérica do tempo via modelos regionais para o Setor elétrico Brasileiro e Ceará, identificar as regiões de maior e menor previsibilidade.

1.3. Escopo

Para realização deste trabalho, foram consideradas quatro escalas temporais: curtíssimo prazo (até 1 mês), curto prazo (até um ano) e médio(1 a 10 anos) e longo prazo(até 30 anos). Foram usados modelos de base física e estatísticos para a escala sazonal/anual (até 1 ano). Outro conjunto de modelos foi usado para as escalas plurianuais (1 a 10 anos e até 30 anos), estes consideram os padrões de variabilidade climática e/ou os padrões de mudanças climáticas com base nos modelos globais do IPCC-AR5.

1.4. Contribuição científica e técnica

Este trabalho instrumentaliza um sistema gerenciamento de risco climático que contempla diversas escalas temporais e espaciais, possibilitando aos gestores uma quantificação do risco para possíveis alocações de água e geração de energia elétrica no Brasil.

Previsões, projeções e/ou cenarizações hidrológicas em múltiplas escalas temporais podem afetar o desempenho da operação dos sistemas aumentando benefícios e confiabilidade e reduzindo custos.

O sistema brasileiro de geração de energia elétrica pode beneficiar-se continuamente com aprimoramento dos modelos de previsão hidrológica. Considerando influência direta que o setor hidrelétrico possui em diversos segmentos sociais, isto pode indicar uma redução significativa dos impactos sofridos pela iniciativa pública e privada. Visto que, uma melhor informação tornar as estratégias de adaptação a certos cenários ou eventos mais robustos.

Além disso, há a possibilidade de quantificação e entendimento das diversas incertezas que se propagam ao longo do sistema de multiescala, o que indicaria a margem de risco assumida na tomada de decisões. Permitindo aos gestores a adoção de estratégias robustas, já que artificializar a redução de incertezas pode induzir decisões

que levem a grandes arrependimentos. Estratégias robustas precisam considerar as incertezas no nível atual de conhecimento.

Normalmente, os sistemas de recursos hídricos são projetados e operados a partir da hipótese da estacionariedade estatística das séries históricas. Entretanto, esta suposição pode ser inválida no contexto da variabilidade climática decadal e mudanças no uso e ocupação da terra, destacando ainda as mudanças climáticas. A hipótese da estacionariedade das séries deve ser verificada e os sistemas de recursos hídricos onde não for válida devem ter avaliados os possíveis impactos oriundos da não-estacionariedade. Devido essa não estacionariedade há uma dificuldade bastante relevante de cenarização das projeções com escala de 1 ano a 10 anos, já que essa escala temporal carrega sinais tanto de variabilidade decadal e mudanças climáticas (ALVES et al., 2013). Este trabalho tenta unir os dois sinais e tornar as projeções nessa escala mais eficiente.

1.5.Estruturação

A apresentação deste trabalho está estruturada em 19 capítulos. Este capítulo apresenta, inicialmente, uma introdução ao tema da pesquisa, os objetivos deste estudo e a contribuição científica.

O segundo capítulo apresenta uma contextualização da problemática associada às diferentes escalas temporais para o Ceará e para o setor elétrico.

O terceiro capítulo mostra a base conceitual e trata da evolução da temática das diferentes escalas espaciais e apresenta-se a necessidade da inserção da previsão climática na alocação de água e no planejamento do setor elétrico.

Em seguida, discorre-se sobre a área escolhida para aplicação do estudo, apresentando a importância e a caracterização da mesma.

No quinto capítulo apresenta-se a síntese das metodologias usadas para cada escala temporal do estudo.

O sexto capítulo apresenta a metodologia aplicada para análise do impacto das mudanças climáticas nos setor elétrico e Ceará. Enquanto os dois capítulos seguintes mostram os resultados para o setor elétrico e Ceará para essa escala temporal, respectivamente.

O capítulo nove mostra as metodologias aplicadas para identificação da variabilidade das séries temporais e propõe algumas metodologias de projeções para até dez anos. Enquanto os dois capítulos seguintes mostram os resultados para o setor elétrico e Ceará para essa escala temporal, respectivamente.

O capítulo 12 mostra as metodologias utilizadas para escala de previsão sazonal. Enquanto nos dois capítulos seguintes expõem-se os resultados para o setor elétrico e Ceará para essa escala temporal, respectivamente.

O capítulo 15 mostra as metodologias adotadas para escala de previsão de curtíssimo prazo. Enquanto os dois capítulos seguintes mostram os resultados para o setor elétrico e Ceará para essa escala espacial, respectivamente.

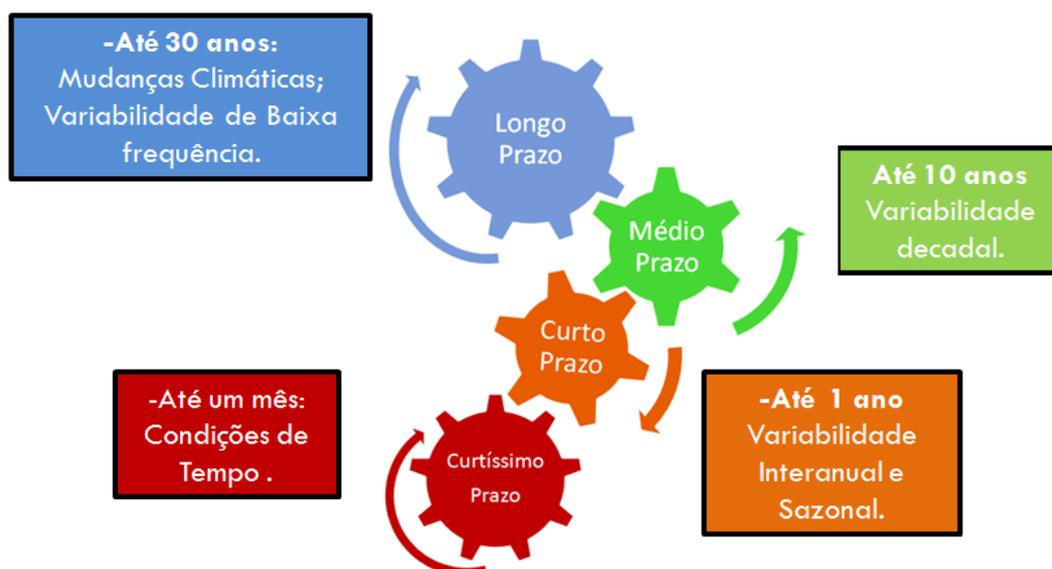
No capítulo 18 realizam-se as conclusões, recomendações e as possíveis aplicações do estudo para todas as escalas temporais.

2. A PROBLEMÁTICA DAS MÚLTIPLAS ESCALAS TEMPORAIS

Este capítulo apresenta uma discussão a respeito da problemática dos diversos modos de variação do clima aplicados ao setor elétrico do Brasil e ao Ceará, adotando os horizontes temporais e os condicionantes de estado da atmosfera da Figura 2.

A variabilidade do clima em múltiplas escalas temporais (longo, médio, curto e curtíssimo prazo) pode condicionar o risco associado à ocorrência de eventos extremos hidrológicos (cheias e secas) para um local ou região. A possibilidade de quantificação dos riscos permite que decisões possam ser tomadas para que os impactos de tais eventos sejam minimizados, reduzindo assim o grau de vulnerabilidade de uma determinada região.

Figura 2- As escalas temporais de planejamento e o clima.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

2.1.A problemática do clima e as múltiplas escalas de planejamento aplicadas ao Ceará

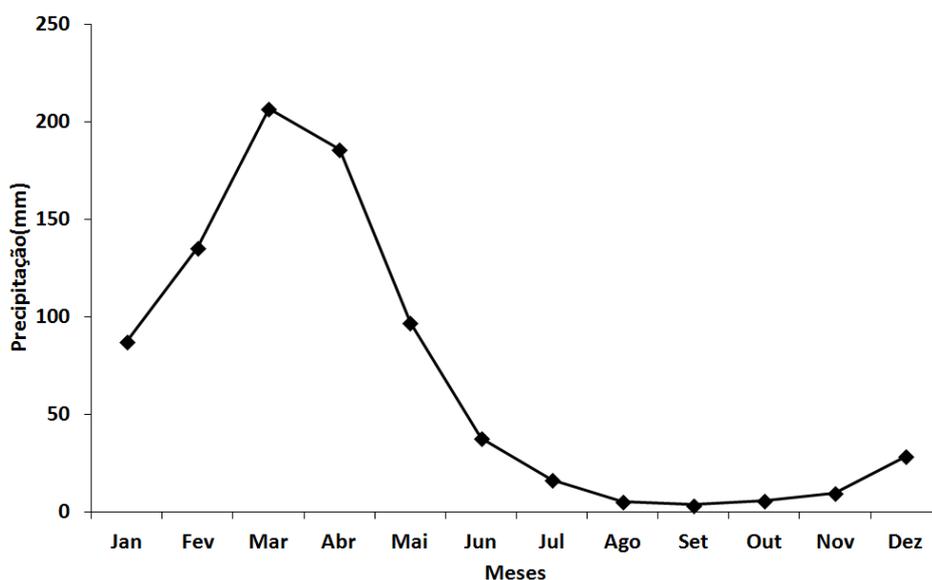
Esta seção relaciona as diferentes escalas temporais à problemática associada ao planejamento em recursos hídricos no Estado do Ceará.

2.1.1. Variabilidade das séries hidrológicas do Ceará

O Nordeste do Brasil (NEB) apresenta clima semiárido com grande variabilidade temporal e espacial de chuvas. O Ceará, historicamente, é marcado por grandes prejuízos associados a eventos climáticos extremos, como cheias. Pequenas flutuações, associadas às condições climáticas, provocam significativos impactos sociais e econômicos sobre a região (SOUZA FILHO e MOURA, 2006). Desta forma, identificar padrões de variação ou/e melhorar as previsões climáticas é importante, já que impacta os recursos hídricos, agricultura e outras áreas relevantes.

A precipitação no Ceará possui grande variabilidade sazonal, onde 75% dos totais das chuvas ocorrem em quatro meses (fevereiro, março, abril e maio) e uma quase total ausência de precipitação no segundo semestre, conforme mostra a Figura 3. Esta característica é governada em grande parte pela migração norte/sul da zona de convergência intertropical (ZCIT) ao longo do ano.

Figura 3-Climatologia da precipitação média sobre o Ceará no período de 1912 a 2013 a partir da base de pluviômetros da FUNCEME e SUDENE.



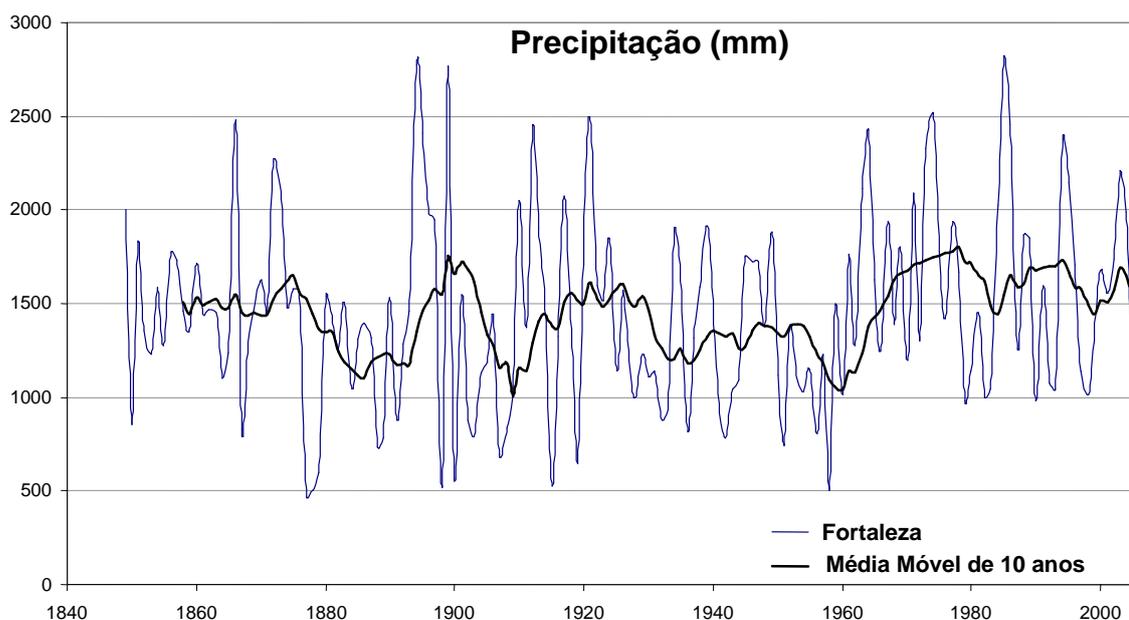
Fonte: Elaborada pelo Autor.

A série histórica de precipitações de Fortaleza-CE, mostrada na Figura 4, sinaliza significativa variabilidade hidrológica decadal, com períodos de 10 anos com média superior a 1800 mm, enquanto em outros intervalos a média móvel atinge valores de aproximadamente 1000 mm. Essa característica mostra um possível modo de

variação de baixa frequência, já que esse comportamento é recorrente ao longo da série histórica. Além disso, há uma variabilidade de alta frequência identificada pela sequência de um ano muito seco seguido por um ano muito chuvoso, conforme mostrado nos anos de 1888 e 1889, 1914 e 1915 e outros períodos de dois anos.

Incertezas inerentes do comportamento aleatório da disponibilidade hídrica natural são de fato uma das maiores dificuldades com que o processo de gestão de recursos hídricos se defronta em qualquer lugar onde isto ocorre. Tais incertezas não podem ser reduzidas, mas podem ser estudadas através de metodologias apropriadas, agregando informação valiosa ao planejamento de recursos hídricos.

Figura 4-Precipitação média anual em Fortaleza-CE e a média móvel de 10 anos de precipitação para o período de 1849 a 2006.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

2.1.2. A operação de reservatórios como ferramenta de planejamento e outorga sobre o Ceará

Devido a essa variabilidade o Estado do Ceará criou uma grande rede reservatórios espalhada por todo território. Um dos objetivos dessa construção é o armazenamento temporário das águas fluviais, uma medida de controle do escoamento

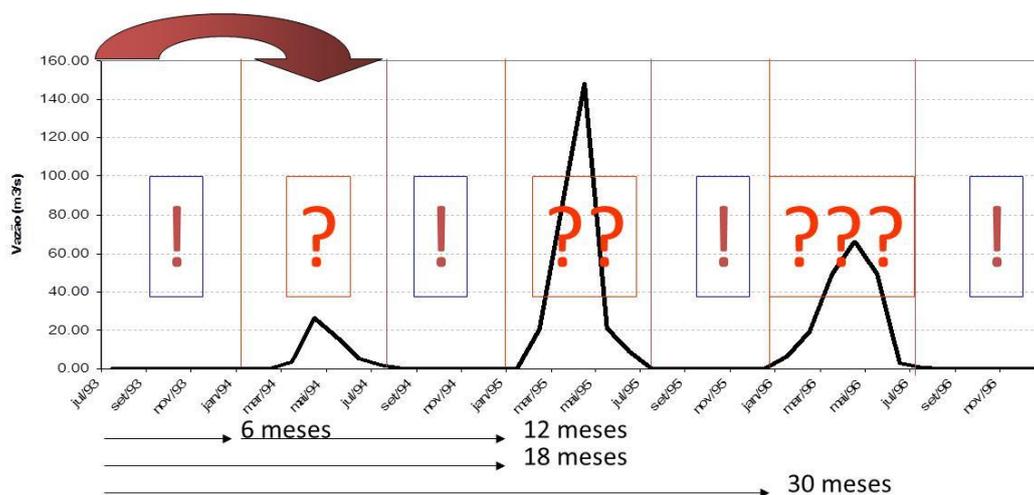
superficial, que contribui para o retardo e amortecimento dos picos de vazão, de forma a minimizar os problemas das enchentes, à jusante da barragem. Reduzindo, portanto, nos períodos chuvosos da região, a ocorrência de enchentes. Além disso, permite o transporte temporal sazonal de água da estação chuvosa para a estação seca e ainda, o transporte de água entre anos úmidos e secos.

Nos períodos de estiagem, o armazenamento da água em reservatórios possibilita a disponibilidade de água para os períodos de seca. Em virtude desse controle de volume de água o Ceará adota como instrumento de gestão a outorga pelo uso da água e alocação negociada. A alocação sazonal da água é realizada por um processo de discussão pública, tendo em conta seus múltiplos usos e os conflitos envolvidos.

O instrumento de outorga é necessário para o gerenciamento dos recursos hídricos, pois permite ao administrador realizar o controle quali-quantitativo da água, e ao usuário a necessária autorização para implementação de seus empreendimentos produtivos. É, também, um instrumento importante para minimizar os conflitos entre os diversos setores usuários e evitar impactos ambientais negativos aos corpos hídricos.

Atualmente, para alocação e operação de hidrossistemas a Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) usa simulações de esvaziamento de reservatórios, que consideram vazões zero e horizontes de planejamento entre 6 e 18 meses (RIBEIRO, 2011). A Figura 5 apresenta graficamente como se comporta o regime de vazões no Ceará, que nas estações secas tem-se a certeza dos escoamentos zero e nas estações úmidas tem-se a incerteza quanto à ocorrência de vazões.

Figura 5-Horizonte de operação do estudo de alocação de água.



Fonte: Ribeiro(2011).

A COGERH reconhece que a consideração de vazão nula nas simulações é um fator que restringe o uso da água.

A consideração de aporte hídrico nulo nas simulações, apesar de conferir uma margem de segurança na utilização da água, propiciando saldos positivos em termos de reserva hídrica, pode ser um fator de restrição de uso, sobretudo no setor agrícola, tornando importante no futuro a consideração de aspectos probabilísticos climáticos nas simulações, que resultaria em uma alocação menos conservadora. (COGERH, 2010).

Neste caso, a informação climática pode subsidiar o desenvolvimento de uma base metodológica para aperfeiçoar o modelo de simulação de reservatórios, considerando aporte não nulo.

Neste sentido, existe uma discussão em torno da operação de comportas de reservatórios em tempo real ou curtíssimo prazo e o volume de espera entre os períodos secos e úmidos do ano. Qual o estoque de água que deve ser mantido para períodos secos com vistas à garantia de abastecimento e a possibilidade de utilização do excedente hídrico?

A previsão climática pode servir como ferramenta de análise de risco e os autores Souza Filho e Porto (2008) citam que em anos de maior escassez é necessário o racionamento da outorga. A estratégia adotada pode levar a situações críticas, pois, uma quantidade de outorga maior que a oferta induz a não efetividade do sistema de licença. A literatura menciona pelo menos dois critérios de racionamento de outorga em anos críticos (KELMAN et al., 2000): o primeiro critério é o do racionamento proporcional

para todos os usuários; o outro critério baseia-se em uma lista de prioridades que pode ser firmado na ordem cronológica de obtenção da permissão para uso ou na importância do uso.

Por outro lado, em anos úmidos há um aumento da vulnerabilidade a eventos de cheias e, caso o sistema seja operado considerando o cenário mais pessimista (como por exemplo, vazão zero), pode haver perda de benefícios que poderiam ter sido alcançados caso a vazão outorgada fosse maior.

As regras de operação de curto e curtíssimo prazo tem maior influência da aversão a risco dos gestores e usuários dos recursos hídricos, o que pode levar a diferenciação entre a estratégia de operação de curto e longo prazo. As estratégias de curto e curtíssimo prazo utilizam salvaguardas com volumes de alerta e níveis de racionamento que reduzem a possibilidade de colapso total do sistema, enquanto as regras de operação de longo prazo procuram ter números de referência para a disponibilidade hídrica não tendo estas salvaguardas bem detalhadas. Esta diferenciação de abordagem pode produzir diferenças significativas entre a expectativa de garantias (obtida pela operação de longo prazo) e as garantias obtidas pelo sistema (obtidas pela operação de curto prazo).

2.1.3. Variabilidade de baixa frequência e outorga

Campos e Studart (2003) comentam que duas questões são relevantes em se tratando de outorga: como alocar a água em épocas de escassez e o máximo outorgável (volume ou vazão, ou ambos). A alternância entre décadas secas e úmidas mostradas na

Figura 4 indica que o valor máximo outorgável para longos períodos não deve ser estático, conforme sugere atualmente estratégias baseadas no conceito de estacionariedade.

Os critérios de outorga podem ser divididos em duas famílias: i) critério da vazão de referência, onde se estabelece um valor de vazão sazonal ou anual e outorga-se até este valor (Q7,10 e Q90 são exemplos de vazões de referência utilizados na legislação brasileira); ii) critério da quantidade de falhas predeterminada, neste caso define-se uma prioridade de uso e em períodos de racionamento não disporão de água os

usos ou usuários com prioridades mais baixas. O primeiro método controla o nível de falhas totais do sistema, mantendo-o em níveis aceitáveis. O segundo garante falhas menores para usos mais nobres. Um critério que una os dois poderia ser pensado.

A variabilidade climática de alta e baixa frequência pode introduzir nos sistemas hídricos a alternância de anos consecutivos de cheia e de seca num sistema hídrico, está constitui uma das principais preocupações da escala de planejamento de 1 a 10 anos (Médio Prazo). No caso de anos consecutivos com seca o racionamento de água deve ser intensificado e haverá impacto direto na concessão de permissão para o uso da água. Já no caso de anos consecutivos chuvosos há um aumento no número de áreas inundadas e há a possibilidade que alguns usos sejam beneficiados.

Nesse sentido, é necessário reformular o sistema de outorga e rever as garantias de modo que a variabilidade no clima possa ser inserir no planejamento. Nesse aspecto, o uso de informações climáticas pode reduzir os riscos e permitir uma margem maior de flexibilidade ao sistema de gestão implantado, sobretudo no tocante às outorgas emitidas.

2.1.4. Mudanças Climáticas e Variabilidade climática

O clima de uma região é definido, fundamentalmente, devido à atuação simultânea de diversos sistemas atmosféricos de várias escalas e à dinâmica de suas interações. Estes podem variar com as características fisiográficas da região, assim como, pelos padrões anômalos de grande escala de circulação atmosférica global associada ao fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENSO) e ao dipolo do Atlântico, o que modifica frequência, distribuição espacial e intensidade desses sistemas.

As mudanças climáticas seriam, portanto, alterações na variabilidade desses diversos fenômenos atmosféricos tanto em frequência quanto em intensidade. Essas modificações no clima podem levar a eventos extremos mais severos e mais frequentes, como por exemplo, secas severas, tempestades intensas, furacões, cheias, ondas de calor etc.

Para o horizonte de décadas (longo prazo) as mudanças e variabilidade climática de baixa frequência inserem uma discussão no processo decisório a respeito do planejamento baseado na estacionariedade das séries temporais. Visto que, o dimensionamento de obras hidráulicas e o aproveitamento dos recursos hídricos são projetados e operados a partir da hipótese da estacionariedade estatística de séries

históricas. Entretanto, essa suposição pode ser invalidada pelas mudanças climáticas e variabilidade climática de baixa frequência e mudanças no uso do solo.

A não-estacionariedade das séries históricas requer, portanto, estratégias de adaptação e gestão de risco mais robustas. Essas medidas podem ser do tipo estrutural e não estrutural. As medidas estruturais estão relacionadas com investimento em infraestrutura para suportar os eventos extremos, como diques, barragens, canalização entre outros. As medidas não estruturais são as que condicionam os usuários a adaptar-se ao sistema usando como principal suporte instrumento de gestão, preparando e reduzindo os eventos adversos através de medidas como regras de operação do sistema, realocação, mudanças nos termos de garantia e redução dos valores outorgado.

A mudança climática afeta a função e operação de infraestrutura hídrica existente, bem como práticas de gestão da água (IPCC, 2007a). As implicações da variabilidade climática e as alterações climáticas precisam ser integradas na política da água corrente e nos processos de tomada de decisões.

A falta de investimento em infraestrutura hídrica pode impactar diretamente na garantia e gerar conflitos de destinação de uso. A implantação de novos usos e as permissões de longo prazo para o uso da água deve ser repensada com níveis de garantia que incluam as mudanças climáticas e variabilidade de baixa frequência para que possa ser reduzida a vulnerabilidade dos sistemas hídricos.

Hoje o Brasil enfrenta um déficit de adaptação à variabilidade hidrológica existente (natural e decorrente de interferências nas bacias hidrográficas) que deve ser enfrentado simultaneamente aos novos desafios representados pelas mudanças climáticas. Ou seja, o sistema de gerenciamento de recursos hídricos não se encontra plenamente adaptado às condições climáticas e hidrológicas atuais, carecendo, entre outros, de investimentos em monitoramento, modelagem, sistemas de alerta, infraestrutura de defesa e resposta a eventos extremos e fortalecimento institucional.

2.1.5. Importância das múltiplas escalas temporais no planejamento no Ceará

A disponibilidade hídrica de uma bacia para os diversos usos é condicionada pela regra de operação do hidrossistema. Esta regra de operação é associada a determinado horizonte temporal de planejamento (curtíssimo, curto, médio e longo prazo).

As várias possibilidades de decisões mostradas indicam que há um risco ao operador e usuários do sistema, e a estratégia adotada pelos gestores podem levar a arrependimento caso as diferentes escalas temporais e espaciais de planejamento não sejam consideradas.

Nesse sentido, previsões, projeções e/ou cenarizações de melhor qualidade podem otimizar o processo de operação de reservatório. Além disso, podem melhorar o processo de alocação de água e tornar a garantia associada à outorga mais confiável.

2.2. Setor elétrico e as múltiplas escalas de planejamento

A matriz energética brasileira possui grande contribuição de energia proveniente de hidrelétricas. A capacidade de geração e distribuição de energia elétrica do Brasil é diretamente influenciada pela variabilidade hidrológicas das vazões e a interconexão dos aproveitamentos hidroelétricos, portanto as previsões e/ou projeções e incertezas possuem papel fundamental no planejamento da operação do sistema.

Em geral, previsões hidrológica de melhor qualidade podem afetar o desempenho da operação do sistema, otimizando o benefício e aumentando a confiabilidade, isto leva a uma redução dos custos de operação do mesmo. Dessa forma, os aperfeiçoamentos das previsões e/ou projeções para a obtenção dos cenários hidrológicos contribuem para a melhoria do processo de planejamento do Sistema Interligado Nacional (SIN).

O processo de planejamento do setor elétrico é composto, dentre outras atividades, por simulações/otimizações computacionais que cruzam informações sobre a oferta e demanda. Nestas simulações se busca localizar e mensurar necessidades dos usuários, bem como ajuste de cronogramas de investimentos em infraestrutura hídrica, entre outros. Tais ajustes são realizados seguindo critérios que visam, principalmente, a segurança do suprimento e a minimização de custos de investimento e operação. Em resumo, há uma solução de compromisso entre o custo da energia e a qualidade do atendimento, sendo necessário, portanto, que estes dois aspectos devam respeitar critérios estabelecidos.

O SIN é caracterizado por ser um sistema hidrotérmico de grande porte, com significativa predominância de geração hidrelétrica. O planejamento e a geração

eletroenergética do SIN apresentam uma estreita correlação com os estoques de água existentes nos reservatórios das usinas hidrelétricas e as suas afluições.

A grande influência que o setor energético possui em diversos outros campos da sociedade requer informações de qualidade para planejamento de suas ações nas diversas escalas temporais e espaciais. Informações de variabilidade e mudanças climáticas de qualidade podem tornar o planejamento energético mais eficaz e minimizar os potenciais impactos sobre a disponibilidade deste recurso (BANCO MUNDIAL, 2010).

A definição da política ótima de geração de um sistema elétrico tem por objetivo o atendimento da demanda hídrica para cada intervalo de tempo do planejamento, ao mínimo custo, preservando a confiabilidade da operação elétrica.

O SIN por ter predominância hidroelétrica às incertezas associadas às afluições futuras faz com que a cada decisão de uso de um recurso de geração de menor custo haja uma premissa de cenário futuro de afluições segura (sem comprometimento da oferta) e um risco associado.

O processo de alocação de produção tem que além de considerar o custo imediato considerar o custo futuro. A Função de Custo Futuro – FCF traduz a estratégia futura de operação para os modelos de curto prazo da cadeia de otimização. Além disso, é através da Função de Custo Futuro, que é feito o encadeamento dos modelos de otimização, possibilitando que as políticas de operação de curto prazo estejam em conformidade com as estratégias de operação de médio prazo.

O grande objetivo do planejamento é operar com segurança o SIN, visando atingir o menor Custo Total¹ possível em todo o horizonte de estudo.

Os modelos realizam a otimização dos recursos disponíveis, visando alcançar o mínimo custo, cabendo a esta estratégia gerenciar as decisões de geração de origem hidroelétrica ou termoelétrica, por usina, as decisões de intercâmbio entre as regiões do SIN e de corte de carga.

O Custo Total constitui-se de duas parcelas: o Custo Imediato referente às decisões tomadas no presente e o Custo Futuro referente às decisões que serão tomadas no futuro. No entanto, sabe-se que devido ao acoplamento temporal das decisões, causado pela predominância da hidroeletricidade, o Custo Futuro é influenciado pelas decisões tomadas no presente.

¹ O Custo Total é formado pela soma dos custos variáveis de todos os recursos utilizados e o custo de

Ao melhorar o sistema de incorporação das escalas temporais e espaciais do setor elétrico haverá uma redução dos custos de operação e um dimensionamento da incerteza do processo de previsão. A incorporação da informação de mudanças climáticas, atualmente não usada, pode sinalizar os locais onde serão necessários maiores investimentos estruturais e possíveis estratégias de mitigação e adaptação do SIN.

2.2.1. Modelos utilizados no planejamento e programação da operação do Sistema Interligado Nacional

O atual sistema de previsão e planejamento usado pelo ONS contém três horizontes bem definidos: médio prazo, curto prazo e curtíssimo prazo, conforme Tabela 1 e Figura 6.

Tabela 1- Interação entre os modelos hidrológicos cadeia de planejamento da operação do SIN e horizontes de previsão dos modelos usados pela ONS.

Etapa	Médio Prazo	Curto Prazo	Programação da Operação
Modelo Hidrológico	GERVAZP	PREVIVAZ/GERVAZP	PREVIVAZH
Modelo de otimização	NEWAVE	DECOMP	DESSEM
Horizonte de Planejamento	até 10 anos	até 1 ano	até 14 dias
Discretização temporal	Mensal	Semanal/Mensal	horária/patamares
Afluências Hidrológicas	Estocástico	Determinístico/Estocástico	Determinístico

Fonte: Costa et al. (2007).

A previsão de vazões de curtíssimo prazo (até um mês) e a geração de cenários hidrológicos é extremamente importante para a operação do Sistema Interligado Nacional. Com base nestas informações, são realizados o Programa de Operação e suas revisões.

O modelo utilizado para prever vazões semanais de quase todas as bacias do SIN é o PREVIVAZ, exceto para bacia do Rio Iguaçu. As previsões diárias de vazão natural são feitas em sua grande parte pelos diferentes Agentes de Geração e complementadas pelo ONS com auxílio dos modelos PREVIVAZH. Após a fase de previsão diária, o

ONS consolida as previsões de vazões médias diárias e processa os dados para o fechamento da vazão natural média da semana em curso, utilizada como insumo básico para a obtenção das previsões de vazões semanais para as semanas seguintes.

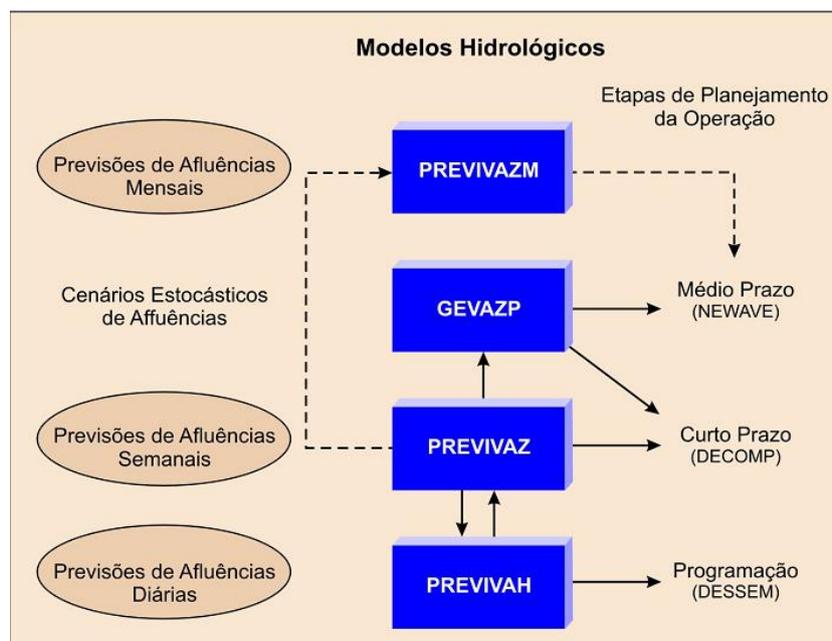
Uma vez consolidados os dados diários, o ONS dá início ao processamento dos modelos de previsão de vazões semanais (PREVIVAZ) para obter as previsões de vazões semanais até o fechamento do mês em curso. Em seguida, são usados modelos estatísticos para as demais aplicações do setor hidroelétrico.

A partir das previsões geradas, dar-se início o processo de otimização energética. O programa DECOMP através das previsões semanais do mês em curso e dos cenários hidrológicos do mês seguinte calcula o custo marginal imediato e custo marginal futuro. A ideia é minimizar o custo marginal, isto define as políticas ótimas que serão adotadas.

As previsões de médio prazo definem estratégias políticas que determinam quanto da demanda vai ser atendida pelo setor termoeletrico quanto pelo setor hidroelétrico. O Modelo de Despacho Hidrotérmico a Subsistemas Equivalentes – NEWAVE é a ferramenta responsável por elaborar os estudos de planejamento da etapa de médio prazo.

A Figura 6 mostra o esquema de funcionamento deste sistema.

Figura 6- Interação entre os modelos hidrológicos cadeia de planejamento da operação do SIN.



Fonte: Costa et al. (2007)

2.2.2. Importância das múltiplas escalas temporais no planejamento do SIN

O planejamento do sistema elétrico brasileiro tenta dimensionar a demanda e a oferta das configurações futuras de energia elétrica no país. Para tanto, é preciso mensurar necessidades energéticas futuras, bem como ajuste de cronogramas de entrada de empreendimentos de geração, entre outros. Tais ajustes são realizados seguindo critérios que visam assegurar o suprimento de energia e minimizar custos de investimento e operação. Desta forma informações que possibilitem um maior entendimento dos aspectos que afetam a geração de energia podem trazer consigo um maior conhecimento sobre risco em tomada de decisões e tornar a alocação de água e energia mais eficientes.

Segundo Costa *et al.* (2007), a capacidade de geração futura do sistema é influenciada pelas afluições hidrológicas futuras, cujas previsões e incertezas devem ser consideradas no planejamento da operação do sistema. Previsões hidrológicas de melhor qualidade podem afetar o desempenho da operação do sistema aumentando benefícios e confiabilidade e, reduzindo custos.

Os modelos de previsão de vazão atualmente utilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em geral, são estocásticos e não consideram informações meteorológicas. Esta forma de previsão supõe que as séries de vazões são estacionárias, o que considerando as alterações no uso e ocupação do solo e as mudanças climáticas é uma suposição que pode indicar estratégias que provoquem grandes arrependimentos.

Nas últimas décadas, as diferentes tecnologias de modelagem de fenômenos naturais têm evoluído rapidamente, propiciando a oportunidade de se ampliar seus conhecimentos sobre a natureza e compreender seus processos físicos e biológicos. Considerando estes avanços, torna-se necessária a busca pelo desenvolvimento de novos sistemas de previsão de vazões incluindo informações climáticas para melhorar a qualidade da previsão. Isto possibilita um maior entendimento das incertezas relacionadas com as condições climáticas futuras.

Desta forma, os aperfeiçoamentos metodológicos para a obtenção dos cenários hidrológicos de previsão ou geração de afluições contribuem para a melhoria do processo de planejamento e programação da operação Sistema Interligados Nacional (SIN).

Considerando influencia direta que o setor hidrelétrico possui em diversos segmentos sociais, isto pode indicar uma redução significativa dos impactos sofridos

pela iniciativa pública e privada. Visto que, uma melhor informação tornar as estratégias de adaptação a certos cenários ou eventos mais robustas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo destaca a literatura existente sobre os padrões de variabilidade climática sobre o Brasil e mostra os principais modelos de previsão de vazões nas múltiplas escalas temporais e espaciais, tanto os modelos estatísticos, como os modelos dinâmicos.

3.1. Caracterização climática e aspectos sobre variabilidade climática

Nesta seção serão destacados aspectos relevantes sobre a variabilidade climática na escala global, destacando o Brasil. Além disso, será abordada a variabilidade nas múltiplas escalas temporais: sazonal, interanual e decadal. Na escala decadal será discutido a diferença entre mudanças climáticas e variabilidade climática.

3.1.1. Variabilidade e mudança climática na escala global

Atualmente, uma das maiores preocupações da comunidade científica mundial têm sido os impactos produzidos pelas mudanças climáticas no ciclo hidrológico. Segundo o relatório do IPCC (2007,a), o termo mudança climática refere-se a alterações nos padrões climáticos, que podem ser identificadas por meio de variações persistentes por longos períodos, da ordem de décadas, na média aritmética e/ou em outras medidas de variabilidade climática, independente de suas causas.

Para esse relatório, mudança climática é um termo genérico que engloba todas as formas de incertezas do clima nos padrões climáticos, tais como tendências ou variações, independentemente de suas causas. Esses últimos dois conceitos são segundo esse relatório definidos por:

- Tendência climática: caracterizada por uma elevação ou diminuição suave e monótona nos valores médios de uma serie meteorológica. Não é necessariamente, restrita a tendências lineares em função do tempo, mas deve conter apenas um máximo ou mínimo no ponto final da série.
- Variação climática: flutuação ou componente desta em escala de tempo suficientemente longa, capaz de resultar em inconstância nos parâmetros estatísticos relativos a períodos sucessivos de pelo menos 30 anos da variável meteorológica em questão.

Assim, a detecção de uma mudança climática, requer que a amplitude da variabilidade climática seja quantificada. Para isto, é utilizada uma grande variedade de dados e resultados de modelos atmosféricos. As flutuações climáticas no globo, especificamente na América do Sul são bastante influenciados pelos oceanos tropicais, afetando diretamente a precipitação dessas regiões.

Devido à grande interação com a atmosfera, os oceanos têm um papel fundamental na variabilidade climática, interanual e interdecadal do planeta. As trocas de calor latente e sensível dependem principalmente da temperatura da superfície do mar (TSM). Nesse contexto devido a sua extensão, torna-se evidente as variações de temperatura do Oceano Pacífico nas condições climáticas globais, que podem ser evidenciados através de fenômenos naturais tais como o El Niño, La Niña, a Oscilação Decadal do Pacífico e o Dipolo do Atlântico.

3.1.2. Caracterizações da variabilidade climática regional nas escalas de tempo para o Brasil

3.1.2.1. Variabilidade sazonal da precipitação

O sistema mais importante gerador de precipitação sobre a região equatorial dos oceanos Atlântico, Pacífico e Índico, assim como áreas continentais adjacentes é a Zona de Convergência Tropical (ZCIT) (HASTENRATH e HELLER, 1977; CITEU et al., 1988).

O Nordeste possui dois períodos bem distintos: o período de chuva e a período seco . O período chuvoso concentra-se entre dezembro e julho, quando o ZCIT migra sazonalmente de sua posição mais ao norte (em torno de 14°N) para a posição mais ao Sul (em torno de 3°S), durante março - abril.

Essa migração sazonal da ZCIT, associada aos fatores que causam o fortalecimento ou enfraquecimento dos ventos alísios de nordeste e sudeste, tem papel importante na determinação do período chuvoso do norte da região Nordeste. No período seco há um predomínio de altas pressões atmosféricas e quase uma total ausência de fenômenos atmosféricos causadores de precipitação.

3.1.2.2. Variabilidade interanual da precipitação

Uma grande parte da variabilidade interanual do clima sobre a América do Sul são moduladas pelo fenômeno El Niño – Oscilação Sul (ENSO) sobre o Pacífico equatorial e pelo gradiente meridional de anomalias de temperatura de superfície do mar (TSM) sobre o Atlântico tropical. A combinação das circulações atmosféricas anômalas induzidas pelas distribuições espaciais de TSM sobre os Oceanos Pacífico equatorial e Atlântico tropical afeta o posicionamento latitudinal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre o Atlântico, influenciando a distribuição da precipitação sobre a bacia do Atlântico e norte da América do Sul. Apesar da variabilidade interanual das TSM e ventos sobre o Atlântico tropical serem significativamente menores do que aquela observada sobre o Pacífico equatorial, essa variabilidade exerce profunda influência na variabilidade climática sobre algumas regiões do Brasil, segundo MOLION e BERNARDO (2002) as regiões do centro e o leste da Amazônia. Outras áreas influenciadas por esses fenômenos são o Nordeste (NAMIAS, 1972; HASTENRATH e HELLER, 1977) e o extremo Sul do Brasil (DIAZ et al., 1988).

A estrutura norte – sul das anomalias de TSM observadas no Atlântico é conhecida como o Dipolo do Atlântico tropical (MOURA et al., 1981; NOBRE e SHUKLA, 1996).

3.1.3. Variabilidade decadal da precipitação

Estudos recentes demonstram a existência de modos de variabilidade de baixa frequência. Esses modos de variabilidade ocorrem no Pacífico e no Atlântico, e superpostos aos modos interanuais, como o El Niño – Oscilação Sul (ENSO), pode alterar o efeito deste em algumas regiões do globo, inclusive na América do Sul. Pelas limitações na cobertura espacial, no comprimento das séries de dados e no desempenho dos modelos numéricos, o entendimento dessa variabilidade é ainda um processo em andamento, com vários aspectos desconhecidos. Mudanças de regime climático no Atlântico Norte foram documentadas por Folland e Parker (1990) que encontraram anomalias de TSM com maiores magnitudes e mais coerência durante 1977-1986 do que em outras décadas, considerando a série histórica a partir de 1947.

Andreoli et al.(2004), documentaram flutuações de anomalias da TSM no Atlântico Tropical Norte e o Atlântico Tropical Sul, como parte de dois modos decadais de periodicidades distintas, separadas pela ZCIT (10 anos no Atlântico norte e 14 anos no sul).

Zhang et al. (1997) descrevem outra característica da oscilação da TSM do Oceano Pacífico similar ao ENSO, ocorrendo em escala interdecadal. A este fenômeno foi atribuído o nome de Oscilação Decadal do Pacífico (ODP).

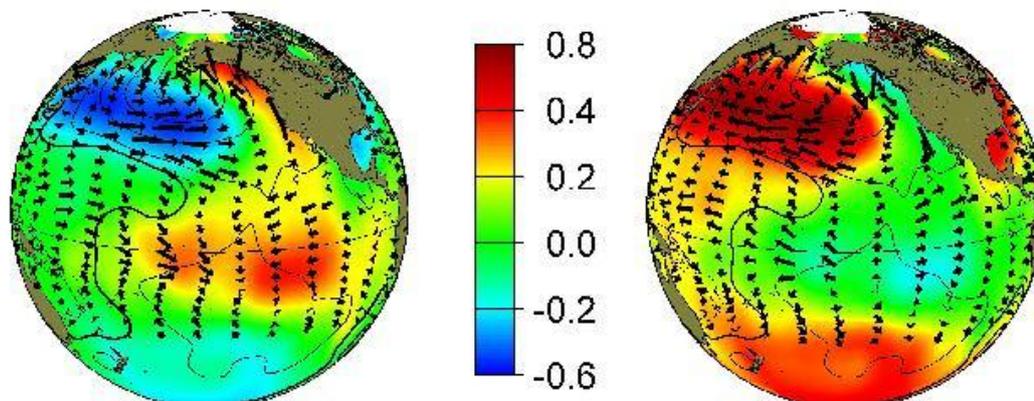
3.1.3.1 . *Oscilação decadal do pacífico (ODP)*

A ODP é um padrão de longo prazo associado à variabilidade climática do Pacífico, conforme mostram as Figura 7 e Figura 8. O cientista Steven Hare designou o termo em 1996 ao pesquisar a conexão entre os ciclos da pesca de salmão no Alaska e o clima do maior oceano da Terra. O Oceano Pacífico ocupa 35% da superfície do planeta, portanto, as oscilações de longo tempo de cada fase da ODP apresentam um sinal predominante no clima global (REBELLO, 2005). Mantua e Hare (2002) demonstraram que no século XX as flutuações da PDO foram mais evidentes em duas periodicidades, apresentando um ciclo de 15 a 25 anos e outro de 50 a 70 anos.

A ODP apresenta duas fases: na fase negativa da ODP as características são anomalias negativas de temperatura na superfície do mar (TSM) no Pacífico Tropical e, simultaneamente anomalias de TSM no Pacífico Extratropical; e a tendência é que ocorra um maior número de episódios de La Niña que tendem a ser mais intensos. Ao mesmo tempo se dá uma menor frequência de eventos do El Niño que tendem a ser curtos e rápidos. Já na fase positiva da ODP, a tendência é de um maior número de episódios do El Niño que tendem a ser mais intensos. Em contrapartida, se registra um menor número de La Niña e que tendem a ser menos expressivos.

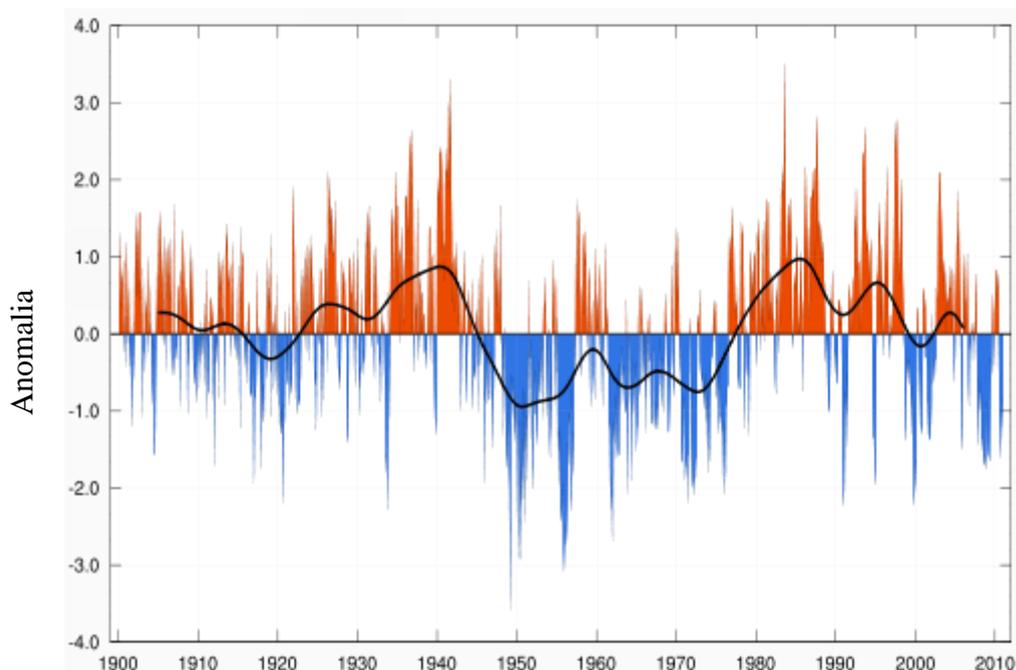
Segundo, os sinais da ODP são mais visíveis no Pacífico Norte com traços residuais no Pacífico tropical enquanto no fenômeno do ENSO ocorre o oposto.

Figura 7-Fases da Oscilação Decadal do Pacífico – à esquerda a fase positiva e a direita a fase negativa (Anomalia de temperatura em °C).



Fonte: Mantua et al. (1997)

Figura 8-Oscilação da Temperatura da Superfície do Mar do Pacífico durante 1900 – 2010 (Anomalia de temperatura em °C).



Fonte: Mantua et al. (1997)

Mantua et al. (1997), utilizando entre outros parâmetros, a TSM do Oceano Pacífico entre os anos de 1900 a 1995, define os períodos de 1900 a 1924 e 1947 a 1976 como fases frias da ODP, ao passo que os períodos de 1925 a 1946 e 1977 a 1998 como fases quentes, atualmente estamos em uma fase fria que se iniciou em 1999. As influências dessa oscilação de escala interdecadal na variabilidade climática da América

do Sul foram também investigadas por Andreoli e Kayoli (2005). Estes trabalhos demonstraram que esse fenômeno influencia o volume de precipitação e que eventos de maior chuva (menor chuva) acontecem quando o ENSO e a ODP estão na mesma (oposta) fase.

3.2. Diferentes escalas de previsão

Nesta seção serão destacadas as principais técnicas de previsões e projeções nas múltiplas escalas temporais mencionadas na literatura.

3.2.1. Variabilidade e mudanças climáticas

3.2.1.1. O Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) - mudanças climáticas e variabilidade climática

O IPCC é o principal órgão científico internacional para as avaliações das alterações climáticas, e foi criado pelo Programa das Nações Unidas para o Ambiente (PNUA) e pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) em 1988, para fornecer visões científicas claras sobre o estado atual do conhecimento das mudanças climáticas e seus possíveis impactos socioeconômicos e ambientais.

Desde 1988, quando foi criado, cientistas vinculados aos principais centros de pesquisa em clima reúnem-se para publicar relatórios sobre os possíveis cenários de emissão de gases de efeito estufa na atmosfera e os impactos nas diversas variáveis climáticas. Até o momento, foram publicados quatro relatórios: em 1990 em Sundsvall (Suécia), 1995 em Roma (Itália), 2001 em Acra (Gana) e 2007 em Paris (França).

O quarto relatório fornecido pelo IPCC, divulgado em fevereiro de 2007, reafirma a projeção de aumento da temperatura média da atmosfera. Dados evidentes de mudanças globais foram apresentados no AR4, em decorrência do aumento da concentração dos gases de efeito estufa a partir de atividades humanas. As concentrações de dióxido de carbono (CO₂), de gás metano (CH₄) e de óxido nitroso (N₂O) ultrapassaram em muito os valores pré-industriais. Os indicadores de mudanças climáticas mostrados por esse relatório foram o aumento da temperatura global, aumento do nível do mar e a redução da cobertura de gelo. (IPCC, 2007b).

A mudança na concentração desses gases tem causado um evidente aumento gradual da temperatura global (IPCC, 2007a) e pode alterar outros campos

meteorológicos, como a precipitação. Esse aumento de temperatura é mostrado para o Brasil para o século XX em, por exemplo, Nobre (2005) e Marengo e Valverde (2007).

Embora exista uma discrepância em torno dos valores absolutos dos modelos do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 3* (CMIP3) para o aumento na temperatura, todos concordam que haverá aumento na temperatura média global (IPCC, 2007(a)). Entretanto, os diferentes modelos do CMIP3, publicados pelo IPCC-AR4 mostraram cenários divergentes para o campo de precipitação para várias regiões do planeta, alguns projetando aumento de precipitação e outros, redução (MARENGO e VALVERDE, 2007; MARENGO e SOARES, 2005).

Diversos autores avaliaram a tendência na precipitação total para séries observadas durante o século XX. Por exemplo, Haylock et al. (2006) fizeram uma análise da precipitação sobre a América do Sul, e observaram uma tendência de aumento do total anual de chuva sobre o Nordeste do Brasil (NEB). O estudo realizado por Santos e Britto (2007), utilizando índices de extremos climáticos e correlacionados com as anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) também mostrou tendência de aumento da precipitação total anual nos Estados da Paraíba e Rio Grande de Norte. Santos et al. (2009) mostraram tendência de aumento de precipitação para o Estado do Ceará.

Entretanto, tais tendências podem estar associadas, além de mudanças climáticas e/ou alterações no uso do solo, a flutuações naturais dessa grandeza que podem ocorrer em várias escalas de tempo, incluindo alguns anos (variabilidade interanual), décadas (variabilidade inter e multidecadal) e até em escalas de tempo mais longas, relevantes em estudos paleoclimáticos. Essas flutuações podem estar ligadas, por exemplo, a padrões de variabilidade nos Oceanos Pacífico e Atlântico (GRIMM et al., 2000; KANE, 1992), como o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENSO, na escala de tempo interanual), ou à variabilidade decadal do Pacífico. No entanto, além das variações naturais, é provável que a alteração da temperatura planetária das últimas décadas causada pela elevação da concentração de gases estufas por emissões antrópicas (IPCC, 2007a), provoque mudanças no regime de chuvas na América do Sul.

Espera-se que algumas das questões científicas que surgiram durante a preparação do quarto relatório do IPCC possam ser respondidas com base no conjunto de dados do *Coupled Model Intercomparison Project Phase Cinco* (CMIP5), ao subsidiar a publicação do Quinto Relatório (AR5, publicado no final de 2013).

Entretanto, apesar do significativo desenvolvimento ocorrido nas últimas décadas acerca do conhecimento do clima, existem ainda diversas incertezas associadas aos diversos sistemas de previsões ou projeções climáticas. Por exemplo, as parametrizações físicas, método numérico de resolução adotado, as condições iniciais e fronteira e a própria atmosfera que é considerada um sistema caótico (LORENZ, 1963; 1965).

Quanto às questões relacionadas aos modelos globais de mudanças climáticas do CMIP5 pode se adicionar ainda a baixa resolução dos modelos que não é capaz de reproduzir alguns processos físicos e a trajetória desconhecida de emissões de gases de efeito estufa no futuro.

Segundo Cavalcanti et al. (2009), a América do Sul apresenta clima com intensa variabilidade temporal e espacial de chuvas, devido à atuação de diversos sistemas. Essa complexidade torna a região vulnerável às condições de tempo e clima, que são associadas a impactos sociais e econômicos significativos em diversos setores. Desta forma, torna-se relevante para o desenvolvimento de políticas públicas a identificação das alterações na ocorrência do clima nesta região e os possíveis impactos no regime de chuvas.

3.2.3.2. Mudanças climáticas e recursos hídricos

Vários estudos foram realizados com o objetivo de verificar as influências das mudanças climáticas nos recursos hídricos, empregando os resultados dos cenários e modelos de circulação geral e regional criados pelo IPCC, acoplando esses resultados ao modelo hidrológico, ou apenas criando cenários hipotéticos de modificações climáticas.

Arnell (2004) estudou a interferência das mudanças climáticas nos recursos hídricos na escala global. Foi notado um crescimento no escoamento superficial anual nas regiões de altas latitudes, na África e Ásia equatorial e no sudeste da Ásia, e um decréscimo nas latitudes médias e em muitas regiões subtropicais.

Arnell e Reynard (1996) investigaram a influência das mudanças climáticas no escoamento superficial de 21 bacias na Grã-Bretanha, a partir da utilização de um modelo chuva-vazão e a criação de cenários de mudanças climáticas com uma série de 60 anos (1990 a 2050). Um cenário possuía situação climática equilibrada, na qual a concentração de CO₂ não dobrou, e o outro havia um aumento na concentração de CO₂,

ambos foram baseados em cenários desenvolvidos pela *UK Climate Changes Impacts Review Group* (CCIRG, 1991 apud ARNELL e REYNARD, 1996).

Arnell e Reynard (1996) checaram, em relação aos cenários mais úmidos, que há aumento no escoamento superficial em todos os meses, com uma percentagem maior de crescimento nos meses de inverno, os quais têm os valores mais altos de escoamento superficial.

Panagoulia e Dimou (1997) analisaram o impacto das mudanças climáticas no escoamento superficial da bacia de Mesochora, na Grécia Central, a partir da criação de cenários hipotéticos de mudanças climáticas como entradas em dois diferentes modelos hidrológicos de diferentes estruturas e escalas temporais (diário e mensal). Utilizaram as séries históricas de 15 anos de clima, tanto a variabilidade sazonal como anual e aplicaram os cenários de aumento/diminuição da precipitação e temperatura. Foi verificado que todos os modelos indicaram um aumento no escoamento superficial no inverno e maior decréscimo no verão.

Segundo Binder (2006), na região nordeste do Pacífico são identificados problemas relacionados às mudanças climáticas, como aumento da precipitação no inverno e reduções nos verões e nas primaveras. Em consequência, estas mudanças refletem na disponibilidade hídrica das bacias hidrográficas desta região nos Estados Unidos, exigindo planejamentos para os múltiplos usos da água nestas localidades. O mesmo autor relata que os planos nacionais de bacias hidrográficas nos Estados Unidos estão desenvolvendo estudos e incluindo em suas ações os reflexos das mudanças climáticas sobre a demanda de água para o consumo doméstico, agropecuário e industrial.

Milly et al. (2005) utilizaram resultados de simulações de 12 modelos climáticos em estudo que utilizou cenário de emissão A1B do CMIP3 e projeções para o período 2041-2060. Os resultados mostraram que há concordância dos modelos para o aumento da vazão (entre 10% e 40% - valores médios dos 12 modelos) na bacia do Paraná-Prata e redução da vazão (até 20% - valores médios dos 12 modelos) no leste da Amazônia e Nordeste do Brasil.

Tomasella et al. (2009) apresentaram simulações para a bacia do rio Tocantins, para o cenário A1B do CMIP3, usando o modelo regional ETA (com resolução 40 km) com condições de contorno do modelo global HadCM3. As séries de precipitação e temperatura do ar foram utilizadas como dado de entrada para o Modelo hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH). Para o período de 2080-2090, a redução da vazão na bacia

é da ordem de 30%, com a possibilidade de alcançar até 60% no período de estiagem. Segundo os autores, o estudo indica que o impacto não é uniforme para o ano inteiro e que pode variar a depender das características físicas da sub-bacia analisada.

Já no trabalho de Mello et al. (2008), foi realizado o *downscaling* das precipitações mensais para os anos de 2001 a 2099 para a bacia hidrográfica do rio Paracatu, simulados pelo modelo de circulação geral do *Hadley Centre* (HadCM3). As precipitações interpoladas serviram como entrada em modelo do tipo precipitação-vazão, que possibilitou a estimativa das vazões mínimas em 21 estações fluviométricas distribuídas na bacia. Para o cenário A2, verificou-se tendência de aumento na disponibilidade hídrica em todas as estações fluviométricas, variando de 31 a 131% até 2099. Para o cenário B2, não foi verificada nenhuma tendência significativa.

3.2.2. Previsão sazonal ou previsão de curto prazo

Problemas como a prevenção e o controle de cheias, a operação de reservatórios e o planejamento do uso dos recursos hídricos estão diretamente associados ao processo de previsão de vazões, que apresentam incertezas decorrentes, essencialmente, da modelagem do processo e das condições iniciais assumidas. A maioria dos estudos relacionados a esta área indicam a aplicação de dois tipos de modelagem: estatísticas ou dinâmicas. A primeira é baseada no registro histórico de observações de variáveis climáticas e da própria vazão, permitindo que vazões futuras sejam representadas a partir de hipóteses do comportamento das séries observadas. A segunda abordagem procura representar os processos do ciclo hidrológico, por intermédio da modelagem atmosférica e da modelagem hidrológica, onde os resultados destes modelos podem ser acoplados, obtendo-se assim uma representação física dos processos hidro-climáticos de uma determinada bacia hidrográfica.

3.2.2.1. Previsão estatística

Uvo et al. (2000) utilizando regressão através de redes Neurais utilizando a temperatura da superfície do mar (TSM) do Pacífico equatorial e do Atlântico Tropical realizaram previsão de vazões com uma ou duas estações de antecedência para a região Amazônica para o período de 1946 a 1992. Obtiveram-se correlações entre observado e previsto das vazões no rio em nove localidades que variam de 0,35 a 0,76. Estes

resultados foram melhorados com a utilização de um modelo de regressão linear canônico implantado por Uvo e Graham (1998). Porém, não é clara a possibilidade do método de redes neurais ser eficaz na geração de cenários probabilísticos para diversos locais ao mesmo tempo, mantendo a mesma estrutura nos diversos locais e sendo de fácil comunicação para o operador de reservatórios.

Uma abordagem semi-paramétrica para previsão de vazões em vários locais de calibração em uma rede de rio condicionadas a preditores climáticos foi desenvolvida por Souza Filho e Lall (2003) para a região Nordeste do Brasil. A estratégia considera previsões estatísticas de vazões totais anuais ou sazonais em todos os locais e sua desagregação mensal usando uma técnica chamada k-vizinhos para reamostrarem dos possíveis cenários de vazões que mantém a consistência de espaço-tempo em diferentes locais e subperíodos.

Muitos operadores de hidrossistemas fazem as decisões de alocação de água e estocagem para o próximo ciclo, simulando o sistema, usando sequências de afluições reamostradas do registro histórico e preveem as demandas. Souza Filho e Lall (2003) fornecem uma capacidade de reamostragem condicionada ao registro histórico, considerando o estado dos principais preditores climáticos.

Em uma análise de competências da previsão global dos principais modelos de circulação global do oceano e atmosfera para precipitação sazonal, Rajagopalan et al. (2002) destaca que o Nordeste do Brasil é uma das poucas regiões do mundo onde há habilidade consistente e estatisticamente significativa durante a estação chuvosa primária (Janeiro–Maio). A seca é uma preocupação permanente no Estado do Ceará no Nordeste do Brasil e os sistemas de reservatórios frequentemente enfrentam dificuldades, embora eles geralmente sejam projetados para um ciclo de armazenamento 2 a 3 anos.

Souza Filho e Lall (2003) realizaram uma investigação da dependência da vazão com relação à TSM com diferentes defasagens em toda a região de interesse. O estudo realizado por Souza Filho e Lall (2003) procurou solucionar assuntos relacionados à não linearidade e não normalidade das relações estatísticas, e a modificação necessária nos métodos clássicos de análise linear e multivariada. As duas séries temporais selecionadas como preditores foram o NINO3 (definida como a anomalia de temperatura da superfície do mar na região do Pacífico equatorial entre 150 graus W e 90 graus W e 5 graus S e 5 graus N) e um gradiente da TSM do Atlântico (EAD), série

definida como a diferença na média mensal da anomalia de TSM na região do Atlântico Norte (5-20N, 60-30W) e a média mensal da região do Atlântico Sul (0-20S, 30W-10E). A série de tempo mensal para estes índices foi derivada da malha de dados de TSM desenvolvidos por Kaplan et al. (1998) e disponível em <http://ingrid.ldeo.columbia.edu/SOURCES/KAPLAN/EXTENDED/>.

3.2.2.2. *Previsão acoplada*

Inúmeras técnicas de combinação de conjuntos de multi-modelos foram desenvolvidas, demonstrando melhora na habilidade das previsões de vazão (RAJAGOPALAN et al., 2002; DOBLAS-REYES et al., 2005; AJAMI et al., 2006; DUAN et al., 2006). Recentes avanços na habilidade de previsão do clima e da modelagem hidrológica servem como um impulso para continuar a perseguir modelos capazes de fornecer previsões de vazão melhoradas (BARNSTON et al., 1999; MASON et al., 1999; RAJAGOPALAN et al., 2002). Pesquisas anteriores apoiam a noção de que as combinações dos modelos de previsão podem produzir com habilidade previsões mais robustas e confiáveis do que as previsões de um único modelo, atribui-se a isto à inclusão de diferentes condições iniciais e de processos (BEVEN e FREER, 2001; GEORGAKAKOS et al., 2004; DOBLAS-REYES et al., 2005; REGONDA et al., 2006). Modelos perfeitos de previsão de clima e hidrologia não existem. Para melhorar a habilidade da avaliação dos riscos e da interpretação probabilística, as previsões devem ser colocadas em um contexto baseado na incerteza cumulativa inerente criada durante todo o processo de modelagem. Os modelos climáticos sofrem com as hipóteses das condições iniciais e de fronteira; falta de descrição dos processos e resolução da modelagem dinâmica hidrológica (ou seja, de deflúvio), da estimativa do parâmetro e da estrutura do modelo (GODDARD et al., 2001; GEORGAKAKOS et al., 2004; DOBLAS-REYES et al., 2005; KANG e YOO, 2006).

Modelos de Circulação Geral (MCGs) são baseados nos princípios gerais da dinâmica dos fluidos e da termodinâmica. Outros processos, tais como a convecção, que ocorrem em escalas muito pequenas para serem resolvidas diretamente, exigem parametrização. MCGs são normalmente executados em resolução espacial relativamente grosseira, geralmente maior que 2.0°, latitudinalmente e longitudinalmente. O resultado direto da baixa resolução espacial produz uma diferença de escala espacial grande entre as previsões climáticas disponíveis e da escala de

interesse de previsão climática da maioria dos usuários. Para superar isso, modelos climáticos regionais (MCRs) estatísticos ou dinâmicos, com maior resolução espacial, são construídos para áreas limitadas. MCRs possuem relativamente alta resolução, impulsionados pela baixa resolução dos MCG, e podem proporcionar significativos recursos de pequena escala em uma região limitada a um custo computacional acessível em comparação com MCGs de alta resolução.

O Instituto Internacional de Pesquisa para o Clima e a Sociedade (IRI) e a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) no Brasil desenvolveram um sistema de previsão de downscaling dinâmico para o Nordeste do Brasil e têm gerado previsões de chuvas sazonais desde Dezembro de 2001 (SUN et al.,2005). O ECHAM 4.5 Modelo de Circulação Geral da Atmosfera (*Atmospheric General Circulation Model* - AGCM) e o NCEP Modelo Espectral Regional (*Regional Spectral Model* - RSM) constituem o núcleo desse sistema de previsão. Este é um sistema de previsão de duas camadas. Previsões da temperatura da superfície do mar (TSM) são produzidos primeiro, que servem então como condição de contorno forçando o limite inferior para o sistema aninhado ECHAM4.5 AGCM – NCEP RSM.

3.2.3. Previsão do tempo ou previsão de curtíssimo prazo

A previsão em curtíssimo prazo tem sido definida como a estimativa da variável com antecedência de algumas horas ou dias, geralmente até um mês. Georgakakos e Kryzstofowicz (2001) mencionam até 14 dias, embora em algumas bacias esta antecedência possa ser ampliada com bons resultados. O fator limitante da previsão em curtíssimo prazo é a capacidade da variável de entrada, utilizada na previsão, em antecipar os eventos no futuro.

Esse tipo de previsão pode ser aplicado em sistemas de alertas de inundações, operação de obras hidráulicas como barragens, sistema de comportas de reservatórios, entre outros.

Essas previsões fornecem informações importantes para diversos setores da sociedade, principalmente para aqueles sensíveis a essa variável atmosférica, como a agricultura, recursos hídricos, transporte, energia hidráulica etc. Além disso, a possibilidade de prever eventos extremos permite que decisões possam ser tomadas para

que os impactos de tais eventos sejam minimizados, reduzindo assim o grau de vulnerabilidade de uma determinada região.

O comportamento da atmosfera é governado por leis físicas que são expressas em equações matemáticas. Tais equações, entretanto, possuem muitas variáveis e não apresentam solução analítica para valores futuros. Por essa razão, são utilizadas técnicas de modelagem numérica, dando origem aos modelos numéricos de previsão. Estes modelos meteorológicos podem ser globais ou regionais. Quando as equações são resolvidas sobre todo o globo sem ater-se às particularidades de cada região, temos um modelo global. Estes modelos são utilizados não somente para previsão atmosférica, mas também para estudos climáticos de escala global como a ação de poluentes na camada de ozônio ou a influência do fenômeno *El Niño* no clima global. Vários centros de previsão do tempo no mundo executam modelos globais, dentre os quais podem ser destacados: NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) (TOTH e KALNAY, 1993), ECMWF (*European Centre For Medium Range Weather Forecast*) (BUIZZA e PALMER, 1995), JMA (*Japan Meteorological Agency*) e CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos) (COUTINHO, 1999).

Os modelos regionais trabalham sobre uma área geográfica menor, podendo trabalhar com uma resolução maior, o que permite tratar mais detalhadamente fatores locais como a topografia e a hidrografia. Apesar disso, são similares aos modelos globais, pois também resolvem equações que governam o movimento atmosférico e são operacionalmente dependentes destes, utilizando, como condições de fronteira, dados obtidos de um modelo global.

Os modelos numéricos da atmosfera resolvem as equações do fluido através de aproximações. Alguns processos não conseguem ser explicitamente resolvidos nas grades usuais de modelos atmosféricos, como a turbulência, as trocas radiativas, os processos microfísicos, a interação com a superfície etc. Tais processos são usualmente parametrizados. Neste caso, parametrizações físicas são aproximações dos processos físicos cujas dimensões são menores do que aquelas representadas pela resolução do modelo, de modo que esses processos são simulados através de funções de outros parâmetros representados pelo modelo, especialmente quando seus efeitos médios não são desprezíveis.

A limitação no acerto das previsões dos modelos dinâmicos para a previsão numérica do tempo, não é associada somente ao tratamento inadequado dos fenômenos físicos da atmosfera, embora estes sejam suficientes para reduzir o prazo das previsões.

Lorenz (1963,1965) observou que as equações que governam os movimentos atmosféricos apresentam sensível dependência em relação à condição inicial, ou seja, pequenos erros nas condições iniciais, após algum tempo de integração, podem ocasionar grandes erros nas previsões futuras. Estes erros vieram a ser chamados de “caóticos” devido ao comportamento irregular que apresentavam. Assim, de acordo com a Teoria do Caos, fatores insignificantes podem amplificar-se temporalmente de forma a mudar radicalmente um estado da atmosfera.

A destreza de um sistema de previsão depende da capacidade de representação dos processos naturais associado ao sistema meteorológico que se pretende prever, assim como da incerteza associada ao mesmo e das características do próprio modelo ou conjunto de modelos (resolução espacial, qualidade da representação dos processos físicos, número de membros, qualidade das condições iniciais assimiladas etc.). Melhorar o entendimento em relação à confiabilidade, à sensibilidade e às limitações do sistema de previsão é crucial para que o mesmo possa se constituir enquanto ferramenta para definir políticas de planejamento e gestão (REIS JÚNIOR et al., 2009).

A técnica de previsão por conjunto (ensemble) surge como uma forma de tratar erros cometidos na geração das condições iniciais da atmosfera e causados pelas deficiências do modelo, buscando ampliar o prazo de previsão do modelo e obter melhores previsões numéricas de tempo (TOTH e KALNAY, 1993).

3.2.3.1. A previsão do tempo no Ceará

A Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), através do projeto PSICO (Previsão de Sistemas Convectivos: Observações, Modelagem e Nowcasting), implantou um sistema de previsão numérica de tempo por ensemble via modelos regionais. Essa previsão é feita operacionalmente com os modelos *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS; PIELKE et al., 1992; COTTON et al., 2003) 6.0 e o *Weather Research & Forecasting* (WRF; <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>).

Esse sistema de previsão por conjunto é inicializado com dados dos modelos globais do CPTEC e/ou do *Global Forecast System* (GFS). O método empregado para geração do conjunto de previsões consiste na utilização de combinações de diferentes

configurações físicas e distintas condições iniciais e fronteira para cada rodada dos modelos, originando um super-ensemble.

O ensemble regional FUNCEME de previsão numérica de tempo consiste em quatro combinações de configuração do modelo RAMS aliados a duas combinações de configurações do modelo WRF, totalizando seis membros.

Os membros que utilizam o modelo regional RAMS são obtidos com a combinação de duas opções de parametrização de convecção e duas fontes distintas de forçantes de grande escala. Já os que utilizam o modelo regional WRF são obtidos com duas opções de parametrização de convecção a partir do mesmo forçante de grande escala (SILVEIRA et al., 2011).

3.2.3.2. A previsão do tempo no setor elétrico brasileiro

Atualmente, estão sendo testadas novas configurações para o sistema de previsão numérica do tempo, estas informações devem ser usadas para o planejamento energético semanal. Este teste baseia-se no uso de previsões de precipitação simuladas pelo modelo Regional ETA, com resolução horizontal de 40 km e resolução vertical de 38 camadas, mais detalhes do modelo ver em Black (1994). Estes dados servem de entrada para o modelo hidrológico SMAP (LOPES *et al.*, 1981) para obtenção das vazões.

Com intuito de melhorar a previsibilidade e estender o prazo de validade das previsões, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) tem testado novas configurações de previsão numérica do tempo usando modelos regionais. Estes testes possuem duas vertentes: a primeira consiste em utilizar novos modelos regionais (no caso o modelo regional BRAMS) com as mesmas condições de fronteira atual e a segunda consiste no uso do mesmo modelo regional com diferentes configurações físicas e com os mesmos dados de fronteira combinado a uma melhor resolução de grade (aproximadamente 15 km).

4. LOCAL DE APLICAÇÃO

Para a aplicação da metodologia desenvolvida neste trabalho, foram escolhidos dois grandes sistemas com diferentes escalas espaciais, os mesmos são caracterizados nas seções 4.1 e 4.2:

- O sistema Jaguaribe-Metropolitano do Ceará;
- O Sistema Interligado Nacional (SIN), o setor elétrico brasileiro.

4.1. Ceará: Sistema Jaguaribe-Metropolitano

A primeira região de aplicação da metodologia é o sistema da região Jaguaribe e Metropolitana, no Estado do Ceará. O Estado do Ceará tem como uma das principais mananciais hídricas o rio Jaguaribe, drenando uma área correspondente a 48% do Estado, e beneficiando 81 dos 184 municípios inseridos no território estadual.

O sistema Jaguaribe-Metropolitano, considerado neste estudo, constitui-se no principal sistema de reservatórios do Estado, sendo composto pelos reservatórios: Orós, Castanhão, Banabuiú, Pacoti-Riachão e Gavião. O sistema tem como principais demandas o abastecimento humano, a irrigação e o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), sendo 47% dos recursos hídricos destinados à irrigação e 32% ao abastecimento humano, sendo a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) responsável por 78% dessa demanda.

Para reforçar o atendimento nas demandas da RMF e para atender as futuras demandas do CIPP, está em fase de conclusão o Eixão das Águas que realizará a transposição das águas do Açude Castanhão para a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), em uma extensão de 255 quilômetros, realizando a integração das bacias hidrográficas do Vale do Jaguaribe e da Região Metropolitana, beneficiando uma população de aproximadamente três milhões de habitantes. Estima-se que o custo total da obra ultrapasse 1 bilhão de reais.

O sistema de abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) é formado por cinco reservatórios: Pacoti, Riachão e Acarape do Meio na Bacia do Rio Pacoti; Pacajus na bacia do rio Choró e Gavião na bacia do rio Cocó, sendo esses reservatórios interligados por canais e adutoras.

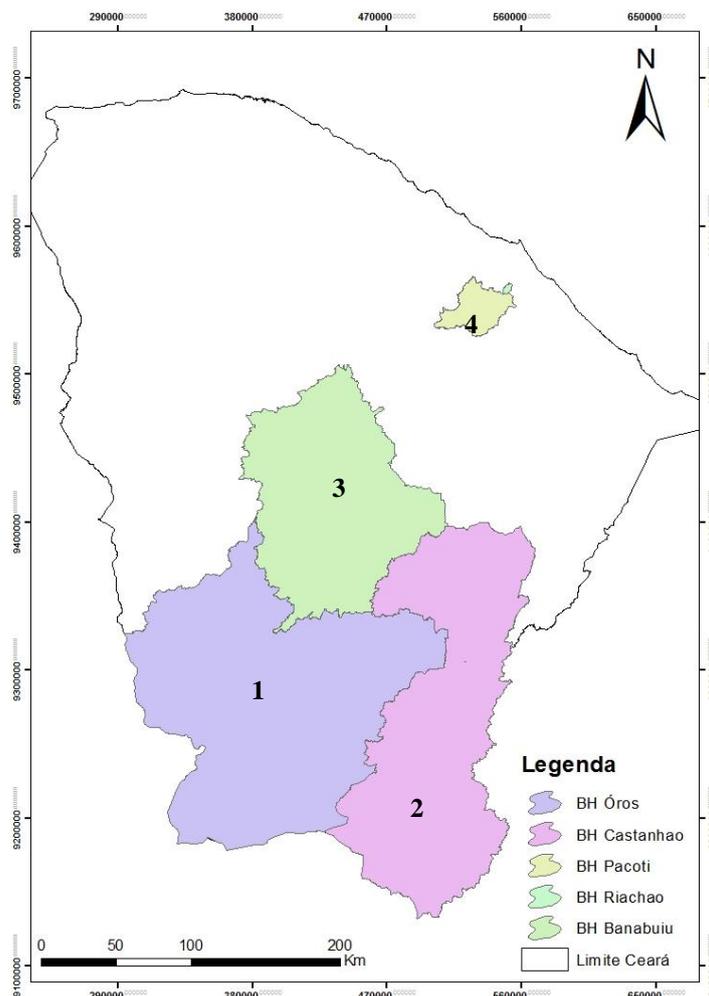
O presente trabalho considera quatro dos principais açudes do Sistema Jaguaribe Metropolitano: Orós, Banabuiú, Castanhão e Pacoti/Riachão. Conforme mostra a Figura 9.

A vazão anual em todos os locais é altamente variável e assimétrica. Noventa por cento dessas vazões ocorrem nos meses de janeiro a junho. A demanda de água da Bacia do Jaguaribe é destinada 80% para irrigação e 20% para consumo urbano, e a demanda de água das Bacias Metropolitanas é predominantemente para uso urbano e industrial. Por conseguinte, são distribuídas relativamente uniformes as demandas na bacia Metropolitana durante o ano, enquanto na bacia de Jaguaribe se concentram no período de agosto a novembro com uso pela irrigação.

Por ser localizada no semiárido do nordeste brasileiro é uma região pobre em volume de escoamento de água dos rios. Essa situação pode ser explicada pela alta evaporação, pela variabilidade temporal das precipitações e pelas características geológicas dominantes. É um lugar onde há predominância de solos rasos baseados sobre rochas cristalinas e, conseqüentemente, baixas trocas de água entre o rio e o solo adjacente. O resultado é a existência de uma densa rede de rios intermitentes.

Essas características tornam a região particularmente vulneráveis a flutuações climáticas e aos seus impactos nos suprimentos de água (SOUZA FILHO e MOURA, 2006). A chuva na região é altamente variável no espaço, dentro da estação chuvosa e entre anos (KOUSKY, 1979). A sazonalidade da chuva regional, e conseqüentemente das vazões, é governada em grande parte pela migração norte/sul da zona de convergência intertropical (ZCIT).

Figura 9- Reservatórios do Ceará por Região Hidrográfica. Onde: 1-Orós, 2-Castanhão, 3-Banabuiú, 4-Pacoti-Riachão.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

4.2. Setor Elétrico brasileiro

A matriz energética brasileira é basicamente constituída por energias consideradas limpas, principalmente provenientes de hidroelétricas. O setor elétrico brasileiro possui uma capacidade outorgada pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) de 116.618,4 MW, dos quais 81.002,3 MW (68%) em usinas hidrelétricas (ANEEL, 2011). Segundo o Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico de Abril de 2011 do Ministério das Minas e Energia a capacidade instalada da matriz elétrica brasileira é de 114.229MW, sendo que 81.152MW (71,04%) provêm das hidrelétricas.

O SIN responde pela produção e transmissão de energia elétrica do Brasil. O SIN é caracterizado por ser um sistema hidrotérmico de grande porte, com significativa predominância de geração hidrelétrica. O planejamento e a geração eletroenergética do SIN apresentam uma estreita correlação com os estoques de água existentes nos reservatórios das usinas hidrelétricas e as suas afluições. Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, somente 3,4% da capacidade de produção de energia elétrica do país encontra-se fora do SIN.

Esta fonte de energia renovável possui a grande vantagem comparativa com outras fontes, como as termoelétricas, no que se refere à emissão de gases estufas, porém são bastante sensíveis as variáveis atmosféricas. Devido à irregularidade das vazões fluviais e à necessidade de manter a continuidade do fornecimento de energia elétrica, o sistema de geração de energia elétrica brasileiro, além de contar com usinas termoelétricas de complementação (o que implica em custos de combustíveis), conta também com um conjunto de reservatórios de acumulação, cuja função é essencialmente a regularização dos regimes fluviais, através do armazenamento de água nos períodos de maiores afluições naturais de vazões fluviais, para ser utilizada durante os períodos mais secos, quando são escassas as vazões fluviais. A capacidade de armazenamento hoje disponível permite não só a regularização interanual do sistema, como também fornece proteção contra ocorrência de sequências de anos secos, configurando-se a chamada regularização plurianual do sistema.

Diante disso, a hegemonia da hidroeletricidade na matriz de energia elétrica brasileira impõe cautelosa análise sobre o regime fluvial e seus padrões de variação temporal tendo em vista o significativo impacto que estas variações podem produzir na oferta de energia e conseqüentemente em toda a economia nacional.

A capacidade de geração futura do sistema é influenciada pelas afluições hidrológicas futuras, cujas previsões e incertezas devem ser consideradas no planejamento da operação do sistema. Em geral, a qualidade das previsões hidrológica afeta o desempenho da operação do sistema aumentando benefícios e confiabilidade e, reduzindo custos.

4.2.1. Caracterização das regiões que compõem o SIN

Na Figura 10 é mostrada a energia natural afluyente para os quatro subsistemas do SIN. Existe uma complementaridade hidrológica existente entre as Regiões

Sudeste/Centro-Oeste e Sul. A distribuição das energias naturais afluentes médias mensais mostra que os respectivos períodos secos e úmidos não são coincidentes nessas regiões. A natureza do Sistema Interligado Nacional faz com que exista um acoplamento espacial e temporal das decisões tomadas na sua operação energética.

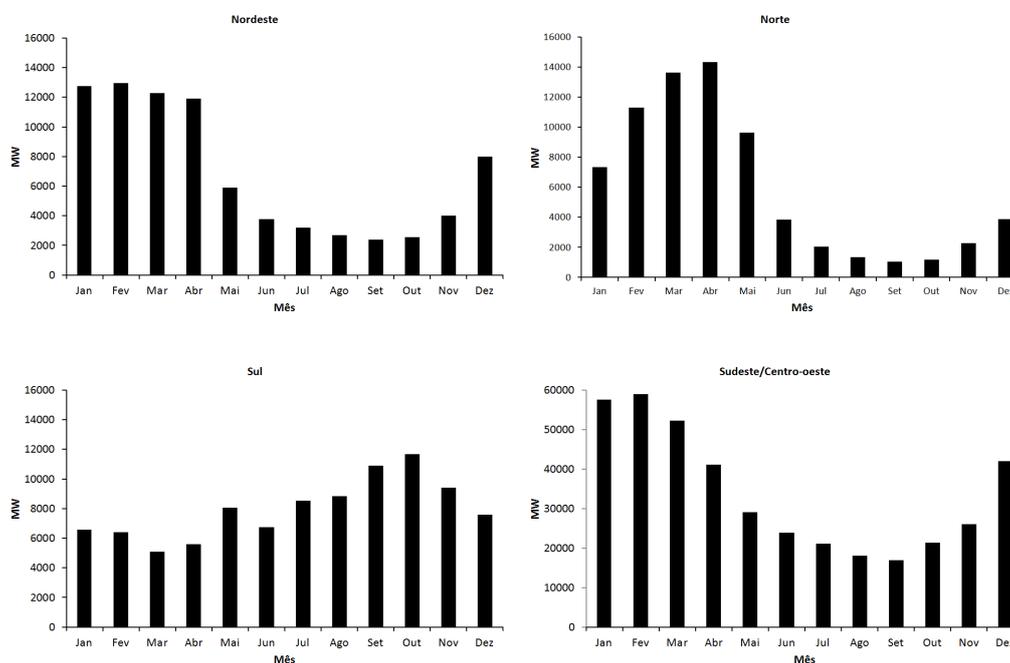
O setor Nordeste brasileiro possui um ciclo anual bem definido de precipitações, onde predominam dois períodos distintos: o período de chuva e o período seco. O período chuvoso concentra-se entre dezembro e julho e o principal sistema produtores de chuva é a ZCIT (CAVALCANTI et al.,2009; MOLION e BERNARDO, 2002) seguido de sistemas secundários tais como: linhas de instabilidade, complexos convectivos de mesoescala e efeitos de brisas, proximidade das frentes frias e os vórtices ciclônicos de ar superior.

A sazonalidade do setor Norte é praticamente coincidente com a região Nordeste, onde, durante o período chuvoso, as vazões de Tucuruí são extremamente elevadas, indicando que parte da energia gerada pode ser levada para outra região. O principal sistema climático causador de chuvas que influencia nessa região é a zona de convergência do Atlântico Sul.

A região Sudeste/Centro-oeste é a de maior demanda do país e importar energia de outras regiões a maior parte do ano. Esta região também é bastante influenciada pela zona de convergência do Atlântico Sul.

A região Sul possui grande variabilidade de armazenamento e a região Sudeste/Centro-oeste é extremamente dependente desta região. Esta região é bastante influenciada por frentes frias.

Figura 10 - Energia Natural Afluyente em MW (a unidade usada é relação entre a energia gerada e o tempo de funcionamento das instalações) dos subsistemas do setor elétrico brasileiro no período de 2002 a 2011.



Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)-
http://www.ons.org.br/historico/energia_natural_afluyente_out.aspx#.

4.2.2. O processo de planejamento no setor elétrico

A política ótima de geração do SIN tem por objetivo o atendimento da demanda hídrica para cada intervalo de tempo do planejamento, ao mínimo custo, preservando a confiabilidade da operação elétrica.

O problema de otimização do planejamento da operação eletroenergética do SIN consiste em minimizar os custos globais de produção de energia elétrica, determinando metas de geração para as usinas hidro e termoelétricas ao longo de um horizonte de estudo, garantindo o atendimento à demanda de energia elétrica e às restrições operativas do sistema. Para que este planejamento seja efetivo, permitindo que a modicidade tarifária seja alcançada, ele deve ser feito de forma coordenada, considerando as diferentes dimensões do problema: (i) a dimensão temporal, já que as decisões de armazenamento dos reservatórios das usinas no tempo presente influenciam as condições futuras; (ii) a dimensão espacial, pois a disposição das bacias hidrográficas do país permite que se tenham usinas em uma mesma cascata, neste sentido a operação

de usinas na cabeceira dos rios influenciam a operação das usinas a jusante; e (iii) as incertezas das afluições futuras.

Com isso, há necessidade de se mitigar os riscos decorrentes da relação entre os estoques presentes, as afluições futuras e o não atendimento aos requisitos de carga do SIN. Neste sentido, é feita a previsão e a geração de cenários de afluições aos aproveitamentos hidroelétricos situados nos quatro subsistemas do SIN: Sudeste/Centro-Oeste, Sul, Nordeste e Norte.

Para o processo de planejamento do SIN, no horizonte de até um mês à frente, as previsões de vazão para cada usina são obtidas a partir da utilização de modelos autorregressivos do tipo vazão-vazão e modelos chuva-vazão, que podem ser de base física, autorregressivos ou baseados em inteligência artificial. Para cada semana operativa é atribuído um único valor de vazão natural para cada aproveitamento hidroelétrico. No horizonte temporal acima de um mês aumentam as incertezas de previsão das afluições, sendo então necessária a utilização de séries sintéticas de afluição, obtidas a partir da utilização de modelos estocásticos autorregressivos do tipo vazão-vazão. Estes modelos têm como objetivo gerar séries sintéticas, que na realidade são possíveis realizações de um determinado processo estocástico, como é o caso do regime de vazões de uma determinada bacia hidrográfica. As vazões destas séries são geradas a partir do sorteio de ruídos estatísticos, obtidos da série temporal de cada usina e segundo um conjunto de formulações probabilísticas. Desta forma, são obtidas sequências de séries que se assemelhem àquelas que poderiam ser geradas pela natureza. Ou seja, dada a incerteza associada a este processo, obtém-se um conjunto de cenários de afluição que serão tratados de maneira diferenciada em cada etapa do processo de planejamento da operação do SIN. No entanto, esta geração de cenários de afluições não incorpora objetivamente nenhum tipo de informação climática.

5. ESTRATÉGIA METODOLÓGICA DAS MÚLTIPLAS ESCALAS TEMPORAIS

O resultado principal deste trabalho é a elaboração de um sistema de previsão, projeções e/ou cenarizações de vazões para diversos horizontes temporais.

A Figura 11 mostra as escalas temporais analisadas. Esta análise é realizada para todo o SIN, sendo a escala continental deste sistema um desafio metodológico. Além disso, essa estratégia é aplicada ao sistema Jaguaribe- Metropolitano.

A chamada variabilidade de curtíssimo prazo é aquela que ocorre num evento chuvoso de minutos, horas ou alguns dias, que podem determinar inundações e afetar populações. A previsão nesse intervalo de tempo pode condicionar a operação de comportas de reservatório e minimizar impactos de eventos extremos.

A variabilidade temporal sazonal (dentro do ano), chamada neste estudo de curto prazo, define o ciclo de ocorrência dos períodos úmidos e secos no qual a população e os usuários da água procuram conviver. Dentro deste âmbito está o ciclo de culturas agrícolas, alteração da paisagem e vegetação pela disponibilidade umidade, entre outros.

A escala de médio prazo corresponde a projeções e/ou cenarizações de até 10 anos, está sofre influencia da variabilidade interanual, decadal e das mudanças climáticas.

A escala de longo prazo corresponde à escala de 30 anos, logo há influencia da variabilidade de baixa frequência e das mudanças climáticas.

Neste capítulo é mostrada sucintamente a estratégia metodológica utilizada em cada uma das escalas temporais. Destaca-se ainda, as diferentes escalas espaciais utilizadas neste estudo e os dados observados e de diferentes modelos que tornaram os experimentos possíveis.

Figura 11-Horizontes de previsão propostos.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

5.1. Obtenção dos dados

O histórico de precipitação foi obtido junto à Agência Nacional das Águas (ANA - <http://hidroweb.ana.gov.br/>), INMET (BDMEP), FUNCEME e SUDENE.

Também foram utilizados a base de dados observacionais provenientes da *University of East Anglia/Climate Research Unit* (CRU) (NEW et al., 1999 e NEW et al., 2001) (<http://badc.nerc.ac.uk/data/cru/>).

Para a escala de longo prazo foi feito um levantamento de todos os modelos de circulação geral do IPCC-AR5 que possuem as variáveis de entrada do modelo hidrológico disponíveis.

Para escala sazonal foi feito uma pesquisa de todos os modelos atmosféricos que possuem histórico de simulações ou previsões disponíveis para *download*, que sejam executados de forma operacional e que as suas rodadas operacionais também estejam disponíveis para um horizonte de seis meses, tanto de centros nacionais quanto

internacionais. A partir de análise estatísticas foi possível identificar para previsão sazonal o modelo ECHAM 4.5.

Para a escala de curtíssimo prazo foram analisados os modelos regionais de previsão numérica do tempo disponibilizados pela FUNCEME e os testados pela ONS.

5.2. Delimitação espacial do problema das múltiplas escalas temporais

Apesar do sistema de previsões e projeções referir-se a mesma área, os mesmos são analisados com subdivisões espaciais diferentes de acordo com a técnica e a escala temporal usada. Nesse sentido, essa seção sinaliza quais as subdivisões de área usadas para SIN e para o Ceará.

5.2.1. Setor elétrico

Nesta seção são mostradas as diferentes configurações espaciais em análise no experimento para o setor elétrico.

A primeira análise espacial corresponde à divisão do setor elétrico em 24 bacias contemplando praticamente todo território brasileiro e os principais aproveitamentos hidrelétricos do país. Esse tipo de análise foi utilizado para previsão sazonal e na escala de longo prazo com uso de modelos de circulação global. Maiores detalhes podem ser consultados na seção 5.2.1.1..

A segunda organização espacial do setor elétrico, mostrada na seção 5.2.1.2, corresponde ao uso dos chamados postos bases. No total de 88 postos, estes estão espalhados em todo território nacional e foram utilizados em alguns modelos estocásticos sazonais e para todos os modelos de médio prazo.

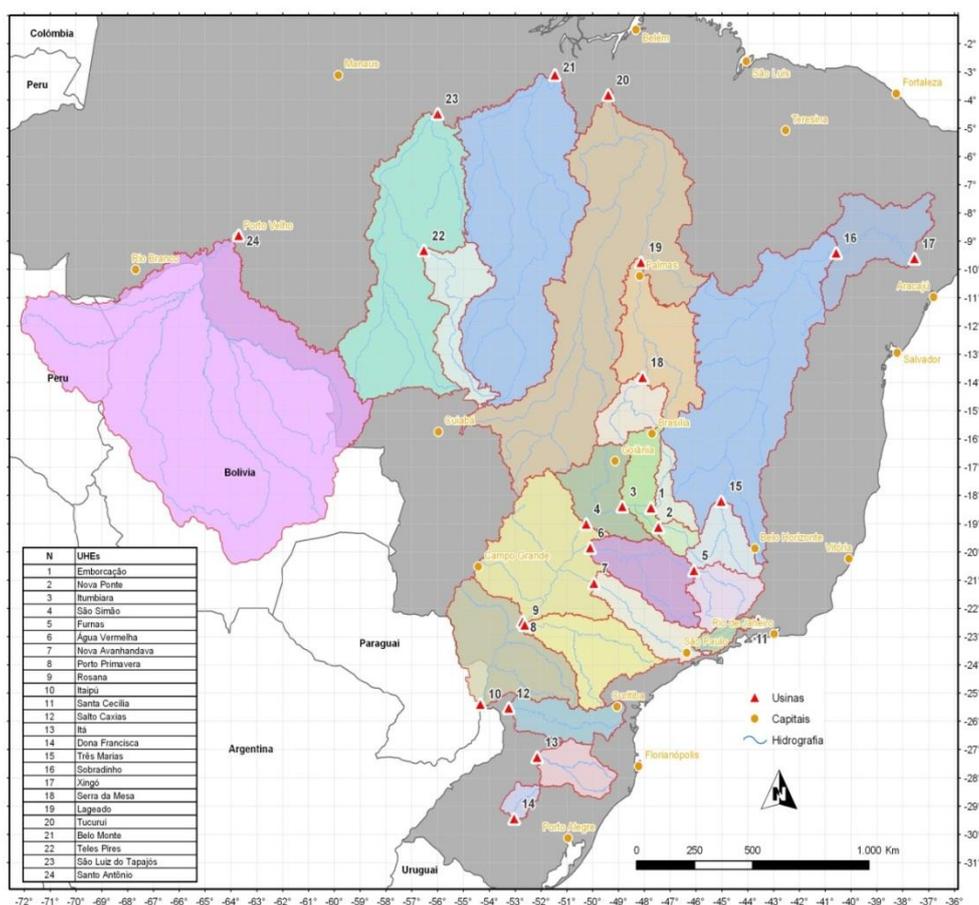
A seção 5.2.1.3 mostra o setor elétrico dividido em 21 trechos, essa configuração espacial é utilizada para escala de curtíssimo prazo.

5.2.1.1. Análise utilizando as bacias dos principais aproveitamentos hidroelétricos

Na Figura 12 são mostradas as bacias monitoradas pelo Operador Nacional de Sistemas (ONS). Com exceção da bacia de Santo Antônio, todas estão completamente inseridas em território brasileiro. O amplo sistema de produção e transmissão de energia

elétrica do Brasil – Sistema Interligado Nacional (SIN) – implica numa grande diversidade de regiões, que possuem influencias climáticas de vários fenômenos meteorológicos. Devido a isso, várias bacias possuem comportamentos sazonais distintos (conforme Figura 10), a fim de se aproveitar ao máximo os recursos energéticos existentes no País e a sazonalidade hidrológica própria de cada região. Assim, o sistema é dividido em quatro subsistema: Região Sudeste/Centro-Oeste, Região Sul, Região Norte e Região Nordeste. Estes subsistemas são interligados por uma extensa malha de transmissão que possibilita a transferência de excedentes energéticos e permite a otimização dos estoques armazenados nos reservatórios das usinas hidroelétricas. Na Tabela 2 são mostrados os aproveitamentos utilizados na análise e suas respectivas potências instaladas.

Figura 12-Bacias do setor elétrico brasileiro utilizadas no trabalho.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Tabela 2- Potência instalada nas bacias utilizadas no experimento.

Aproveitamentos	Potência(MW)	Aproveitamentos	Potencia(MW)
Emborcação	1192	Três Marias	396
Nova Ponte	510	Sobradinho	1050
Itumbiana	2280	Xingó	3162
São Simão	1710	Serra da Mesa	1275
Furnas	1312	Lajeado	902
Água Vermelha	1396,2	Tucuruí	4215/4125*
N. Avandava	347,4	Belo Monte	194,5
Porto Primavera	1540	Teles Pires	1819,8
Rosana	372	S. L. Tapajós	
Itaipu	7000/7000*	Santo Antônio	3151,2
Santa Cecília			
Salto Caxias			
Ita	1450		
D. Francisca	125		

Fonte: ONS.

5.2.1.2. Postos Base (PB)

O ONS trata os aproveitamentos hidroelétricos do SIN como postos fictícios, estes podem representar reservatórios de acumulação de usinas hidroelétricas, usinas a fio d'água, grupo de usinas agregadas, usinas considerando suas bacias hidrográficas de forma integral ou parcial, usinas com bacias hidrográficas sob influência de reservatórios a montante ou entrada/saída de vazões pontuais (ALEXANDRE, 2012). Os postos fictícios podem ser também usinas planejadas ou em construção para verificação do seu comportamento individual e inserida no Sistema. Até o fim de 2010 o SIN contava com 206 postos fictícios de acordo com ONS.

A partir das metodologias e/ou critérios utilizados na previsão de vazões, e levando em consideração a estrutura correlacional das vazões naturalizadas para os postos fictícios, o ONS adotou a realização de previsão de vazões para um subconjunto de aproveitamentos hidroelétricos considerados representativos das diferentes bacias, denominados de Postos Base (PB's) (ALEXANDRE, 2012). No restante dos postos fictícios, as vazões são previstas através de regressões lineares mensais a partir dos

dados previstos nos PB's, complementando assim as previsões de vazões em todo o SIN.

O ONS trabalha atualmente com um número total de 88 PB's representativos dos diversos regimes hidrográficos regionais encontrados em território brasileiro. Nesta tese foram utilizados como dados amostrais mensais os 88 PB's. Esses PB's são relacionados na Tabela 3 e sua distribuição espacial é apresentada na Figura 13.

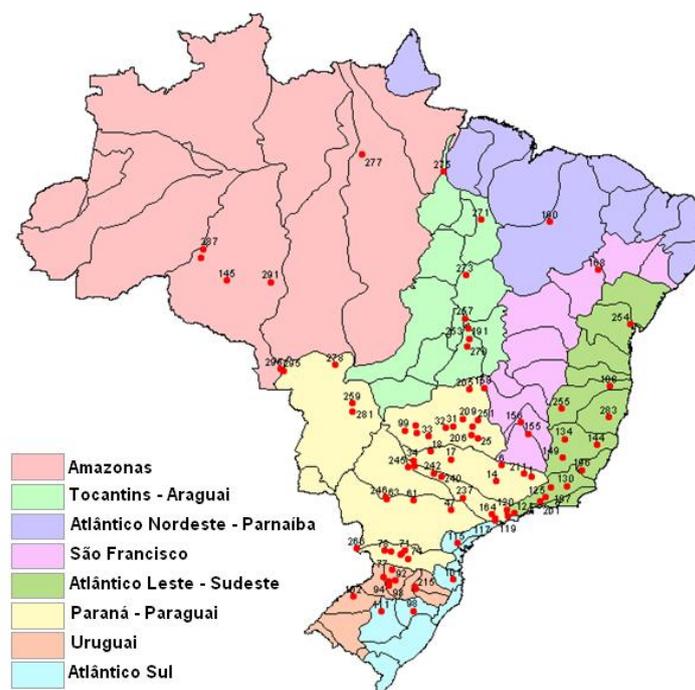
Tabela 3-Postos Bases utilizados na análise de previsão de vazões. Os valores entre parênteses representam os indicadores de postos fictícios do ONS

Identificador		Nome do Posto Base	Identificador		Nome do Posto Base
PB	ONS		PB	ONS	
1	1	Camargos (1)	45	254	Pedra do Cavalo (254)
2	6	Furnas (6)	46	168	Sobradinho Incremental (168)
3	14	Caconde (14)	47	259	Itiquira I e II (259)
4	17	Marimbondo (17)	48	278	Manso (278)
5	18	Água Vermelha (18)	49	281	Ponte de Pedra (281)
6	24	Emborcação (24)	50	295	Jauru (295)
7	25	Nova Ponte (25)	51	296	Guaporé (296)
8	31	Itumbiara (31)	52	190	Boa Esperança (190)
9	32	Cachoeira Dourada (32)	53	191	Cana Brava (191)
10	33	São Simão (33)	54	253	São Salvador (253)
11	34	Ilha Solteira (34)	55	257	Peixe Angical (257)
12	99	Espora (99)	56	270	Serra da Mesa (270)
13	117	Guarapiranga (117)	57	271	Estreito Tocantins (271)
14	119	Billings + Pedras (119)	58	273	Lajeado (273)
15	120	Jaguari (120)	59	275	Tucuruí (275)
16	121	Paraibuna (121)	60	145	Rondon II (145)
17	155	Retiro Baixo (155)	61	277	Curuá-Una (277)
18	156	Três Marias (156)	62	279	Samuel (279)
19	158	Queimado (158)	63	287	Santo Antonio (287)
20	160	Alto Tietê (160)	64	291	Dardanelos (291)
21	164	Edgard de Souza S/Tribut. (164)	65	266	Itaipu (266)
22	205	Corumbá IV (205)	66	246	Porto Primavera (246)
23	206	Miranda (206)	67	47	A.A. Laydner (47) – Jurumirim
24	209	Corumbá I (209)	68	61	Capivara (61)
25	211	Funil-Grande (211)	69	63	Rosana (63)
26	237	Barra Bonita (237)	70	115	Gov. Parigot de Souza (115)
27	240	Promissão (240)	71	71	Santa Clara PR (71)
28	242	Nova Avanhandava (242)	72	72	Fundão (72)
29	243	Três Irmãos (243)	73	73	Desvio Jordão (73) – Natural
30	245	Jupia (245)	74	74	Foz Do Areia (74)
31	247	Caçu (247)	75	76	Segredo (76)
32	251	Serra do Facão (251)	76	77	Salto Santiago (77)
33	294	Salto (294)	77	78	Salto Osório (78)
34	125	Sta. Cecília (125)	78	92	Ita (92)
35	130	Ilha dos Pombos (130)	79	93	Passo Fundo (93)
36	134	Salto Grande (134)	80	94	Foz do Chapecó (94)
37	144	Mascarenhas (144)	81	98	Castro Alves (98)
38	149	Candongá (149)	82	101	Salto Pilão (101)
39	188	Itapebi (188)	83	102	São José (102)

40	196	Rosal (196)	84	111	Passo Real (111)
41	197	Picada (197)	85	215	Barra Grande (215)
42	201	Tocos (201)	86	216	Campos Novos (216)
43	255	Irapé (255)	87	220	Monjolinho (220)
44	283	Santa Clara MG (283)	88	286	Quebra Queixo (286)

Fonte: Alexandre (2012).

Figura 13-Distribuição espacial dos Postos Base utilizados na análise de previsão de vazão.



Fonte: Alexandre (2012)

5.2.1.3. Análise utilizando as bacias que compõem o SIN

Na Figura 14 e Tabela 4 são mostradas as bacias e/ou sub-bacias (ou trechos) utilizadas para avaliação dos modelos numéricos de previsão do tempo, totalizando 21 regiões.

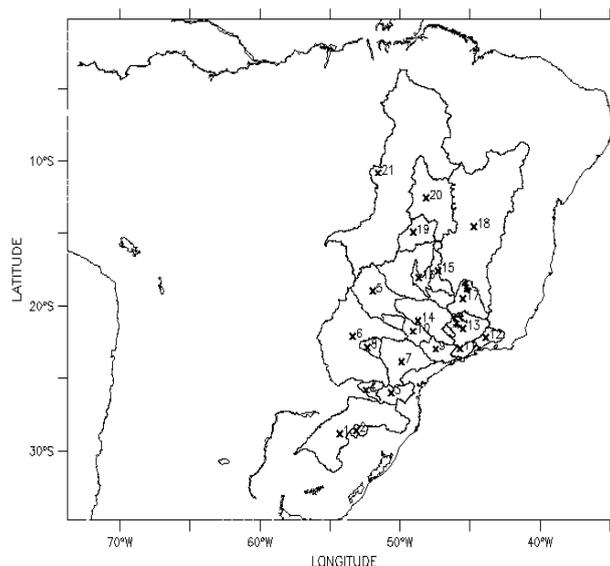
Tabela 4-Bacias do setor elétrico do Brasil selecionadas para avaliação dos modelos numéricos de previsão do tempo.

Bacia	Sub-bacias ou trechos	Nº
Uruguai	-	1
Jacuí	-	2
Iguaçu	Montante - Foz do Areia	3
	Jusante - Foz do Areia	4
Paraná	Montante - Jupia	5
	Jusante - Jupia	6

Paranapanema	Montante - Capivara	7
	Jusante - Capivara	8
Tietê	Montante - Barra Bonita	9
	Jusante - Barra Bonita	10
Paraíba do Sul	Montante - Funil	11
	Jusante - Funil	12
Grande	Montante - Furnas	13
	Jusante - Furnas	14
Paranaíba	Montante - Emborcação	15
	Jusante - Emborcação	16
São Francisco	Montante - Três Marias	17
	Três Marias - Sobradinho	18
Tocantins	Montante - Serra da Mesa	19
	Serra da Mesa - Lajeado	20
	Lajeado - Tucuruí	21

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 14- Bacias ou trechos selecionados para a avaliação, com seu respectivo número, designado na Tabela 4.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

5.2.2. Ceará- sistema Jaguaribe-Metropolitano

Nesta seção são mostradas as diferentes escalas espaciais utilizadas para o a análise do Ceará.

A primeira análise espacial, apresentada na seção 5.2.2.1., mostra a disposição de 480 pluviômetros espalhados por todo o Estado. Estes foram interpolados para grades de modelos regionais e utilizados para verificação das previsões de tempo.

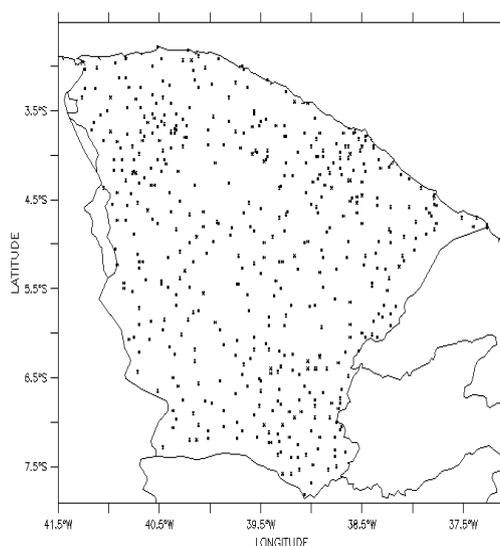
Na seção 5.2.2.2. o Ceará é dividido em oito regiões homogêneas, essa disposição espacial é também utilizadas para verificação das previsões de tempo dos modelos regionais.

A disposição espacial da seção 5.2.2.3. se refere a bacia que compõe o hidrossistema Jaguaribe-Metropolitano, sendo utilizado na escala temporal de longo prazo.

5.2.2.1. Ceará- Análise por ponto de grade

Para avaliar a destreza dos modelos de previsão do tempo, foram comparados os valores simulados de precipitação acumulada diária de 7 horas a 7 horas do dia seguinte com os dados de 480 pluviômetros espalhados por todo o estado do Ceará, conforme mostra a Figura 15, interpolada para a grade dos modelos regionais.

Figura 15- Localização dos pluviômetros usados no estudo.



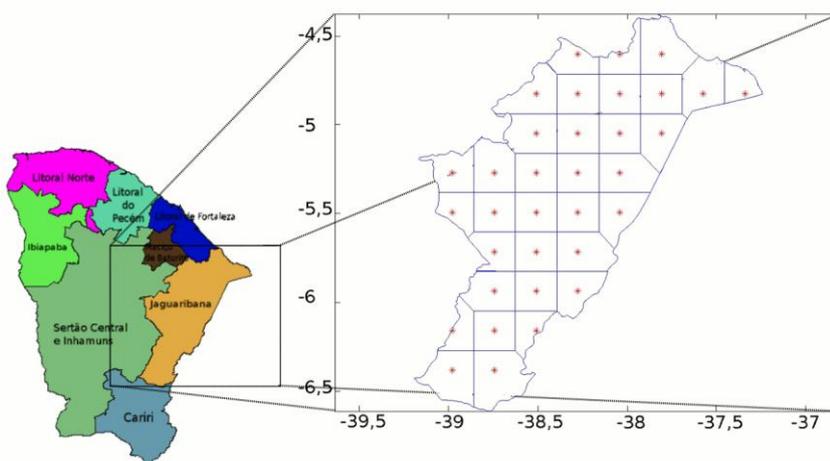
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A precipitação interpolada para os pontos da grade constitui-se de uma média ponderada das precipitações observadas (tal que as funções-peso são dadas conforme Silveira et al. (2011)).

5.2.2.2. Ceará- Análise por regiões Homogêneas

Para o cálculo da precipitação média, em alguns experimentos, empregou-se o método de *Thiessen* em cada região homogênea (conforme ilustra a Figura 16), que emprega a área de influência de cada ponto de grade.

Figura 16-Regiões homogêneas do Ceará, destaque para região de Jaguaribana (em vermelho os pontos de grade e em azul a área de influência de cada ponto).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

5.2.2.3. Ceará - bacias dos hidrossistemas

A terceira configuração espacial utilizada é a mostrada na Figura 9, que representa as bacias dos principais hidrossistemas do Ceará, sistema Jaguaribe-Metropolitano.

5.3. Estudo da Variabilidade hidrológica

A variabilidade climática decorre de um processo natural, mas atualmente pode estar sendo modificada. Ela pode ocorrer em diferentes padrões espaciais e temporais. A compreensão dos seus padrões de variação é decisiva para a formulação estratégias de gestão do risco climático nos recursos hídricos. Para tanto são utilizados métodos clássicos (médias e medianas móveis) e as transformadas de ondeletas e *Fourier*.

Especificamente, métodos hidrológicos estocásticos têm sido muito úteis para uma variedade de problemas de recursos hídricos onde a incerteza temporal precisa ser quantificada. Os modelos de séries temporais que foram desenvolvidos amplamente desde os anos 1960 têm sido utilizados geralmente assumindo que a série modelada vem de um processo estacionário ou ciclo estacionário. Assim, a literatura foi desenvolvida em torno de modelos auto-regressivos de média móvel e suas extensões para considerar a sazonalidade através de termos periódicos (KWON *et al.*, 2007; KEPPELNE e LALL,1996) .

No entanto, como o número de registros tem aumentado, os hidrólogos tem tomado conhecimento da estrutura de baixa frequência (por exemplo, tais oscilações ENSO e PDO) do clima e associado a série histórica hidrológica (KEPPENNE e LALL, 1996). Com isso, para compreender a variabilidade climática, neste estudo, foi considerado um modelo que utiliza esta estrutura de baixa frequência das séries históricas. Este modelo é o WARM (*Wavelet autoregressive model*),sendo usado para a análise das projeções de médio prazo.

5.4.Previsão em multi-escalas

Esta seção apresenta a metodologia utilizada nas diferentes escalas temporais.

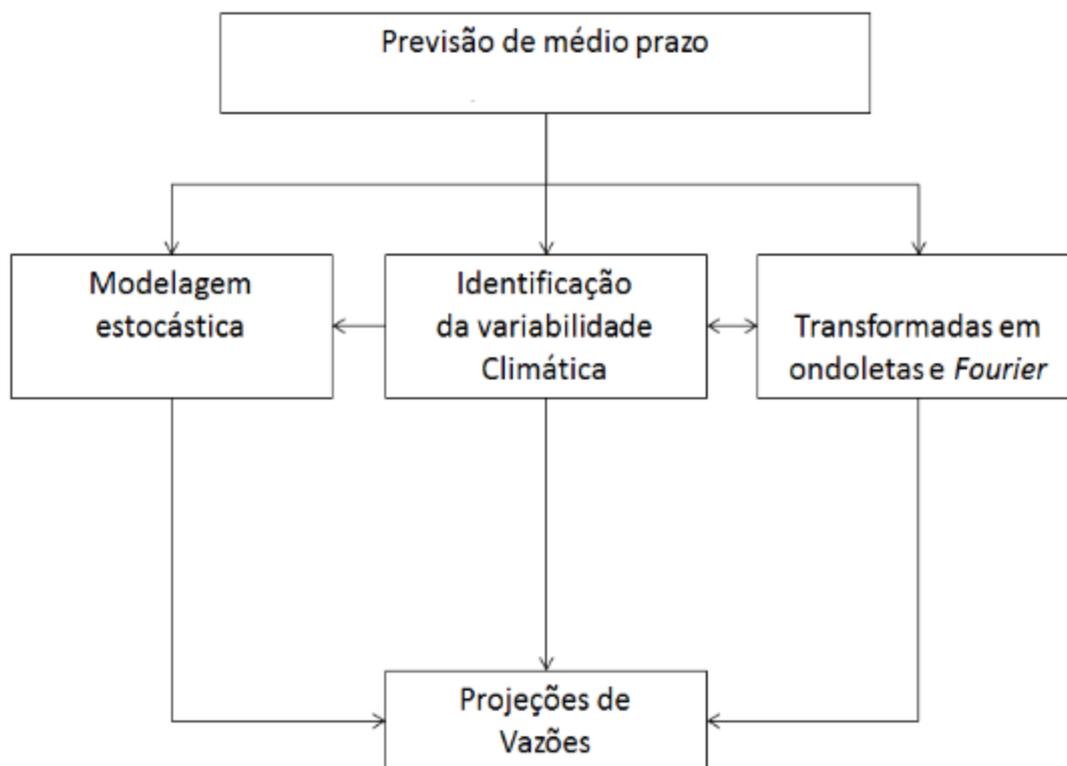
5.4.1. Projeções de longo prazo

Para análise de longo prazo são considerados a análise da variabilidade da série temporal e o uso dos modelos do IPCC-AR5, conforme mostra o capítulo 6.

5.4.2. Projeções de médio prazo

Na Figura 17 é mostrado o esquema contendo o sistema de projeções de médio prazo, forma usados modelos estocásticos, identificação da variabilidade climática e modelos baseados na transformada de Fourier e ondeletas.

Figura 17-Sistema de previsão proposto para escala temporal de médio prazo



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

5.4.3. Previsão de Curto prazo

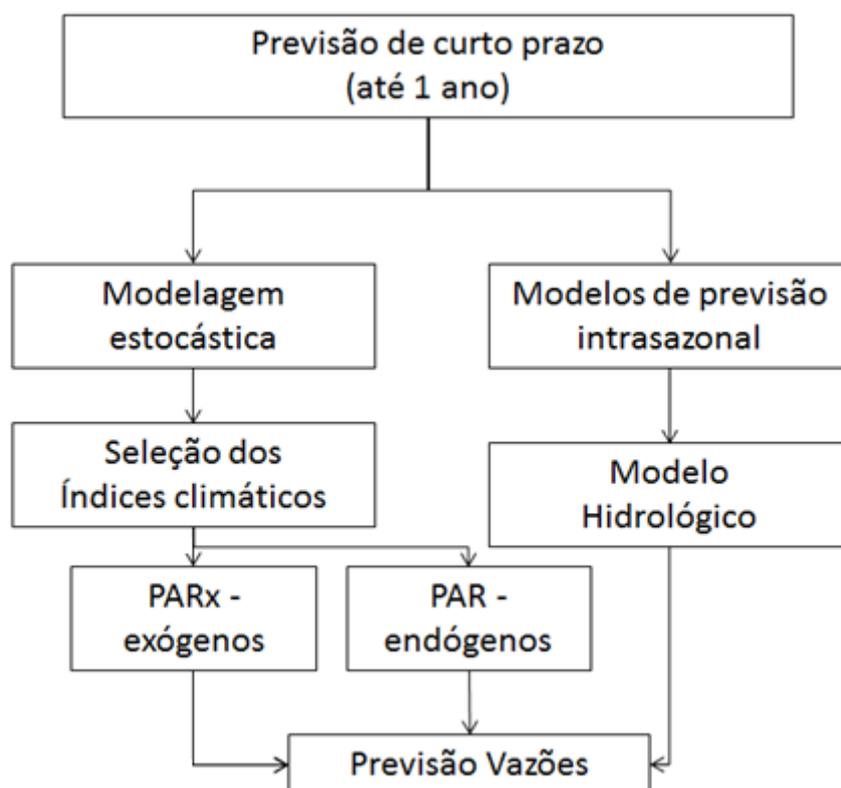
Séries temporais com intervalo de tempo menor que um ano, tais como séries mensais, têm como característica o comportamento periódico das suas propriedades probabilísticas, como exemplo a média, a variância, a assimetria e a estrutura de autocorrelação. A análise deste tipo de série pode ser feita pelo uso de formulações autorregressivas cujos parâmetros apresentam um comportamento periódico. Ou ainda, através do uso de modelos atmosféricos globais e/ou regionais para posterior entrada no modelo hidrológico. Os detalhes desse horizonte de previsões podem ser visualizados na Figura 18.

Dentre os modelos hidrológicos conceituais disponíveis para a realização deste estudo, de distribuição livre e código aberto, destacam-se os modelos concentrado SMAP (LOPES et al., 1981) e o modelo semi-distribuído para Grandes Bacias – MGB (COLLISCHONN et al., 2007). No entanto, segundo Guilhon et al. (2007), apesar do modelo MGB possuir uma melhor representação dos processos dinâmicos da água no solo, ele requer um número muito maior de informações, e seus resultados para as

bacias dos rios Paraná e Paranaíba, que foram analisadas neste estudo, foram muito próximos dos resultados obtidos com as previsões do modelo SMAP, sendo o SMAP mais robusto e exige menos parâmetros. Sendo assim, o modelo SMAP foi o modelo escolhido para o desenvolvimento deste estudo.

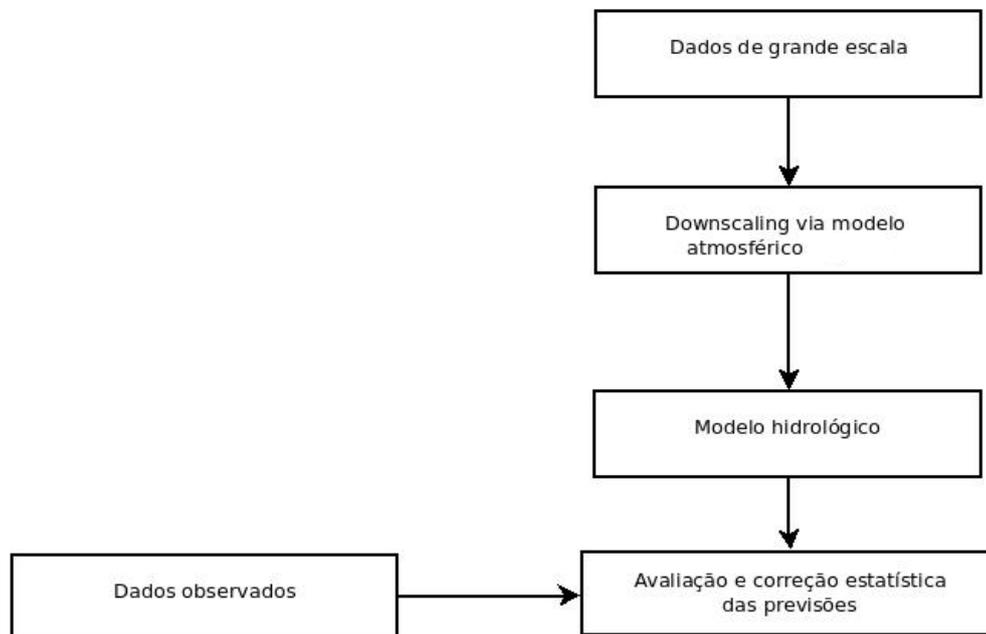
Na Figura 19 é mostrado o esquema do uso modelo hidrológico SMAP aplicado a dados de modelo atmosférico.

Figura 18-Sistema de previsão proposto para escala temporal de curto prazo.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 19- Diagrama esquemático do *downscaling* com acoplamento entre modelos hidrológicos e atmosféricos, modo unidirecional.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

5.4.4. Previsão de curtíssimo prazo

Para as previsões numéricas de tempo foram usados os dados dos modelos atmosféricos globais do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) (T126L28) ou *Global Forecast System* (GFS) com resolução espacial de 1° por 1°. Ambos são disponibilizados diariamente.

Nesta etapa, foi utilizado o *downscaling* dinâmico, usando os modelos regionais RAMS 6.0 (*Regional Atmospheric Modeling System*) (PIELKE et al., 1992; COTTON et al., 2003), WRF 3.1 (*Weather Research and Forecasting*) (SKAMAROCK et al., 2005) e ETA.

6. METODOLOGIA: ESCALA DE LONGO PRAZO

A variabilidade climática de baixa frequência e as mudanças causadas por processos naturais e fatores antrópicos podem resultar em grandes alterações no ciclo hidrológico. Essas alterações têm o potencial de alterar os valores sazonais de vazões e os padrões de variabilidade natural de uma dada região. Com intuito de analisar o impacto da variabilidade de baixa frequência e mudanças no clima no setor elétrico e Ceará os modelos globais do IPCC, referente ao quinto relatório, foram analisados para o século XX e XXI para diferentes cenários.

A metodologia desta escala temporal divide-se, basicamente, em cinco etapas. Os modelos globais são avaliados quanto à representação dos padrões de variação do clima no século XX. Em seguida obtêm-se as evapotranspirações a partir dos modelos do IPCC-AR5, usando o método de *Penman-Motheith* modificado. A terceira etapa consiste na obtenção das precipitações médias dos modelos para bacia de interesse, para posterior correção estatística para remoção de viés usando a função de distribuição gama. Já na quarta etapa obtêm-se as vazões usando o modelo hidrológico SMAP, tendo como dados de entrada as evapotranspirações e precipitações corrigidas. A quinta etapa consiste em avaliar os resultados das projeções utilizando algumas métricas, medidas de tendência e ondeletas. Desta forma, é possível quantificar a sensibilidade da oferta à variabilidade e (às) mudanças climáticas.

6.1. Dados observacionais

A base de dados observacionais é proveniente da University of East Anglia/Climate Research Unit (CRU) (NEW et al., 1999 e NEW et al., 2001), dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e os dados pluviométricos disponibilizados pela FUNCEME e SUDENE.

O conjunto de dados do CRU corresponde à precipitação mensal entre os anos de 1950 e 1999, com resolução de 0,5 graus para o continente, sendo usados para a correção estatística dos modelos globais do IPCC-AR5. Enquanto os dados do INMET correspondem às séries de precipitações mensais de 1997 a 2007, sendo utilizado para a validação e calibração dos parâmetros do modelo chuva-vazão do setor elétrico. Da mesma forma, os dados da FUNCEME e SUDENE foram utilizados para validação e calibração do modelo SMAP para as bacias do Ceará.

6.2. Modelos do CMIP5

Os dados provenientes do CMIP5 são resultados de simulações de modelos globais de alguns centros de pesquisa que contribuem para confecção dos relatórios dos IPCC (conforme Tabela 5), forçadas pelas concentrações observadas de gases de efeito estufa durante o século XX.

Tabela 5- Modelos do CMIP5 analisados.

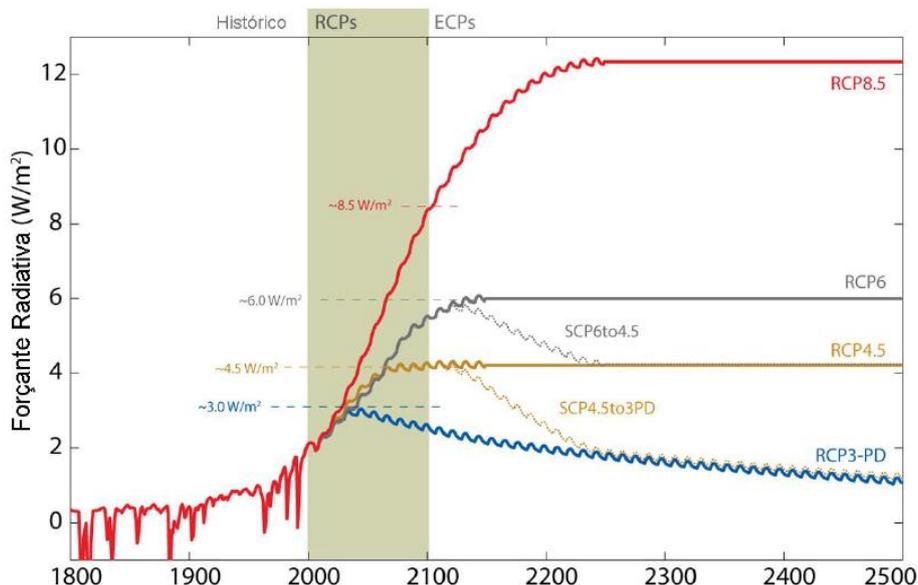
Modelos	Instituição
bcc-csm1-1	<i>Beijing Climate Center, China Meteorological Administration</i>
BNU-ESM	<i>College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University</i>
CanESM2	<i>Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis</i>
CESM1-BGC	<i>Community Earth System Model Contributors</i>
CSIRO-Mk3-6-0	<i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence</i>
GFDL-ESM2M	<i>NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory</i>
HadGEM2-AO	<i>National Institute of Meteorological Research/Korea Meteorological Administration</i>
HadGEM2-CC	<i>Met Office Hadley Centre</i>
HadGEM2-ES	<i>Met Office Hadley Centre</i>
IPSL-CM5A-LR	<i>Institut Pierre-Simon Laplace</i>
IPSL-CM5A-MR	<i>Institut Pierre-Simon Laplace</i>
MIROC5	<i>Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology</i>
MIROC-ESM_	<i>Max Planck Institute for Meteorology</i>

Fonte: <http://pcmdi3.llnl.gov/esgcat/home.htm> (10/01/2012)

Como parte da fase preparatória para o desenvolvimento dos novos cenários para o AR5 (quinto relatório do IPCC), foram criados os chamados RCPs (Representative Concentration Pathways), que servem como entrada para modelagem climática e química atmosférica nos experimentos numéricos do CMIP5. Os RCPs recebem seus nomes a partir dos níveis das forçantes radiativas, conforme relatado por cada equipe de modelagem elaboradora de cada RCP. Assim, RCP-X implica em um cenário no qual a forçante radiativa de estabilização ou de pico ou ao final do século XXI corresponde a $X \text{ W.m}^{-2}$. Na Figura 20 é mostrado o comportamento dos principais cenários do IPCC-

AR5: RCP8.5, RCP6, RCP4.5 e RCP3-PD. Neste trabalho foram usados os cenários RCP4.5 e RCP8.5 para análise das projeções do século XXI.

Figura 20 - Cenários do IPCC-AR5 e forçante radiativa antropogênica global para cada um deles.



Fonte: <http://www.pik-potsdam.de/~mmalte/rcps/>

6.3. Critérios de Avaliação do Desempenho dos modelos do IPCC quanto à representação da sazonalidade

Utilizou-se como critério de avaliação a representação da sazonalidade das precipitações, que é de grande relevância para a avaliação dos impactos do clima em recursos hídricos e agricultura, afinal o início do plantio das culturas e o regime fluvial são condicionados pela distribuição temporal das chuvas. Uma má representação dessa sazonalidade pode comprometer seriamente a avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre estas duas áreas importantes. Adicionalmente, pode-se avaliar que os totais mensais de precipitação e sua sazonalidade são considerados como indicativo da qualidade que o modelo tem de representar os sistemas geradores de chuvas e sua ocorrência.

Para avaliação sazonal dos modelos foi calculada a climatologia mensal média sobre a região de estudo para os modelos dos CMIP5 enumerados na Tabela 5 e as observações (CRU). Em seguida, foi feita uma comparação com base em alguns índices

estatísticos para que possam ser definidos que modelos apresentam melhor comportamento para as diferentes regiões.

As medidas estatísticas utilizadas, cujas definições estão indicadas a seguir, conforme sugerido por Silveira et al. (2013), são a raiz do erro quadrático médio da contribuição percentual mensal em relação às chuvas anuais ($RMSE_{PC}$) e a correlação de Pearson ($CORREL$) (WILKS, 1995).

A raiz do erro quadrático médio percentual ($RMSE_{PC}$) é a raiz quadrada da média das diferenças individuais quadráticas entre a contribuição percentual mensal das chuvas modeladas para os totais anuais e o valor correspondente nas observações, sendo definida pela equação:

$$RMSE_{PC} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{100.P_i}{\sum_{j=1}^n P_j} - \frac{100.A_i}{\sum_{j=1}^n A_j} \right)^2} \quad (1)$$

onde n são os meses, P é previsão de cada mês e A , a observação.

Valores grandes de $RMSE_{PC}$ representam erros maiores nos campos previstos e valores próximos de zero indicam uma previsão quase perfeita. Elevando ao quadrado o termo da diferença, o $RMSE_{PC}$ tende a dar maior peso às grandes discrepâncias entre os campos observados e previstos.

A correlação pode assumir valores entre -1 e 1 que indica, respectivamente, perfeita anticorrelação e perfeita correlação, com a ausência total de correlação correspondendo a um valor nulo. Este índice tem a capacidade de detectar correspondência de fase entre as séries, sendo, por construção, insensível a erros de viés. É dado conforme a equação 2.

$$CORREL = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (A_i - \bar{A})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^{i=n} (A_i - \bar{A})^2}} \quad (2)$$

Após o cálculo desses dois índices é calculado um índice de avaliação ponderada para que os modelos possam ser classificados, tal que :

$$AVAL_s = \alpha_c \left(\frac{CORREL - CORREL_{MIN}}{CORREL_{MAX} - CORREL_{MIN}} \right) + \alpha_r \left(\frac{RMSE_{PC_{MAX}} - RMSE_{PC}}{RMSE_{PC_{MAX}} - RMSE_{PC_{MIN}}} \right) \quad (3)$$

tal que

$$\alpha_c + \alpha_r = 1 \quad (4)$$

Sendo, $CORREL_{MIN}$ a menor correlação obtida entre os modelos do IPCC e $CORREL_{MAX}$ a máxima correlação, assim como $RMSE_{PC_{MAX}}$ é o máximo erro quadrático médio percentual dos modelos do IPCC e $RMSE_{PC_{MIN}}$, o mínimo.

As variáveis α_c e α_r assumem valores entre 0 e 1 (conforme equação 4), para $\alpha_c > \alpha_r$, portanto, a correlação exerce maior influencia na avaliação do modelo, enquanto para $\alpha_r > \alpha_c$, o $RMSE_{PC}$ dos modelos possui maior peso na avaliação. Já se $\alpha_r = \alpha_c = 0,5$ as duas métricas utilizadas neste trabalho exercem o mesmo efeito sobre o valor de $AVAL_s$. Nos casos extremos, ao se considerar $\alpha_r = 0$ então $\alpha_c = 1$, apenas a correlação será usada na avaliação dos modelos, assim como, se $\alpha_r = 1$ então $\alpha_c = 0$, apenas o $RMSE_{PC}$ será usado na avaliação dos modelos.

Além da avaliação sazonal dos modelos é possível realizar uma avaliação que contempla os demais padrões de variação climática. Está é mostrada no Anexo I para alguns modelos do CMIP5

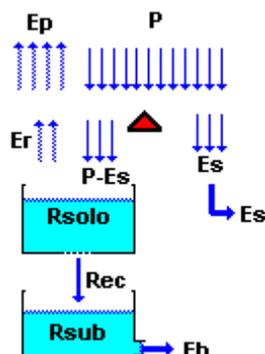
6.4. O modelo hidrológico SMAP

O modelo chuva-vazão SMAP (LOPES *et al.*, 1981) é do tipo conceitual, determinístico e de estrutura concentrada. Este modelo faz parte da grande família dos modelos hidrológicos de cálculo de umidade do solo. Sua estrutura é relativamente simples, cujos parâmetros são relacionados com parâmetros físicos médios da bacia.

O SMAP, em sua versão mensal, utiliza em seu esquema conceitual de dois reservatórios lineares representando o solo (camada superior) e o aquífero, como pode ser visualizado na Figura 21. A cada evento de precipitação (P) é realizado um balanço de massa. Uma parcela de (P) é transferida como escoamento superficial (E_s). Este cálculo é feito através da equação do “*Soil Conservation Service*” (SCS) para escoamento superficial. A lâmina restante da precipitação subtraída do escoamento superficial ($P - E_s$) sofre perda por evaporação em nível de evaporação potencial (E_p), logo a lâmina remanescente ($P - E_s - E_p$) é adicionada a um reservatório que representa a camada superior do solo. Neste, a umidade é atualizada ao longo do tempo através das perdas por evapotranspiração real (E_r) que dependem do nível do reservatório (R_{solo}) e da capacidade de saturação do solo (Sat). Outra saída deste reservatório é a recarga no reservatório subterrâneo (Rec) onde é utilizado o conceito de capacidade de campo (Capc) para determiná-la. Este terceiro reservatório também é linear e o nível de água existente (R_{sub}) é deplecionado a uma taxa constante de recessão do escoamento básico

(K), resultando em escoamento básico (Eb). A soma do escoamento superficial e básico fornece a vazão no ponto de controle da bacia.

Figura 21 - Esquema conceitual do modelo chuva-deflúvio SMAP.



Fonte: LOPES *et al.*(1981)

O SMAP possui seis parâmetros: capacidade de saturação do solo (Sat); parâmetro que controla o escoamento superficial (PEs); coeficiente de recarga, parâmetro relacionado com a permeabilidade na zona não saturada do solo (Crec); taxa de deplecionamento (K) do nível (Rsub) que gera o escoamento de base (Eb); taxa de umidade do solo inicial (TUin) que determina o nível inicial do reservatório (Rsolo); valor do escoamento de base inicial (EBin).

Nesta aplicação o modelo SMAP teve desempenho satisfatório. Em intervalo de tempo mensal o modelo trabalha com a chuva acumulada de cada mês, sendo mais relevante o aspecto quantitativo da chuva média na bacia do que a distribuição espacial de cada evento de chuva. Por esta razão seu uso em grandes bacias é adequado e os resultados correspondem bem às características médias das bacias. A calibração para o SIN foi efetuada para o período setembro de 1997 a agosto de 2002 e a validação para setembro de 2002 a agosto de 2007.

Para o uso deste modelo chuva-vazão as precipitações dos modelos do IPCC-AR5 são corrigidas estatisticamente usando a função de distribuição gama (conforme seção 6.5) e evaporações de entrada são obtidas a partir do método de Penman-Monteith (conforme seção 6.6).

6.5. Correção estatística das precipitações via Função de distribuição de probabilidade gama

Um modelo probabilístico muito atraente para a representação de variáveis hidrológicas que apresentam versatilidade de formas e coeficientes de assimetria das

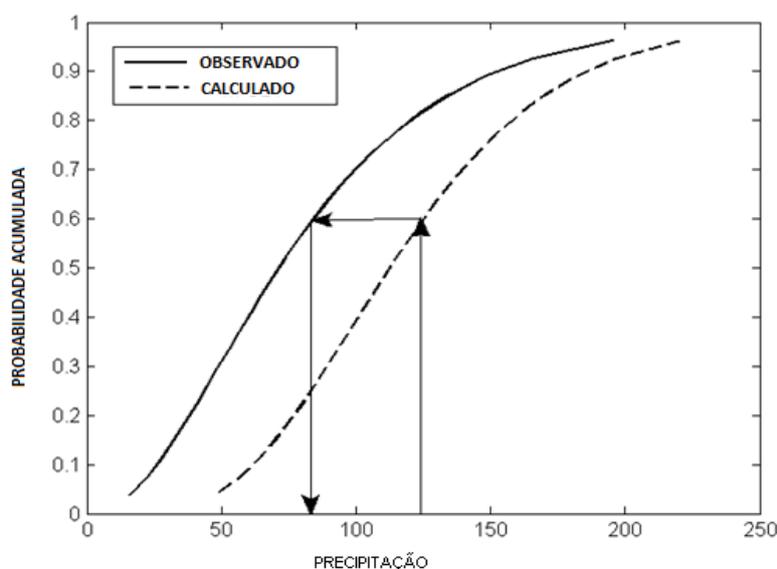
variáveis é a distribuição gama. Esse modelo possui numerosas aplicações bem sucedidas em modelagem de vazões, porém, a distribuição gama também pode ser aplicada para análises de precipitação de duração diárias, semanais, mensais e anuais. Para o presente trabalho a correção estatística via função gama é feita nas séries de precipitações mensais dos modelos do CMIP5.

Para a correção gama foi utilizado um ajuste de viés seguindo os seguintes passos:

- 1º - Ajuste da distribuição gama para os dados observados;
- 2º - Ajuste da distribuição gama para os dados de precipitação dos modelos para o século XX para identificar o problema no ajuste do viés;
- 3º - Ajuste da distribuição gama para os dados de precipitação dos modelos do século XXI;
- 4º - Correção das precipitações do século XX e XXI.

A Figura 22 descreve a relação entre a probabilidade acumulada e a precipitação. O mapeamento da probabilidade foi utilizado para correção do viés da precipitação mensal baseando-se em duas funções de distribuição cumulativa (CDF), sendo uma a função obtida por meio de dados modelados e a outra função obtida por meio de dados observados. Cada CDF encaixa-se com uma distribuição gama, salvando os parâmetros de forma e escala.

Figura 22 - Correção de viés usando a função de distribuição gama para precipitação.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Para a correção das precipitações modeladas são considerados doze ajustes gama, um para cada mês do ano. Por exemplo, todas as precipitações que ocorreram ao

longo de cada janeiro (de 1950 a 1999) são agrupadas e são gerados os parâmetros de correção. Em seguida, o mesmo procedimento é realizado para todos os meses.

6.6. Modelo de Estimativa de Evapotranspiração Penman-Monteith

Para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o) é usado o método de Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998). Segundo este método a evapotranspiração de referência é dada segundo a equação (5):

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (5)$$

Onde: ET_o é a evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹); R_n é a radiação líquida na superfície das culturas (MJ m² dia⁻¹); G é o fluxo de calor no solo (MJ m² dia⁻¹); T é a média diária da temperatura do ar a 2 m de altura (°C); u₂ é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s⁻¹); e_s é a pressão da saturação de vapor (kPa); e_a é a pressão de vapor atual (kPa); (e_s - e_a) é o déficit de saturação de vapor (kPa); Δ é a inclinação da curva da pressão de vapor *versus* temperatura (kPa °C⁻¹); γ (kPa °C⁻¹) é a constante psicrométrica.

A velocidade do vento, a radiação líquida, a pressão de vapor real ou atual e a temperatura máxima e mínima formam um conjunto de dados básicos para estimativa da ET_o Penman-Monteith (ET_oPM). Através deste conjunto de dados é possível estimar diversas variáveis. Conforme equações a seguir.

A constante psicrométrica é dada pela Equação (6):

$$\gamma = 0,665 \times 10^{-3} P_{atm} \quad (6)$$

Sendo a pressão atmosférica (P_{atm}) dada pela Equação 7 (em kPa):

$$P_{atm} = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad (7)$$

Onde z é a altitude em relação ao nível do mar (m). Δ é dado pela Equação 8,

$$\Delta = \frac{4098 \left(0,6108 * \exp \frac{17,27 * T}{T + 237,3} \right)}{(T + 237,3)^2} \quad (8)$$

exp é a base do logaritmo natural e T é a média da temperatura do ar (°C), que pode ser calculada pela equação 9,

$$e^\circ(T) = 0,6108 * \exp \frac{17,27 * T}{T + 237,3} \quad (9)$$

Onde $e^\circ(T)$ é a pressão de saturação de vapor (kPa) em determinada temperatura do ar T (°C). A pressão de vapor na saturação, Equação 10,

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{max}) + e^\circ(T_{min})}{2} \quad (10)$$

e

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (11)$$

Onde R_{ns} é a radiação de onda curta líquida que chega à superfície terrestre ($\text{MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$); R_{nl} é a radiação de onda longa líquida que sai da superfície terrestre ($\text{MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$).

$$R_{ns} = 1 - \alpha(R_s) \quad (12)$$

Onde α é o albedo ou coeficiente de reflexão da cobertura vegetal, o qual assume o valor de 0,23 para a grama de referência hipotética (adimensional);

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{max}K^4 + T_{min}K^4}{2} \right) (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (13)$$

Onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$); $T_{máx}K$ é a temperatura máxima absoluta durante período de 24 h (K); $T_{mín}K$ é a temperatura mínima absoluta durante período de 24 h (K); R_s é a radiação solar medida ou calculada ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_{so} é a radiação de céu claro medida ou calculada ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), e calculada pela Equação 10:

$$R_{so} = (0,75 + 2 * 10^{-5}z)R_a \quad (14)$$

Onde z é a altitude da estação em relação ao nível do mar (m) e R_a é a radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

Allen *et al.* (1998) assume que a temperatura mínima é muito próxima do ponto de orvalho o ar deve está próximo da saturação com vapor d'água e a umidade relativa deve está muito próxima de 100%. Esta temperatura é utilizada para estimativa da pressão de vapor real (e_a), neste caso:

$$e_a = e^\circ(T_{min}) = 0,611 \exp \left(\frac{17,27T_{min}}{T_{min} + 273,3} \right) \quad (15)$$

Onde e_a é a pressão de vapor real (kPa); ($T_{mín}$) é a pressão de saturação de vapor na temperatura mínima (kPa) e $T_{mín}$ é a temperatura mínima (°C);

Segundo Allen *et al.*(1998), o grau de cobertura de nuvens de uma localidade é que estabelece a diferença entre a temperatura máxima e mínima. Com pouca cobertura de nuvens as temperaturas são mais elevadas durante o dia em razão da transparência atmosférica à radiação solar que chega, e temperaturas mais baixas a noite em razão de menos radiação de onda longa refletida que é absorvida pela atmosfera. Isto proporciona

um maior Tmax e um menor Tmin. Já em dias nublados, Tmax é um pouco menor por conta da radiação absorvida e refletida pelas nuvens. Da mesma forma, Tmin também será um pouco mais alta, devido à cobertura de nuvens que opera como uma coberta que diminui a radiação de onda longa líquida refletida. Assim, o cálculo da radiação baseia-se pela diferença entre as temperaturas máxima e mínima:

$$R_s = k_{R_s} \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_a \quad (16)$$

Onde R_s é a radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_a é a radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); Tmax é a temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$); Tmin é a temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$) e k_{R_s} é o coeficiente de ajuste ($^{\circ}\text{C}^{-0.5}$);

6.6. Análise das Projeções

Nesta seção apresenta as medidas estatísticas utilizadas para análise das séries temporais do modelos globais do CMIP5.

6.6.1. Cálculo das Anomalias Médias Anuais

Para o cálculo da anomalia na média anual considerou-se a Equação 17, dada pela diferença entre a média anual o cenário do século XXI e média anual do cenário histórico sobre a média anual do século XX:

$$A_{\text{anual}} = \frac{(P_{\text{XXI}}^a - P_{\text{XX}}^a)}{P_{\text{XX}}^a} \cdot 100 \quad (17)$$

Onde P_{XXI}^a é média da precipitação anual para o cenário do século XXI e P_{XX}^a é a média da precipitação anual para o cenário histórico.

6.6.2. Análise de tendência das precipitações anuais

Para analisar a tendência do século XXI as séries de precipitações anuais dos cenários do século XXI foram padronizadas com base nas características da série do cenário histórico de 1950 a 1999. Essa normalização segue a equação 18:

$$Z = \frac{X_{\text{XXI}}^j - \bar{X}_{\text{xx}}}{\sigma_{\text{xx}}} \quad (18)$$

Onde Z é a precipitação do cenário do século XXI normalizada, X_{XXI}^j a precipitação anual dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 para um ano j , \bar{X}_{xx} a precipitação anual média do cenário histórico na série de 1950 a 1999 e σ_{xx} o desvio padrão da série de precipitações anuais do cenário histórico.

As metodologias de avaliação de tendência/variabilidade podem ser divididas em dois tipos quanto à sua abordagem: Métodos Clássicos e Métodos Modernos.

Neste trabalho foram utilizados os métodos clássicos de Mann-Kendall-Sen, Média Móvel de 10 anos e Regressão Linear, e dentre os métodos modernos, utilizou-se a análise de ondeletas (*wavelets*). Todos os métodos citados são descritos nas seções 6.6.2.1. e 6.6.2.2..

6.6.2.1. Métodos Clássicos

Nos testes de tendência, segundo Xu et al. (2003), a hipótese nula H_0 ocorre na ausência de tendência na série histórica. Já a hipótese não nula (H_1) ocorre quando existe uma tendência na série.

Os testes estatísticos podem ser classificados em paramétricos e não paramétricos (NAGHETTINI e PINTO, 2007). Os testes paramétricos se baseiam na hipótese de que os dados amostrais foram obtidos a partir de uma população cuja distribuição seja conhecida ou previamente especificada. Já os testes não-paramétricos não necessitam da especificação do modelo distributivo da população, sendo formulados com base nas características da amostra. Segundo Xu et al. (2003), os testes não-paramétricos são mais robustos.

Ainda segundo Xu et al. (2003), a utilização de testes paramétricos e não-paramétricos dependem das características dos dados em que se está trabalhando.

O modelo de regressão linear é dado pela equação 19 (HELSEL e HIRSCH, 2002):

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \varepsilon_i \quad (19)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Onde: y_i é a i -ésima observação da variável dependente;

x_i é a i -ésima observação da variável independente;

β_0 é a interceptador;

β_1 é a inclinação;

ε_i é o erro aleatório ou residual para a i -ésima observação;

n é o tamanho da amostra.

O erro ε_i depende da variabilidade natural do sistema, possui média igual a zero e variância (σ^2) constante, portanto, ε_i é independente de x_i .

A regressão linear é obtida estimando-se os valores de β_0 e β_1 através de alguma técnica de ajustamento. Segundo Naghettini e Pinto (2007), o método dos mínimos quadrados é um dos procedimentos mais adequados para este ajuste.

Se uma tendência linear está presente em uma série, a declividade (mudança por unidade de tempo) pode ser estimada usando o método não-paramétrico desenvolvido por Sen (1968).

No método de Sen são computadas a declividade de N pares de dados através da equação 16:

$$Q_i = \frac{(x_j - x_k)}{(j - k)} \quad (20)$$

Para $i = 1, 2, \dots, N$.

Onde x_j e x_k são os valores de x nos períodos j e k respectivamente, com $j > k$. A mediana dos N valores de Q_i será a declividade de Sen. Se houver apenas uma referência em cada período de tempo, então:

$$N = \frac{n(n-1)}{2} \quad (21)$$

Onde n é o tamanho da série. Se N for ímpar, a declividade de Sen será:

$$Q_{\text{mediana}} = Q_{(N+1)/2} \quad (22)$$

Se N for par, a declividade de Sen será:

$$Q_{\text{mediana}} = \frac{[Q_{(N)/2} + Q_{(N+2)/2}]}{2} \quad (23)$$

O valor de Q_{mediana} é então testado através de um teste bicaudal com grau de confiança de $100(1 - \alpha) \%$ e a declividade estimada é obtida através de um teste não paramétrico.

O teste de tendência de Man-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975; KENDALL e GIBBONS, 1990) é um dos mais utilizados na avaliação de tendências de séries históricas naturais que se distanciam da distribuição normal, como a de qualidade da água, vazões, temperatura e precipitação (HAMED, 2009).

No teste de Mann-Kendall, também conhecido por Kendall's tau, assume-se que os dados estão aleatoriamente distribuídos, caso das séries históricas naturais.

O teste estatístico de Mann-Kendall é dado pela equação 24 (BURN e ELNUR, 2002):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n Sgn(X_j - X_i) \quad (24)$$

Onde X_i e X_j são valores sequenciais, n é o tamanho da série e

$$Sgn(\theta) = \begin{cases} +1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (25)$$

O teste de Mann-Kendall possui dois parâmetros importantes para a análise de tendência: o nível de significância α e a declividade β (BURN e ELNUR, 2002).

A declividade β é determinada por (HIRSCH et al., 1982):

$$\beta = \text{Mediana} \left[\frac{(X_j - X_i)}{(j - i)} \right] \quad (26)$$

para todo $i < j$

6.6.2.2. Análise da Transformada em Ondeletas

Para análise de tendência e do comportamento dos diferentes padrões de variações do clima foi utilizado a transformada em ondeletas.

A análise da transformada em ondeletas (*wavelets*) vem se tornando uma ferramenta bastante utilizada para a análise de variações locais de séries temporais, uma vez que os sistemas físicos apresentam características não-estacionárias de várias frequências (BOLZAN, 2004). A decomposição destas séries em espaços de tempo-frequência permite a determinação dos modos dominantes de variabilidade, bem como a variação destes modos no tempo (TORRENCE e COMPO, 1998).

A análise em ondeletas consiste em decompor um sinal a diferentes níveis de resolução, processo conhecido como multiresolução (BOLZAN, 2004).

Ainda segundo Bolzan (2004) a expansão em série de ondeletas e a transformada são dadas por:

$$\langle f, \Psi_{a,b} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (27)$$

Onde: $\Psi(t)$ é a função base geradora simples;

a é a variável de dilatação;

b é a variável de translação;

t é o tempo.

O termo ondeleta refere-se a um conjunto de funções com forma de pequenas

ondas gerada por dilatações e translações, de uma função base geradora (BOLZAN, 2004).

Existem dois tipos básicos de funções ondeletas: ondeletas contínuas e discretas. Dentre as contínuas, a mais comum e a utilizada neste estudo foi a ondeleta de Morlet, dada por:

$$\Psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2} \quad (28)$$

Onde: ω_0 é a frequência adimensional, que, no caso da ondeleta de Morlet, é igual a seis, de forma a satisfazer a condição de admissibilidade; e η é o parâmetro adimensional do tempo.

A função ondeleta de Morlet possui o parâmetro de frequência igual a 6.

Para avaliação e análise de tendência dos modelos foi calculado o espectro de energia global sobre as regiões de estudo para todas as rodadas dos modelos do IPCC e as observações. Em seguida, foram identificados os principais padrões de variação das séries observadas a partir do Espectro Global da Ondeleta e a partir disto foram executadas as seguintes etapas:

- decomposição do sinal para obter os coeficientes *wavelets* no domínio transformado. Para o caso da série observada de precipitação nas três regiões avaliadas, a decomposição foi igual à soma das bandas características no século XX e o resíduo. A partir da Equação 29, tem-se:

$$R(i) = z(i) - \sum_{i=1}^b B_b(i) \quad (29)$$

Onde: $z(i)$ é o valor da variável padronizada para o ano i ; $B_b(i)$ é o valor da banda b no ano i .

- análise e processamento dos coeficientes neste domínio;
- reconstrução do sinal a partir dos coeficientes modificados.

O processo de reconstrução foi repetido para os modelos do CMIP5 para as mesmas bandas observadas. Em seguida, foi feita análise do comportamento das bandas reconstruídas.

6.6.3. Seleção dos Agrupamentos (*Clusteres*)

Com intuito de identificar grupo de modelos que possuem cenarização semelhante para o século XXI foi utilizado a técnica de análise de agrupamento

Para análise de agrupamento foi utilizado o algoritmo iterativo proposto por Spath (1985) e Seber (1984). Este algoritmo através de diversas iterações minimiza a soma das distâncias euclidianas em relação a um ponto, chamado de centroide. Maiores detalhes podem ser consultados em Spath (1985) e Seber(1984). Para o cálculo dos clusters foi considerado a anomalia de vazões no período de 2010 a 2039 por bacias.

Originalmente, o método é composto por quatro passos:

- (1) Primeiramente defini-se k centroides para se iniciar o processo de partição;
- (2) Cada elemento do conjunto do conjunto de dados é, então, comparado com cada centroide inicial, através de uma medida de distância que, em geral, é a distância Euclidiana. O elemento é alocado ao grupo cuja distância é a menor;
- (3) Depois de aplicar o passo 2 para cada um dos n elementos amostrais, recalcula-se os valores dos centroides para cada novo grupo formado, e repete-se o passo 2, considerando os centroides destes novos grupos;
- (4) Os passos 2 e 3 devem ser repetidos até que todos os elementos amostrais estejam “bem alocados” em seus grupos , isto é, até que nenhuma realocação de elementos seja necessária.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES: ESCALA DE LONGO PRAZO - SIN

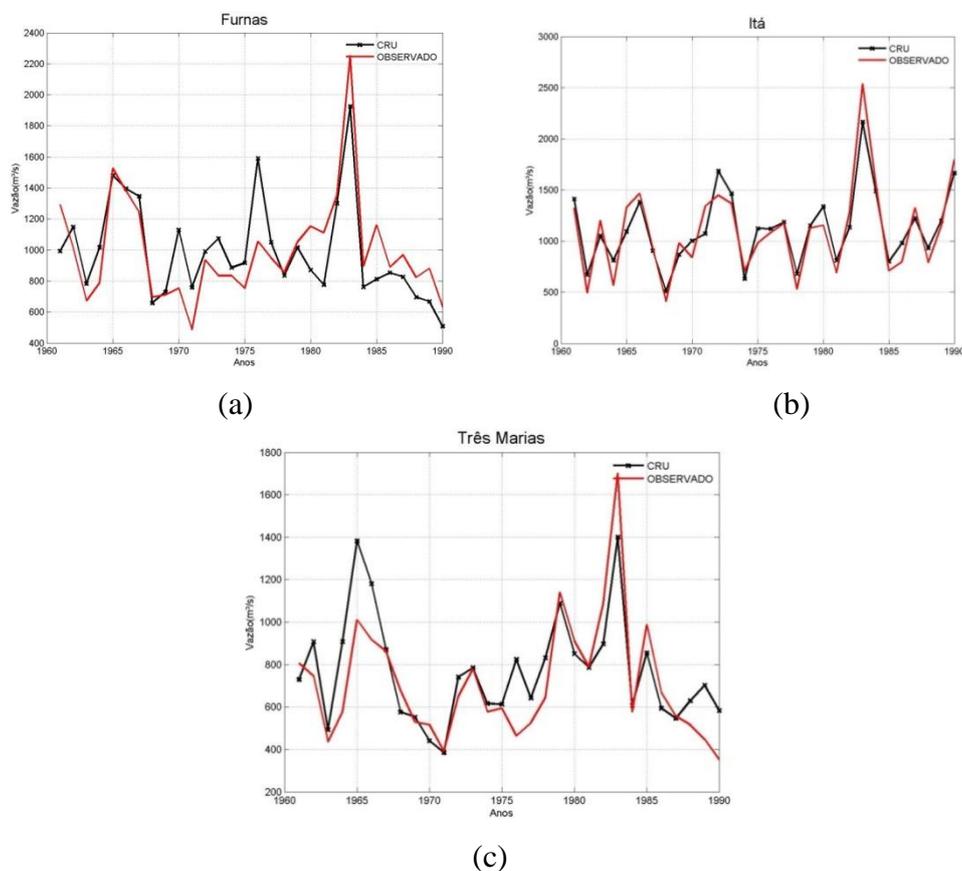
7.1. Validação dos dados do CRU

Na Figura 23 são mostradas as vazões médias anuais observadas e as obtidas a partir do SMAP mensal com precipitações provenientes do CRU (SMAP-CRU) para as bacias de Furnas, Itá e Três Marias no período de 1961 a 1990.

As vazões do SMAP-CRU apresentam boa correlação com a série observada, resultados que se repetem nas demais regiões analisadas. Porém, em Furnas, o modelo superestima as vazões anuais em praticamente toda a década de 70 e subestima no período de 1984 a 1990.

Já em Três Marias o modelo superestima as vazões em parte da série histórica, principalmente nos períodos de 1963 a 1967, 1975 a 1978 e 1988 a 1990, e subestima em outro período, entre 1979 a 1983.

Figura 23 - Vazões médias anuais observadas e as obtidas pelo SMAP com dados de precipitação do CRU para o período de 1961 a 1990 para as bacias:(a)Furnas; Itá(b) e (c) Três Marias.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

7.2. Avaliação da representação da sazonalidade da precipitação

Na Tabela 6 são mostrados os melhores e piores valores obtidos pelos índices estatísticos propostos para avaliação dos modelos do IPCC-AR5 na escala sazonal para as bacias do setor elétrico. Os modelos indicam uma boa representação dos padrões de variação sazonal na maioria do SIN, exceto nas bacias de Itá e D. Francisca onde a correlação máxima obtida com a climatologia é inferior a 0,70. Indicando que nessas regiões as projeções do século XXI possuem menos confiabilidade.

Na Tabela 7 são mostrados os valores obtidos para avaliação sazonal para todas as bacias do setor elétrico. O modelo bcc-csm1-1 obteve o maior AVAL em várias bacias, enquanto os modelos ipsl-cm5a-lr, IPSL-CM5A-MR e GFDL-ESM2M indicaram valores muito próximos de zero na maioria das bacias.

Tabela 6- Valores máximos e mínimos obtidos pelos índices de avaliação da climatologia da precipitação considerando o conjunto de modelos para cada bacia.

Bacias	CORREL		RMSE	
	MAX	MIN	MAX	MIN
Emborcação	0,99	0,75	6,78	0,92
Nova Ponte	0,99	0,81	5,57	0,83
Itumbiana	0,99	0,77	6,70	1,01
São Simão	0,99	0,77	6,62	1,23
Furnas	0,99	0,82	4,32	0,82
Água Vermelha	0,99	0,86	5,09	0,96
N. Avanhadava	0,99	0,88	4,86	1,19
Porto Primavera	0,98	0,79	6,56	1,83
Rosana	0,97	0,83	5,67	1,06
Itaipú	0,88	0,57	7,69	2,05
Santa Cecília	0,99	0,88	3,59	0,70
Salto Caxias	0,91	0,58	6,19	1,01
Itá	0,66	0,21	5,35	1,31
D. Francisca	0,15	-0,55	6,29	1,74
Três Marias	0,99	0,78	5,58	0,99
Sobradinho	0,94	0,62	7,91	2,31
Xingó	0,97	0,86	5,34	1,76
Serra da Mesa	0,98	0,71	7,91	1,31
Lajeado	0,96	0,68	8,40	1,92
Tucuruí	0,97	0,75	6,58	1,55
Belo Monte	0,98	0,81	5,90	1,05
Teles Pires	0,98	0,83	5,89	1,08
S. L. Tapajós	0,98	0,83	5,24	1,15
Santo Antônio	0,99	0,86	4,40	1,01

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Tabela 7-AVAL dos modelos para as bacias do setor elétrico.

	BNU-ESM	CESM1-BGC	CSIRO-Mk3-6-0	CanESM2	HadGEM2-AO	ipsl-cm5a-lr	IPSL-CM5A-MR	MIROC-ESM	MIROC5	bcc-csm1-1	GFDL-ESM2M	giss-e2-r	HadGEM2-CC	hadgem2-ES
Emborcação	0,76	0,68	0,71	0,52	0,79	0,10	0,00	0,79	0,80	1,00	0,13	0,70	0,83	0,71
Nova Ponte	0,74	0,72	0,69	0,54	0,74	0,20	0,05	0,82	0,77	1,00	0,04	0,73	0,72	0,60
Itumbiana	0,77	0,72	0,71	0,53	0,84	0,10	0,00	0,79	0,79	1,00	0,18	0,61	0,87	0,75
São Simão	0,83	0,78	0,73	0,56	0,88	0,09	0,00	0,83	0,80	1,00	0,23	0,69	0,89	0,79
Furnas	0,87	0,83	0,72	0,71	0,86	0,50	0,32	0,86	0,86	1,00	0,00	0,93	0,85	0,73
Água Vermelha	0,79	0,78	0,69	0,66	0,80	0,21	0,06	0,87	0,83	1,00	0,06	0,98	0,75	0,67
N. Avanhandava	0,84	0,79	0,69	0,82	0,92	0,33	0,15	0,79	0,87	1,00	0,04	0,98	0,89	0,82
Porto Primavera	0,85	0,78	0,72	0,65	0,88	0,15	0,00	0,87	0,83	1,00	0,29	0,75	0,87	0,86
Rosana	0,70	0,71	0,56	0,86	0,95	0,20	0,13	0,68	0,83	0,83	0,01	0,85	0,90	0,90
Itaipú	0,58	0,62	0,45	0,75	0,83	0,08	0,00	0,81	0,81	0,71	0,10	0,68	0,72	0,82
Santa Cecília	0,95	0,86	0,68	0,79	0,76	0,52	0,36	0,60	0,88	0,98	0,00	0,85	0,81	0,81
Salto Caxias	0,45	0,66	0,26	0,71	0,98	0,08	0,08	0,51	0,81	0,63	0,01	0,64	1,00	0,99
Itá	0,38	0,82	0,09	0,53	0,95	0,07	0,11	0,41	0,75	0,61	0,07	0,56	0,97	0,93
D. Francisca	0,31	0,77	0,10	0,42	0,96	0,09	0,04	0,31	0,78	0,41	0,22	0,64	0,77	0,99
Três Marias	0,81	0,69	0,72	0,59	0,74	0,27	0,05	0,82	0,75	1,00	0,04	0,84	0,73	0,57
Sobradinho	0,88	0,63	0,87	0,62	0,92	0,14	0,03	0,86	0,97	1,00	0,11	0,56	0,95	0,81
Xingó	0,80	0,59	0,66	0,29	0,76	0,04	0,01	0,58	0,87	0,38	0,15	0,92	0,72	0,71
Serra da Mesa	0,83	0,70	0,74	0,59	0,88	0,05	0,00	0,79	0,78	1,00	0,25	0,60	0,92	0,81
Lajeado	0,85	0,71	0,76	0,60	0,96	0,05	0,00	0,79	0,86	1,00	0,21	0,56	0,98	0,91
Tucuruí	0,82	0,81	0,84	0,63	0,95	0,03	0,00	0,83	0,90	1,00	0,18	0,62	0,98	0,95
Belo Monte	0,75	0,83	0,68	0,53	0,94	0,01	0,02	0,69	0,82	0,89	0,12	0,64	1,00	0,99
Teles Pires	0,94	0,86	0,71	0,66	0,94	0,02	0,00	0,79	0,79	0,95	0,15	0,67	1,00	0,95
S. L. Tapajós	0,84	0,87	0,44	0,66	0,95	0,00	0,01	0,82	0,88	0,87	0,07	0,70	1,00	0,99
Santo Antônio	0,93	0,88	0,60	0,70	0,93	0,02	0,02	0,85	0,86	0,96	0,62	0,95	0,97	0,96

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

7.3.Cenário RCP 4.5

Nesta seção serão mostrados os resultados obtidos para o cenário RCP4.5 para o setor elétrico do Brasil.

7.3.1. Análise das Anomalias nas médias Anuais

Na Tabela 8 são mostrados os extremos inferiores e superiores de anomalia na média percentual anual nas vazões mostrada pelos modelos para os períodos de 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098 para o cenário RCP 4.5 em relação ao período de 1950 a 1999 dos modelos globais do CMIP5. Assim como no cenário RCP8.5 os modelos do cenário RCP4.5 mostram maior dispersão no terceiro período.

Para as bacias do setor Sudeste/Centro-Oeste a média das anomalias de vazões dos modelos analisados sugerem redução ou leve aumento nas vazões nos períodos de 2010 a 2039 e 2040 a 2069, apresentando média de anomalias negativa em todas as bacias com desvios padrões elevados de aproximadamente 10%. Para o período de 2070 a 2098 há uma grande dispersão entre os modelos com desvio de aproximadamente 20% na maiorias bacias.

No setor Sul há uma grande variação espacial nas anomalias de vazões com as bacias N.Avanhandava e Porto Primavera indicando sinais distintos das bacias Salto Caxias, Itá e D. Francisca, principalmente no período de 2010 a 2039.

As bacias de Salto Caxias, Itá e D. Francisca a maioria dos modelos indicam possibilidade de aumento nas vazões nos três períodos. Enquanto em N.Avanhandava e Porto Primavera no período de 2010 a 2039 os modelos analisados indicam maior possibilidade de reduções nas vazões anuais, sendo que a média entre as anomalias na bacia Porto Primavera indica diminuição de aproximadamente 10% nesse período.

No setor Nordeste os modelos indicam bastante incerteza nas projeções, não havendo convergência a respeito dos resultados dos mesmos, o desvio padrão entre as anomalias dos modelos apontam valores superiores a 10% já o período de 2010 a 2039 em todas as bacias e atinge 50% em Xingó no período de 2040 a 2069. Porém, no período de 2040 a 2069 todas as projeções dos modelos analisados para Sobradinho indicam que as vazões devem reduzir entre 2% e 50%.

Já nas bacias do setor Norte, a maioria dos modelos sugerem reduções nas vazões em todas as bacias deste Setor nos três períodos analisados, principalmente nas bacias

de belo Monte, S.L. Tapajós e Teles Pires. Esse fato é evidenciado principalmente no período de 2040 a 2069, onde todos os modelos indicam diminuição nas vazões anuais e a média das anomalias dos modelos é superior a 10%.

Tabela 8 - Anomalias percentuais máximas e mínimas de vazões anuais sinalizadas pelo conjunto de modelos CMIP5 usados no experimento para os períodos de 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098 em relação ao período de 1950 a 1999 para as bacias da ONS.

Bacias	2010-2039				2040-2069				2070-2098			
	MAX	MIN	MED	DESV	MAX	MIN	MED	DESV	MAX	MIN	MED	DESV
Emborcação	7,87	-28,41	-8,27	12,62	4,57	-39,48	-14,38	13,88	7,98	-45,57	-13,91	19,46
Nova Ponte	6,82	-27,58	-6,67	11,87	7,56	-37,47	-10,93	13,97	10,44	-35,69	-10,05	16,66
Itumbiana	4,94	-28,41	-10,14	12,59	2,42	-41,05	-16,70	14,09	5,15	-45,72	-16,74	19,36
São Simão	4,19	-32,10	-12,58	14,29	4,35	-47,11	-19,35	15,76	6,57	-54,09	-20,33	20,63
Furnas	7,56	-20,74	-3,23	8,13	10,16	-26,64	-3,82	11,25	16,30	-27,89	-4,01	13,38
Água Vermelha	1,78	-24,70	-6,57	8,34	9,11	-35,87	-8,52	13,03	13,25	-29,49	-7,87	13,63
N. Avanhadava	1,99	-25,26	-6,14	8,10	11,80	-38,16	-6,80	14,70	16,64	-34,26	-7,46	15,03
Porto Primavera	3,68	-29,50	-10,45	10,67	8,04	-42,25	-14,97	15,32	14,58	-44,26	-15,10	18,70
Rosana	10,47	-12,22	-0,91	6,90	20,49	-23,97	-1,15	12,52	20,97	-23,69	-2,72	13,26
Itaipú	9,12	-16,66	-3,41	7,62	19,91	-27,75	-4,78	13,10	20,57	-29,68	-6,13	14,61
Santa Cecília	5,52	-16,44	-3,31	6,57	10,35	-26,99	-3,17	11,73	15,59	-27,14	-3,55	13,23
Salto Caxias	14,25	-5,65	3,24	6,33	17,61	-10,37	4,32	8,29	24,21	-9,78	2,78	10,40
Itá	18,78	-6,26	5,13	8,11	24,63	-7,18	6,94	8,96	28,89	-8,41	3,95	11,99
D. Francisca	23,63	-13,81	6,52	11,64	23,10	-7,19	6,91	9,97	31,04	-23,09	-0,15	19,52
Três Marias	8,74	-27,18	-5,76	11,10	8,67	-31,92	-8,83	12,06	13,90	-33,95	-8,34	16,22
Sobradinho	8,82	-38,67	-11,55	14,59	-1,93	-49,65	-16,99	14,85	20,02	-58,05	-15,40	23,29
Xingó	11,85	-49,13	-15,16	21,20	71,64	-80,64	-14,05	50,31	31,15	-63,16	-28,32	29,78
Serra da Mesa	8,40	-33,00	-12,15	14,54	-2,02	-47,41	-19,92	14,86	4,84	-54,30	-19,61	20,56
Lajeado	8,08	-34,00	-15,55	13,70	-6,96	-49,75	-21,40	13,39	5,41	-57,43	-21,97	20,86
Tucuruí	3,51	-37,28	-13,43	12,41	-6,23	-52,75	-16,88	14,41	14,72	-60,24	-18,39	20,93
Belo Monte	-4,73	-43,68	-22,02	14,41	-11,29	-55,02	-25,67	14,32	-10,11	-64,98	-30,70	19,02
Teles Pires	-1,35	-20,67	-9,84	6,96	-7,58	-30,64	-14,32	8,04	-7,24	-37,85	-17,54	12,19
S. L. Tapajós	-2,70	-18,68	-9,66	5,60	-4,16	-27,07	-11,33	7,74	-4,18	-32,82	-13,88	10,93
Santo Antônio	3,16	-26,81	-9,69	9,01	6,81	-41,68	-18,01	17,52	-0,47	-48,45	-23,51	18,65

Max: Indica a anomalia na vazão anual do modelo do CMIP5 com maior valor para Bacia, cenário e período em questão.

Min: Indica a anomalia na vazão anual do modelo do CMIP5 com menor valor para Bacia, cenário e período em questão.

Med: Indica a anomalia média das vazões anuais entre os modelos do CMIP5 para Bacia, cenário e período em questão.

Desv: Indica desvio padrão entre as anomalias das vazões anuais dos modelos do CMIP5 para Bacia, cenário e período em questão.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 34 é mostrado o impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos (2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP 4.5 em relação ao século XX (1950-1999) para as bacias de Emborcação e Furnas.

Os modelos MIROC_ESM, BNU-ESM, IPSL-CM5A-LR e CANESM2 indicam reduções nas principais bacias desse setor para todos os períodos. Este último indica reduções significativas superiores a 20% em cada período de 30 anos. Estes modelos sugerem que é necessário um maior investimento em todo o SIN para adaptar-se as condições climáticas do século XXI.

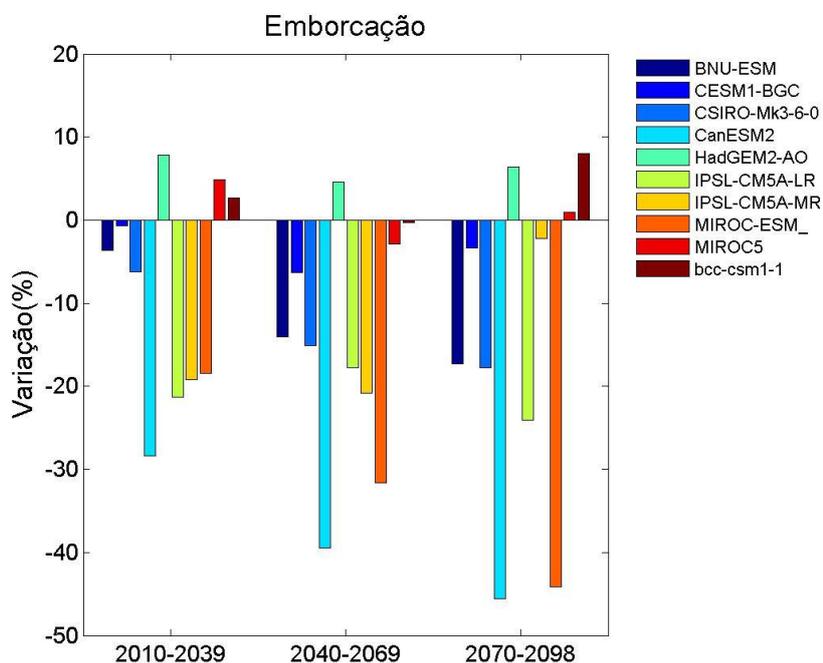
Enquanto o modelo HadGEM2-AO indica aumento nas vazões médias anuais nesse setor, sendo este de até 16% em Furnas no período de 2070 a 2098.

O modelo IPSL-CM5A-MR mostram reduções nas vazões médias anuais nos dois primeiros períodos analisados, seguidos por um possível aumento ou normalidade no período de 2070 a 2098.

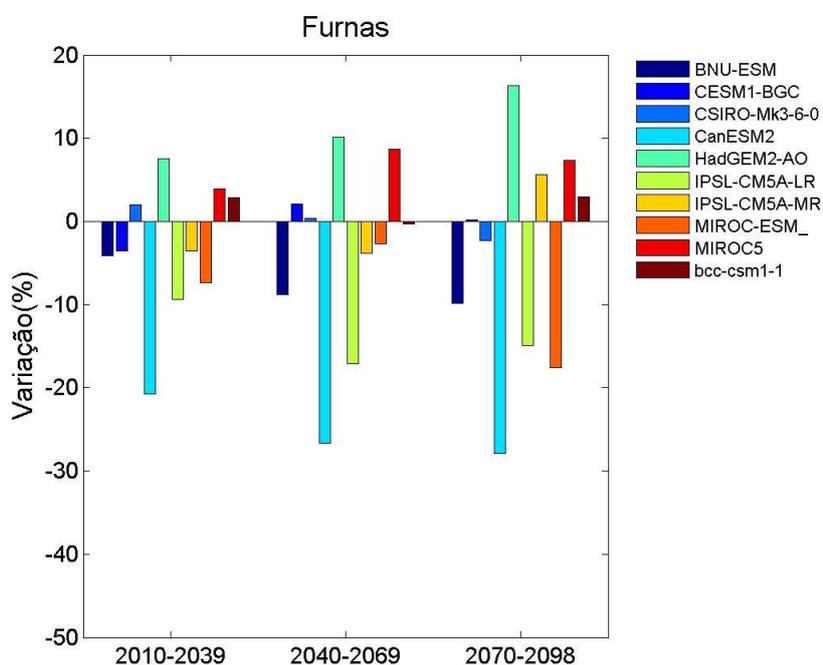
Já o modelo bcc-csm1-1 mostra aumento nas vazões anuais deste setor no primeiro período e normalidade no período de 2040 a 2069, seguido por um novo aumento no período de 2070 a 2098. Isto indica que este modelos não sugere impactos significativos no clima desta região, provavelmente o sinal mostrado é associado a variabilidade decadal da precipitação.

Os modelos CESM1-BGC e CSIRO-Mk3-6-0 indicam maior variação espacial nos impactos nas vazões anuais, indicando reduções na bacia Emborcação nos três períodos analisados e normalidade em Furnas.

Figura 24 - Impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos(2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 em relação ao século XX (1950-1999) para : (a) Emborcação e (b) Furnas.



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 25 é mostrado o impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos (2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5

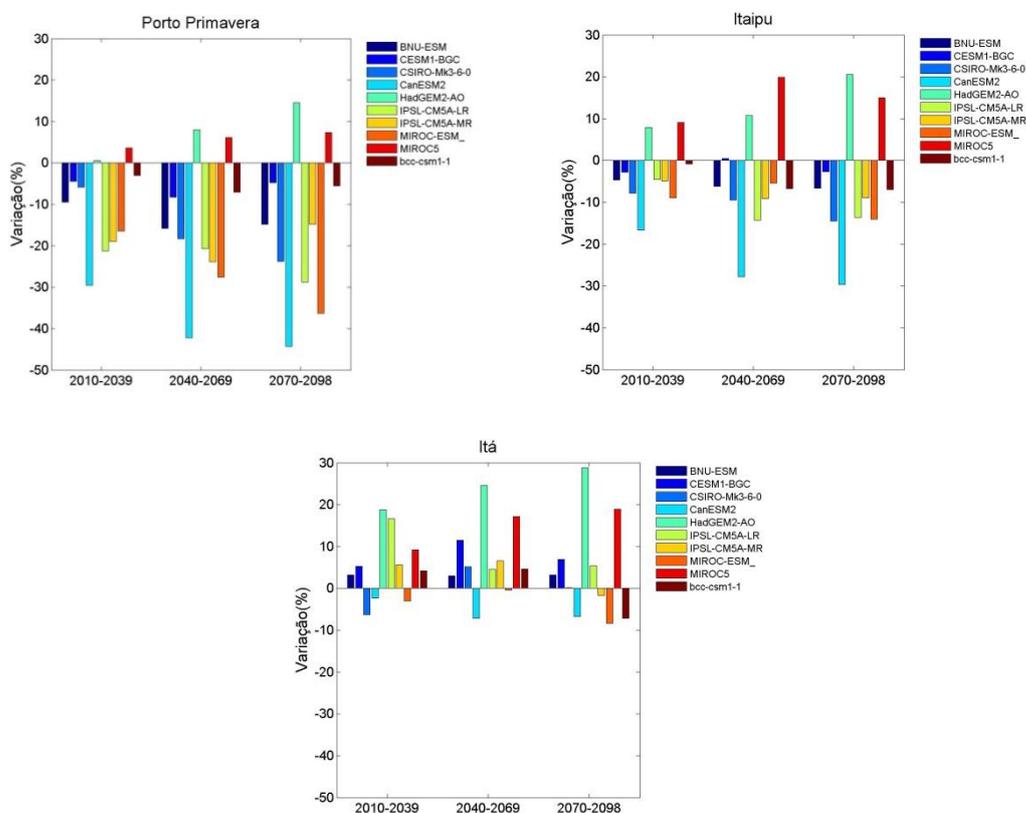
para o cenário RCP 4.5 em relação ao século XX (1950-1999) para as bacias de Porto Primavera, Itaipu e Itá. Conforme já mostrado na tabela 6, há uma grande variação espacial nas anomalias de vazões anuais.

Os modelos BNU-ESM, CESM1-BGC eIPSL-CM5A-LR sinalizam reduções nas vazões médias anuais em Itaipu e Porto Primavera associados a aumento em Itá de até 5% por cada período de 30 anos.

Os modelos MIROC5 e HadGEM2-AO indicam aumento nas vazões médias anuais nas principais bacias desse setor para todos os períodos analisados, atingindo valores superiores a 10% no período de 2070 a 2098 . Enquanto o modelo CANESM2 e MIROC_ESM indicam reduções em todos os aproveitamentos hidrelétricos deste setor, porém as magnitudes das diminuições são menores em Salto Caxias, Itá e D. Francisca.

O modelo bcc-csm1-1 indica reduções de magnitude inferior aos demais em Itaipu e Porto Primavera (inferior a 7% nos três períodos) associado a um também leve aumento no aproveitamento de Itá nos períodos de 2010 a 2039 e 2040 a 2069.

Figura 25 - Impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos(2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 em relação ao século XX (1950-1999) para : (a) Porto Primavera, (b) Itaipu e (c) Itá.



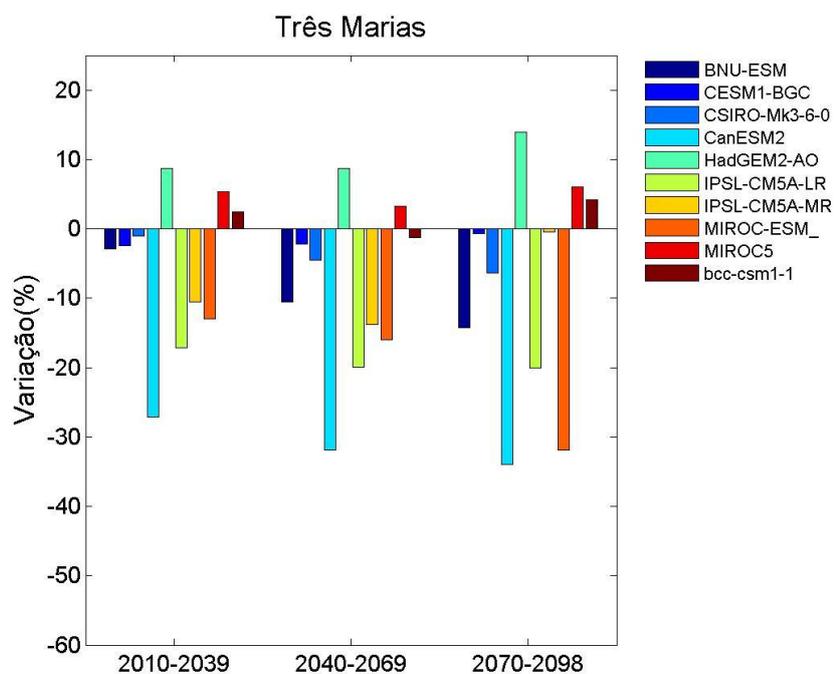
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 26 é mostrado o impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos (2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP 4.5 em relação ao século XX (1950-1999) para as bacias de Três Marias e Sobradinho. Conforme já mostrado na tabela 6, os modelos analisados indicam reduções nas vazões em Sobradinho no período de 2040 a 2069, divergindo apenas em magnitude.

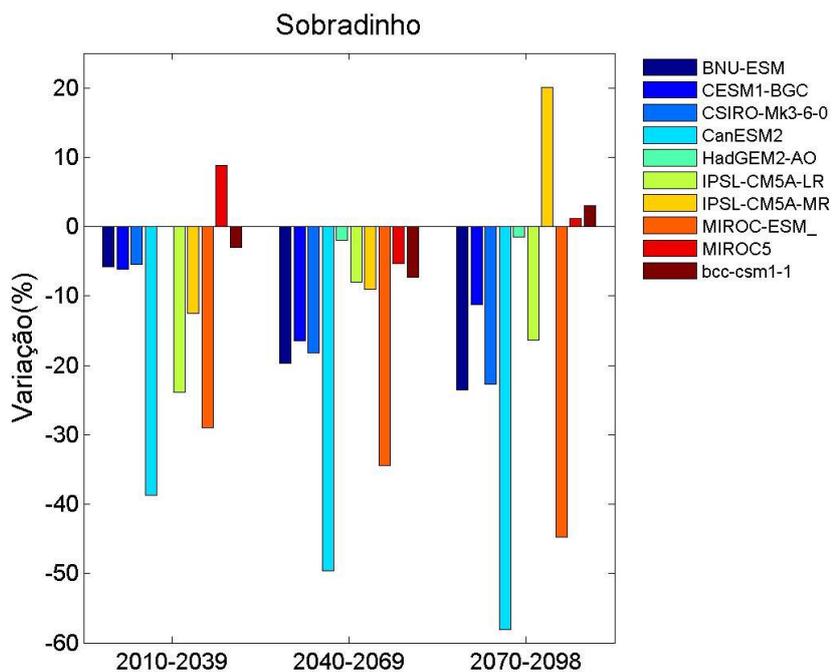
A maioria dos modelos indica reduções nas vazões anuais nestas bacias. Sendo os modelos MIROC-ESM_ e CanESM2 aqueles que indicam maiores diminuições nas vazões. Este último sugere projeções maiores que 30% em cada período de 30 anos em Sobradinho e maiores que 20% em Três Marias.

Os modelos MIROC5 e HadGEM2-AO indicam aumento nas vazões em Três Marias superior a 5% em cada período de 30 anos. Já em Sobradinho, enquanto o modelo HadGEM2-AO indica variações em torno da normalidade nos três períodos analisados, o modelo MIROC5 é único que indica aumento de aproximadamente 10% no período de 2010 a 2039 seguido por uma redução em torno de 7% entre 2040 e 2069.

Figura 26 - Impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos (2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 em relação ao século XX (1950-1999) para : (a) Três Marias e (b) Sobradinho.



(a)



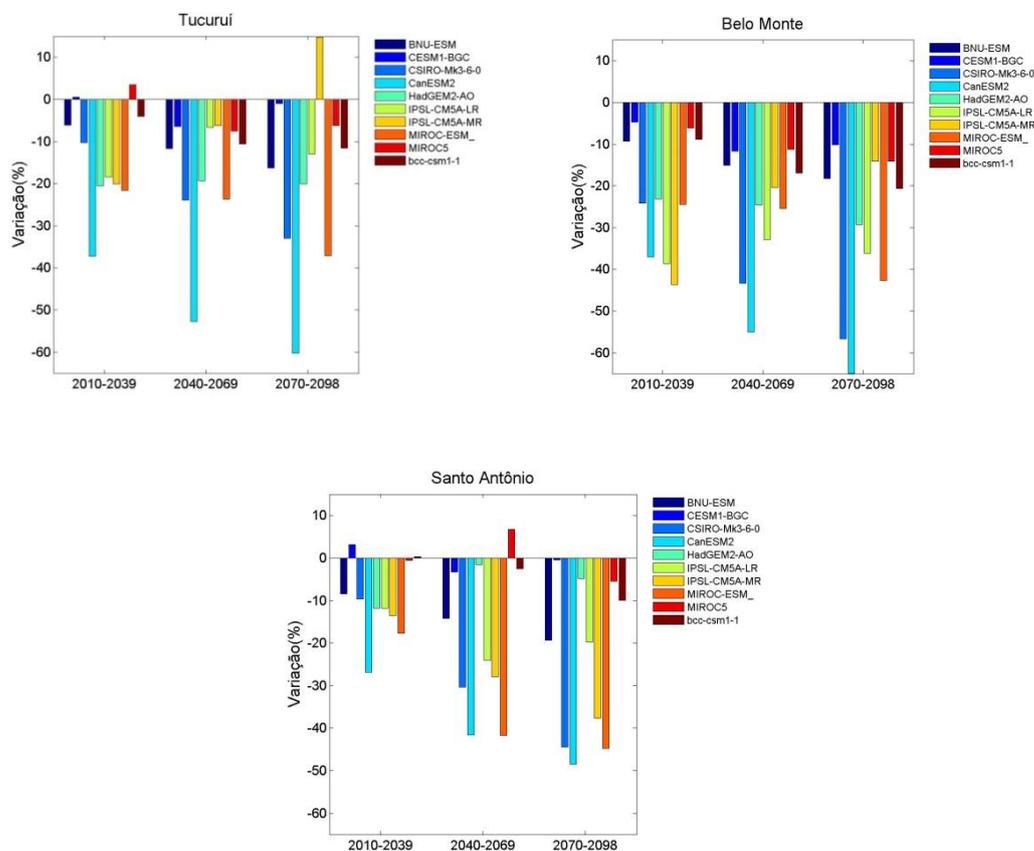
(b)

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 27 é mostrado o impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos (2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP 4.5 em relação ao século XX (1950-1999) para as bacias de Tucuruí, Belo Monte e Santo Antônio.

Neste setor, a maioria dos modelos projeta impactos significativos nas vazões médias anuais, sinalizando que reduções devem ocorrer em magnitude superior a 10% em cada período de 30 anos em Belo Monte, por exemplo. Já nas bacias de Tucuruí e Santo Antônio os modelos divergem quanto o módulo das reduções nas vazões anuais.

Figura 27 - Impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos(2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 em relação ao século XX (1950-1999) para : (a) Tucuruí, (b) Belo Monte e (c) Santo Antônio.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

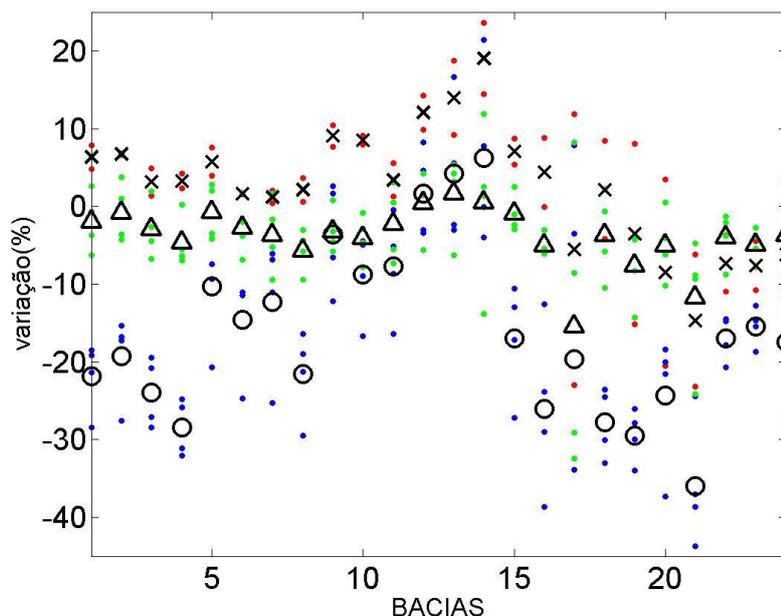
7.3.2. Análise de agrupamento

Nesta seção os modelos são agrupados segundo a similaridade de suas anomalias médias anuais. Na Figura 28 são mostrados as anomalias das vazões médias anuais dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5, os respectivos *clusters* que os representa para o período de 2010 a 2039 e o centroide dos mesmos. Os centroides apresentam maior dispersão nas bacias do setor Sudeste/Centro-Oeste e nas bacias do setor Nordeste, principalmente na bacia do Xingó.

O modelo HadGEM-AO representa o modelo mais próximo do centroide do cluster 1, também composto pelo modelo MIROC5. Já o modelo IPSL-CM5A-LR é o

mais próximo ao centroide do cluster 2, enquanto o modelo bcc-csm1-1 é o mais próximo do centroide do cluster 3.

Figura 28 - Anomalia das vazões dos clusteres para o período de 2010 a 2039 e centroide dos mesmos. Cluster 1: modelos em vermelho; Cluster 2: modelos em azul; Cluster 3: modelos em verde; Centroíde 1: representado por x; Centroíde 2: representado por círculos e C.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Tabela 9 - Modelos do CMIP5 utilizados para o cenário RCP4.5 e seus respectivos clusteres.

Modelos	Cluster
BNU-ESM	3
CESM1-BGC	3
CSIRO-Mk3-6-0	3
CanESM2	2
HadGEM2-AO	1
IPSL-CM5A-LR	2
IPSL-CM5A-MR	2
MIROC-ESM_	2
MIROC5	1
bcc-csm1-1	3

Em negrito os modelos mais próximos de cada centroíde de cada *cluster*.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 28 são mostrados as anomalia das vazões médias anuais dos modelos mais próximos a cada centroide para o cenário RCP4.5 para os periodo de 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098. Os modelos convergem quanto ao sinal da anomalia no setor Norte, indicando que as vazões médias anuas devem reduzir na maioria das bacias deste setor do SIN.

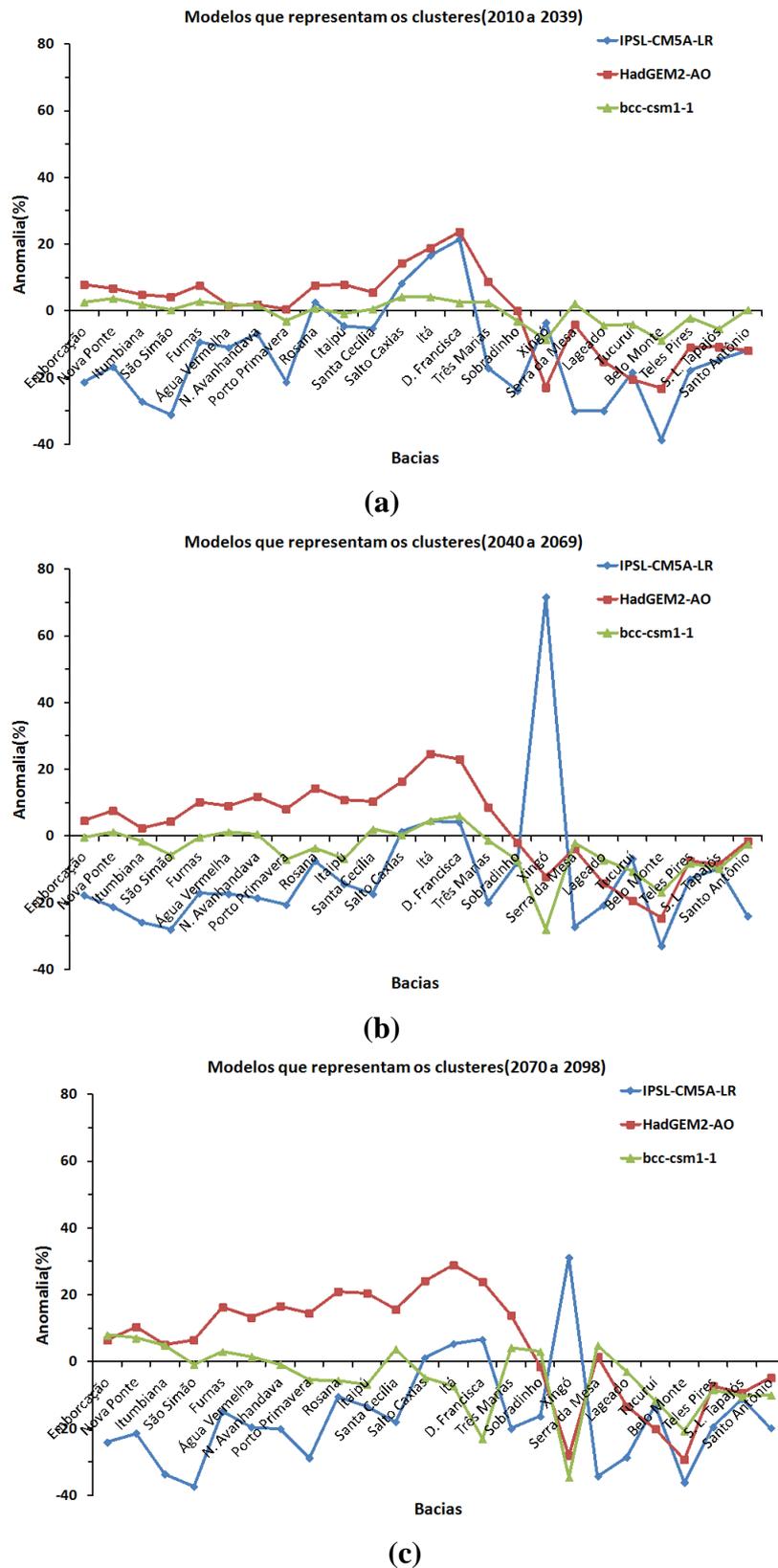
O modelo HadGEM2-AO indica reduções nas vazões em todo setor Norte e na Bacia do Xingó nos três periodos, associados a aumento nas vazões no setor Sul e Sudeste/Centro-oeste do SIN. Em Itá, Salto Caxias e D. Francisca o aumento percentual nas vazões é superior a 10% para cada período de 30 anos para esse conjunto de modelos. Enquanto em Lajeado, Tucuruí e Belo Monte a redução nas vazões médias anuais é de 10% em cada período de 30 anos.

O modelo IPSL-CM5A-LR indica reduções das vazões médias anuais nas principais bacias de cada setor para todos os períodos, notadamente no setor Sudeste/Centro-oeste do SIN. Os modelos deste cluster sugerem que é necessário um maior investimento em infraestrutura hídrica, uma maior participação de energia proveniente de termelétricas na matriz de energia elétrica brasileira e/ou um maior investimento em fonte de energias renováveis (como eólica e solar, por exemplo) para que a redução na oferta não possa impactar a geração de energia e os níveis de garantia do século XX possam ser mantidos no século XXI.

O investimento em grandes infraestruturas hídricas pode levar a sérios danos ambientais, principalmente se este for destinado para o setor Norte. Caso os padrões de consumo do sistema seja mantido (maior consumo na região Sul e Sudeste do Brasil e maior possibilidade de geração de energia no setor Norte) pode-se elevar o custo da energia para alguns consumidores, já que neste caso há um custo bastante alto associado a transmissão de energia entre os setores.

O modelo bcc-csm1-1 mostra flutuações em torno da média nos setores Sul e Sudeste/Centro-oeste nos periodos de 2010 a 2039 e 2040 a 2069 associados a reduções nos setores Norte e Nordeste (principalmente na bacia do Xingó, onde a magnitude da redução é superior a 20% no segundo periodo de 30 anos). Este modelo indica tendência negativa em algumas bacias deste setor, conforme Tabela 10, isto indica que os futuros investimentos nesse setor devem ser planejados de forma a incluir essa possível diminuição nas vazões médias anuais.

Figura 29 - Anomalia das vazões dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 mais próximos dos centroides, para o período de (a)2010 a 2039; (b)2040 a 2069 e (c) 2070 a 2098.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Tabela 10 são mostradas as declividades da tendência dos modelos mais próximos a cada centroide para cenários RCP 4.5 do CMIP5 para o teste de Man Kendall-Sen das vazões anuais padronizadas. Os modelos que representam os *clusters* não identificaram tendência significativa na maioria das bacias.

Apesar da clara redução mostrada no setor no setor Suldeste/Centro-oeste mostrada pelo modelo IPSL-CM5A-LR e do notado aumento proposto pelos modelo HadGEM-AO ambos não indicam tendência significativa em nenhuma das bacias dessa região. Isto indica uma possível maior ocorrência de eventos extremos, o modelo IPSL-CM5A-LR, por exemplo, destaca a ocorrência de vários eventos de vazões a baixo da média entre 2070 e 2098, conforme Figura 30.

Tabela 10 - Tendência identificada para as vazões anuais normalizadas dos modelos do CMIP5 do cenário RCP4.5 mais próximos do centroíde de cada cluster.

Bacias	IPSL-CM5A-LR	HadGEM2-AO	bcc-csm1-1
Emborcação	-	-	-
Nova Ponte	-	-	-
Itumbiana	-	-	-
São Simão	-	-	-
Furnas	-	-	-
Água Vermelha	-	-	-
N. Avanhandava	-0,0098	-	-
Porto Primavera	-	-	-
Rosana	-0,0104	-	-
Itaipú	-	-	-
Santa Cecília	-0,0113	0,0096	-
Salto Caxias	-	-	-
Itá	-	-	-
D. Francisca	-	-	-0,0104
Três Marias	-	-	-
Sobradinho	-	-	-
Xingó	0,0084	-	-0,0081
Serra da Mesa	-	-	-
Lajeado	-	-	-
Tucuruí	-	-	-
Belo Monte	-	-0,0096	-0,0132
Teles Pires	-	-	-0,0077
S. L. Tapajós	-	-	-
Santo Antônio	-	-	-0,0125

- Ausência de tendência significativa

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 30 são mostradas as tendências das vazões médias anuais e as bandas geradas a partir da transformada em ondeletas dos modelos IPSL-CM5A-LR, HadGEM2-AO e bcc-csm1-1 para o cenário RCP4.5 para Furnas para o período de 2015 a 2098.

O modelo IPSL-CM5A-LR indica uma possível padrão de variabilidade de baixa frequência captado pela média e mediana móvel de dez anos e pelo resíduo da transformada em ondeletas, sendo o período de 2015 a aproximadamente 2050 um período de vazões mais elevadas, 2050 a 2070 um período de vazões menores, seguido por um final de século na fase de vazões maiores. A leve tendência negativa captada pela regressão linear torna essa alternância de fases com anomalias abaixo da média histórica nos períodos de 30 anos avaliados na Figura 29. O comportamento desse modelo no final do século indica um grande aumento na ocorrência de eventos extremos, indicando, apesar de se encontrar na fase de vazões maiores, eventos severos secos mais intensos do que os demais da série projetada para o século XXI. Essa mudança de amplitude dos eventos é captada pela banda de baixa frequência (1-10 anos).

Já o modelo HadGEM2-AO, assim como o IPSL-CM5A-LR, mostram alternância de fase na série histórica ao longo do século XXI, porém a regressão linear captou uma tendência positiva ao longo do período analisado. No período de 2015 a 2050 apesar da tendência positiva o modelo indica a ocorrência de eventos severos de vazões abaixo da média do século XX. No período de 2070 a 2098 o modelo indica um grande aumento na ocorrência de eventos extremos de cheias, que a transformada em ondeletas indica que isto se deve a uma possível mudança no sinal do resíduo.

O modelo bcc-csm1-1, assim como o IPSL-CM5A-LR e HadGEM2-AO, mostra alternância de fase na série histórica ao longo do século XXI e mostra um aumento considerável na ocorrência de eventos extremos no período 2080 a 2098 associados à alta frequência, contudo não há tendência significativa.

Os modelos a apesar de discordarem na magnitude das anomalias nas vazões médias nesta bacia, concordam que entre 2080 e 2098 haverá um aumento significativo na ocorrência de eventos extremos.

Na Figura 31 são mostradas as tendências das vazões médias anuais e as bandas geradas a partir da transformada em ondeletas dos modelos IPSL-CM5A-LR, HadGEM2-AO e bcc-csm1-1 para o cenário RCP4.5 para Itaipu para o período de 2015

a 2098. Assim como na bacia de Furnas os modelos mostram alternância de fase na série histórica ao longo do século XXI, captada pela média e medianas móveis e pelo resíduo da transformada em ondeletas. Os modelos bcc-csm1-1 e HadGEM2-AO mostram uma mudança significativa na amplitude da banda de baixa frequência, indicando uma maior ocorrência de eventos extremos.

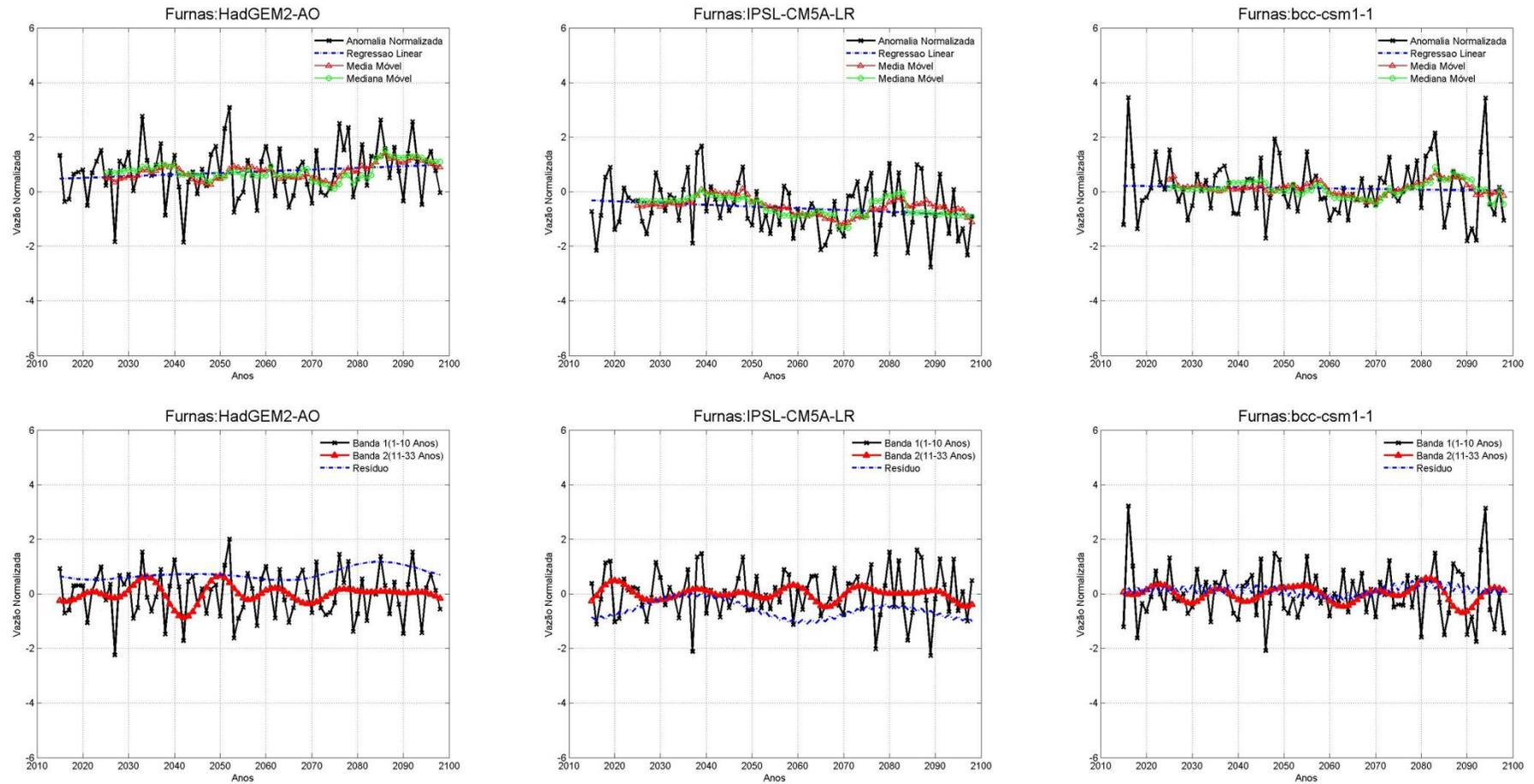
Na Figura 32 são mostradas as tendências das vazões médias anuais e as bandas geradas a partir da transformada em ondeletas dos modelos IPSL-CM5A-LR, HadGEM2-AO e bcc-csm1-1 para o cenário RCP4.5 para Santa Cecília para o período de 2015 a 2098.

O modelo IPSL-CM5A-LR, assim como em Furnas, indica uma possível padrão de variabilidade de baixa frequência captado pela média e mediana móvel de dez anos e pelo resíduo da transformada em ondeletas. O teste de Man-Kendall-Sen identificou tendência negativa nesta bacia, isto justifica o valor negativo encontrado nas anomalias da Figura 29 mesmo nos períodos de alternância de fases. Nota-se, uma maior amplitude nas fases de maiores vazões, apresentando anos com vazões bastantes baixas seguidos por anos com vazões elevadas. Sendo este comportamento mais evidenciado no final do século, com uma notada mudança de amplitude na banda de alta frequência.

Enquanto o modelo HadGEM-AO apontam para uma tendência positiva com uma grande ocorrência de eventos extremos, principalmente associado a alta amplitude mostrada pela banda de alta frequência mostrada pela transformada em ondeletas.

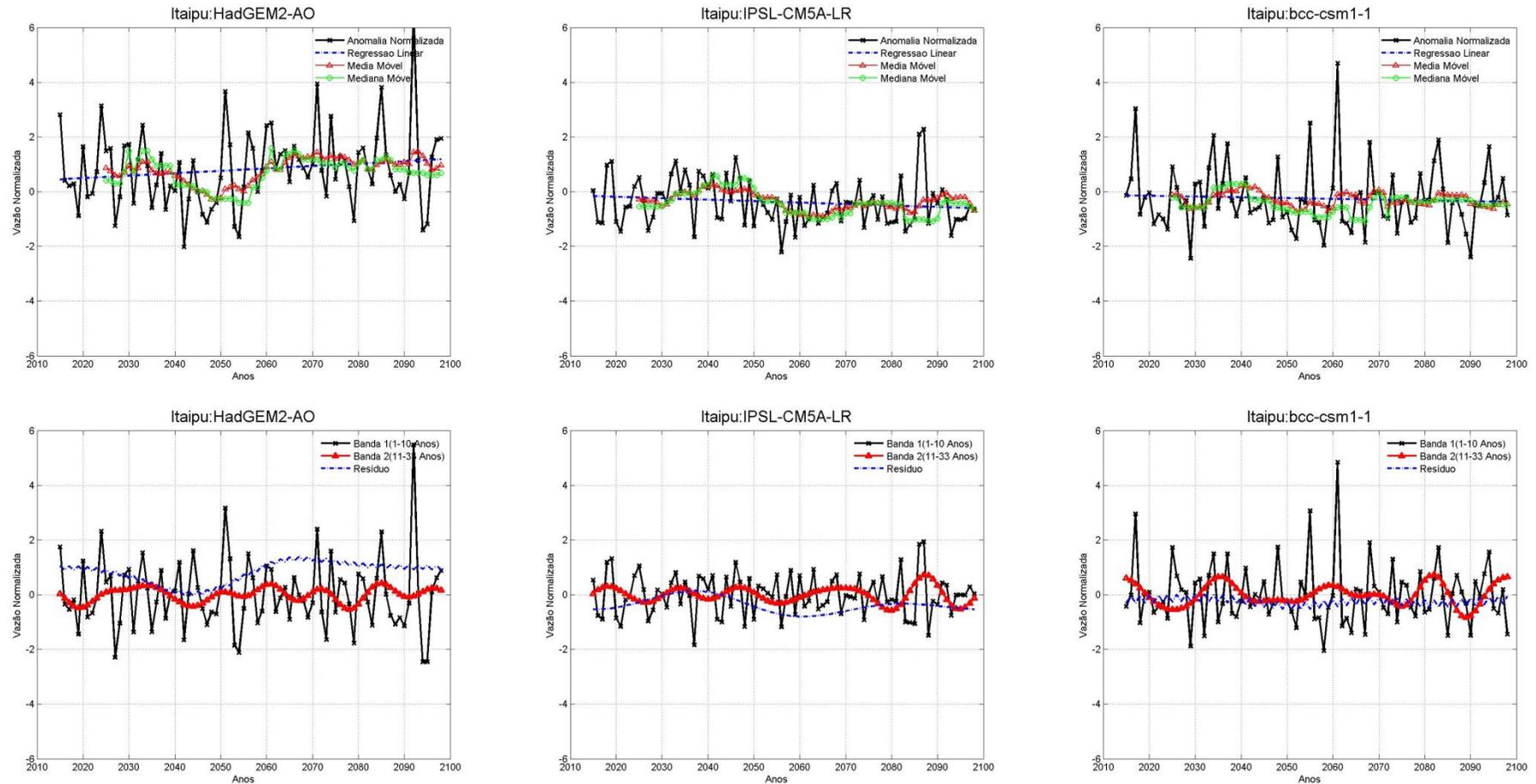
Já o modelo bcc-csm1-1 mostra-se mais comportado ao longo de praticamente todo o século, com vazões em torno da média, porém sinaliza uma grande mudança na amplitude da baixa frequência no período de 2080 a 2098.

Figura 30 - Tendências das séries de vazões para Furnas dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 Anos e transformada em ondeletas.



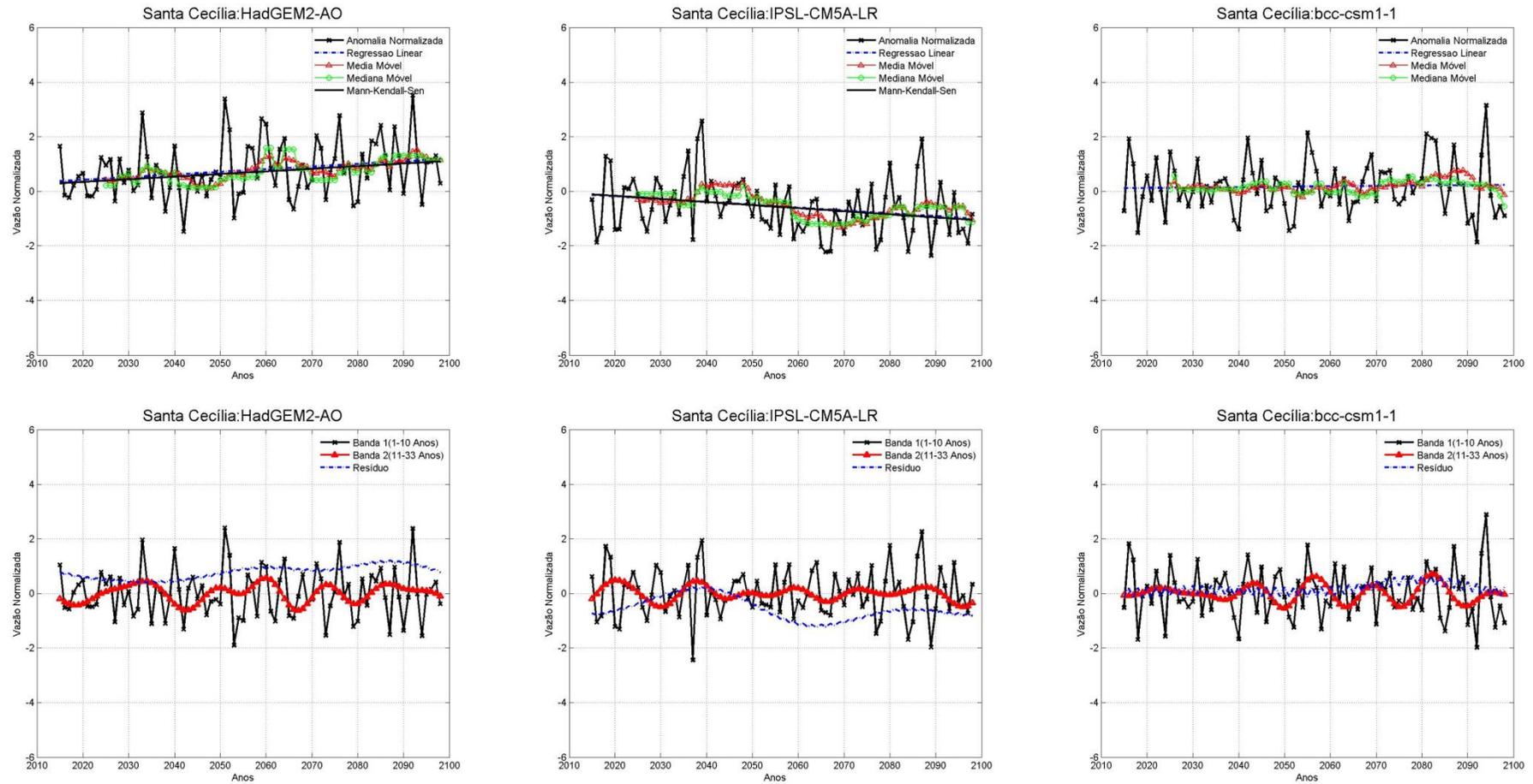
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 31 - Tendências das séries de vazões para Itaipu dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 32 - Tendências das séries de vazões para Santa Cecília dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 mais próximos dos -centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

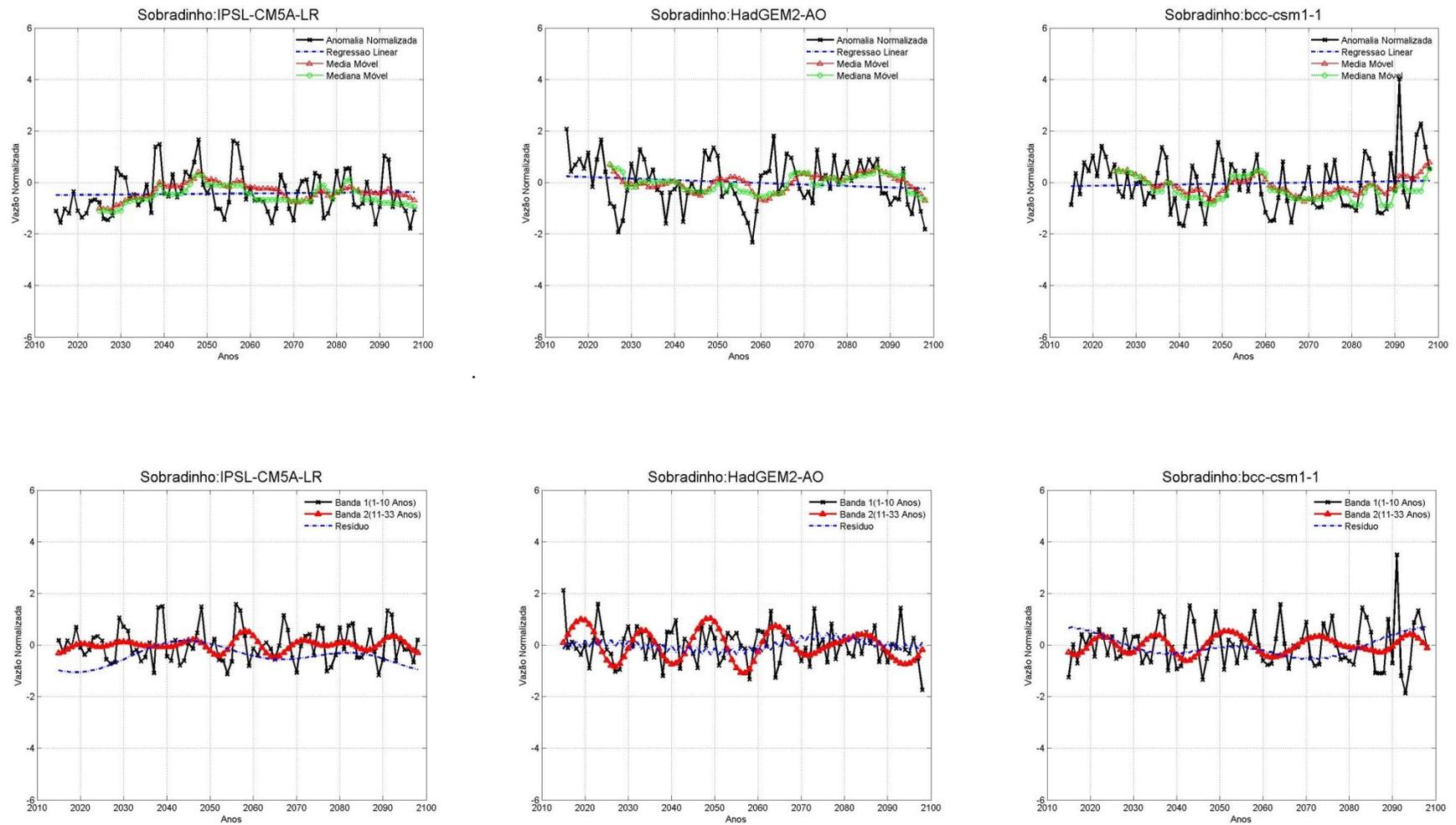
Na Figura 33 e Figura 34 são mostradas as tendências das vazões médias anuais e as bandas geradas a partir da transformada em ondeletas dos modelos IPSL-CM5A-LR, HadGEM2-AO e bcc-csm1-1 para o cenário RCP4.5 para Sobradinho e Xingó, respectivamente, para o período de 2015 a 2098. Neste setor, há uma grande divergência entre os modelos, principalmente em Xingó.

O modelo IPSL-CM5A-LR, assim como em Itapu e Furnas, indica uma possível padrão de variabilidade de baixa frequência captado pela média e mediana móvel de dez anos e pelo resíduo da transformada em ondeletas, sendo o período de 2015 a aproximadamente 2050 um período de vazões mais elevadas, 2050 a 2070 um período de vazões menores, seguido por um final de século na fase de vazões maiores. Na bacia do Xingó o modelo mostra tendência positiva, associado ao aumento de ocorrência de eventos extremos de vazões elevadas, justificados pelo aumento da amplitude da banda de baixa frequência (1 a 9 anos) e do resíduo.

Já o modelo HadGEM2-AO, assim como o IPSL-CM5A-LR, mostram alternância de fase na série histórica ao longo do século XXI e não mostra tendência significativa para o século XXI para o setor Norte. Entretanto, os eventos extremos de vazões abaixo da média em Sobradinho são mais intensos do que os de vazões médias anuais acima da média nos períodos de 2010 a 2039 e 2040 a 2069. Este fato pode ser justificado pela coincidência dos picos negativos das bandas de 1 a 9 anos e 10 a 33 anos com a fase de vazões baixas do resíduo.

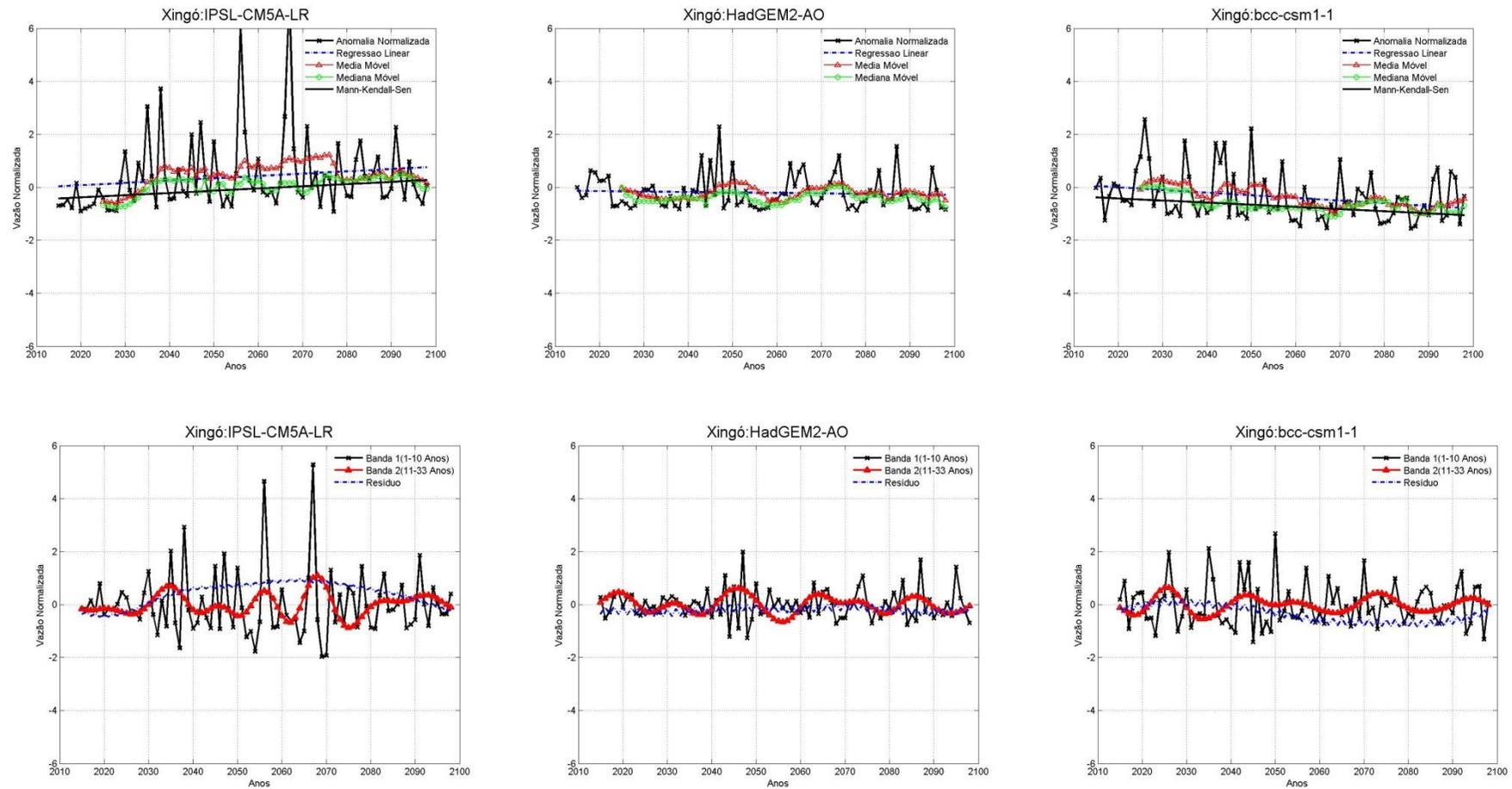
O modelo bcc-csm1-1 indica em Sobradinho apenas variações em torno da média histórica nesta bacia nos períodos de 2010 a 2070, porém projeta um aumento nos eventos extremos de vazões acima da média no período de 2085 a 2098. Enquanto em Xingó há uma evidente tendência negativa, captada pelo resíduo da transformada em ondeletas, porém apesar dessa tendência o período de 2015 a 2040 é dotado de eventos de vazões elevadas de grande intensidade.

Figura 33 - Tendências das séries de vazões para Sobradinho dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 34 - Tendências das séries de vazões para Sobradinho dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas



. Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

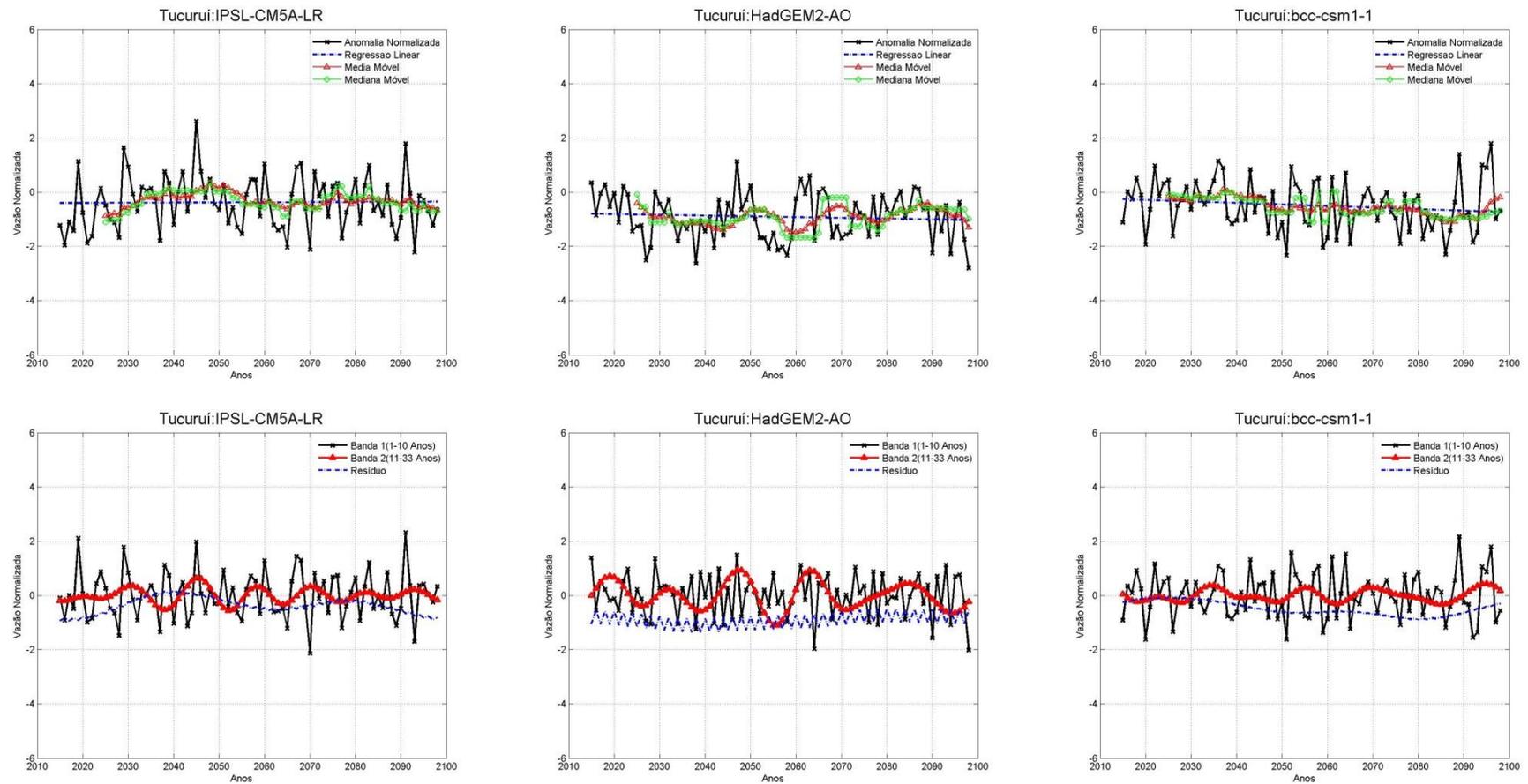
Nas figuras 35, 36 e 37 são mostradas as tendências das vazões médias anuais e as bandas geradas a partir da transformada em ondeletas dos modelos IPSL-CM5A-LR, HadGEM2-AO e bcc-csm1-1 para o cenário RCP4.5 para Tucuruí, Belo Monte e Santo Antônio, respectivamente, para o período de 2015 a 2098.

Os modelos apresentados mostram comportamento semelhante nas bacias analisadas para esse setor. Em Tucuruí os modelos indicam um aumento na variabilidade da série, com um evidente aumento da amplitude oscilação das vazões médias anuais para todo o século. Isto mostra que os eventos extremos nessa bacia tendem a ser mais intensos do que no século XXI, principalmente aqueles com vazões abaixo da média histórica.

Já em Belo Monte, os modelos sugerem que as vazões médias anuais devem ser reduzidas, esse sinal é claramente captado pelo resíduo. Isto sugere que essa região atravessará mudanças no clima e/ou apresenta um padrão de variação de baixíssima frequência sinalizado pelo resíduo.

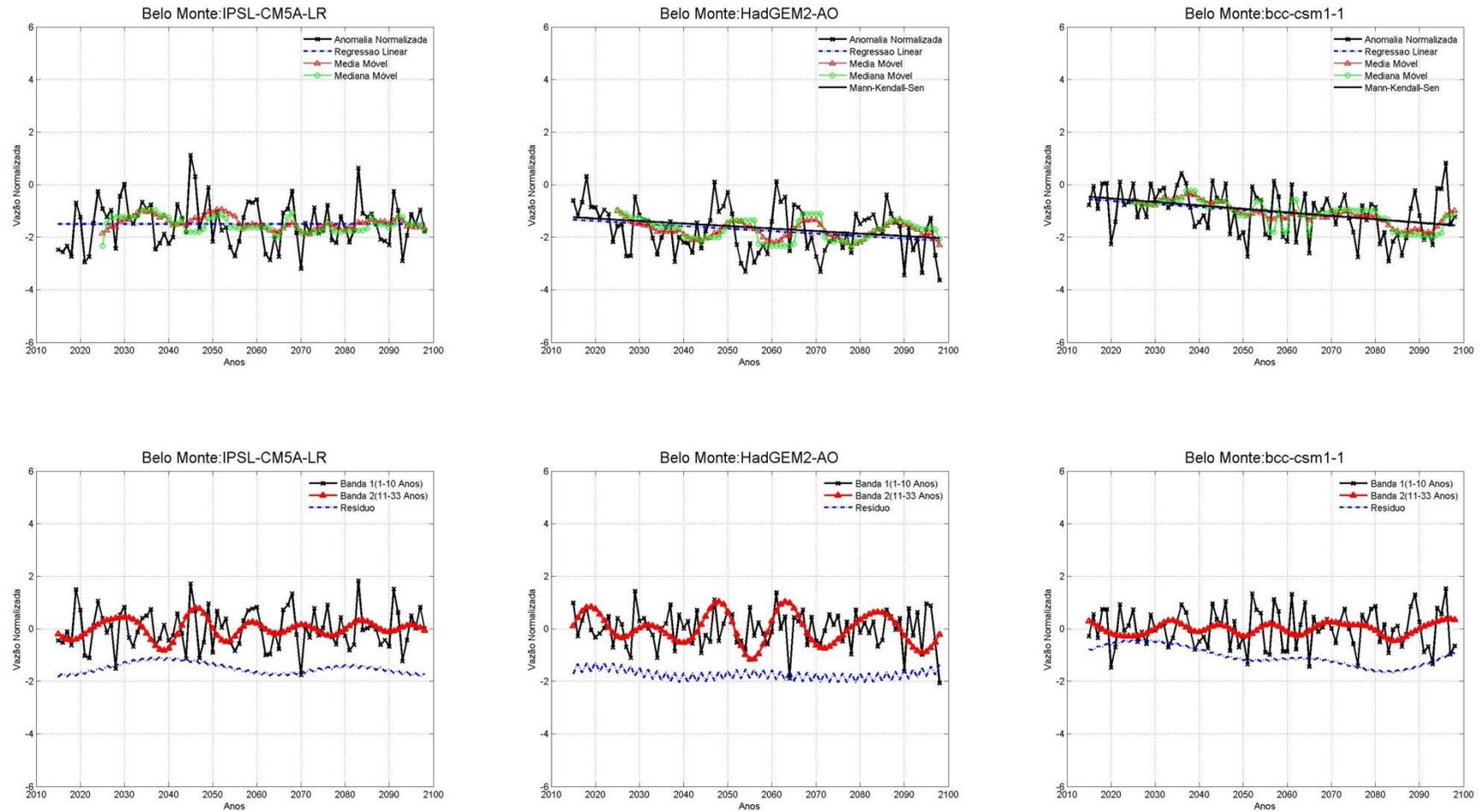
Na bacia Santo Antônio há um pronunciado padrão de variação natural da série captado média e mediana móveis de 10 anos. Apesar de certa divergência em relação ao sinal da tendência, os mesmos concordam com o aumento na variabilidade da série, já mostrado em Tucuruí. Isto indica a possibilidade de eventos extremos mais intensos nessa bacia, este aumento é mostrado na banda de baixa frequência que tem um aumento em sua amplitude ao longo do século XXI.

Figura 35 - Tendências das séries de vazões para Tucuruí dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.



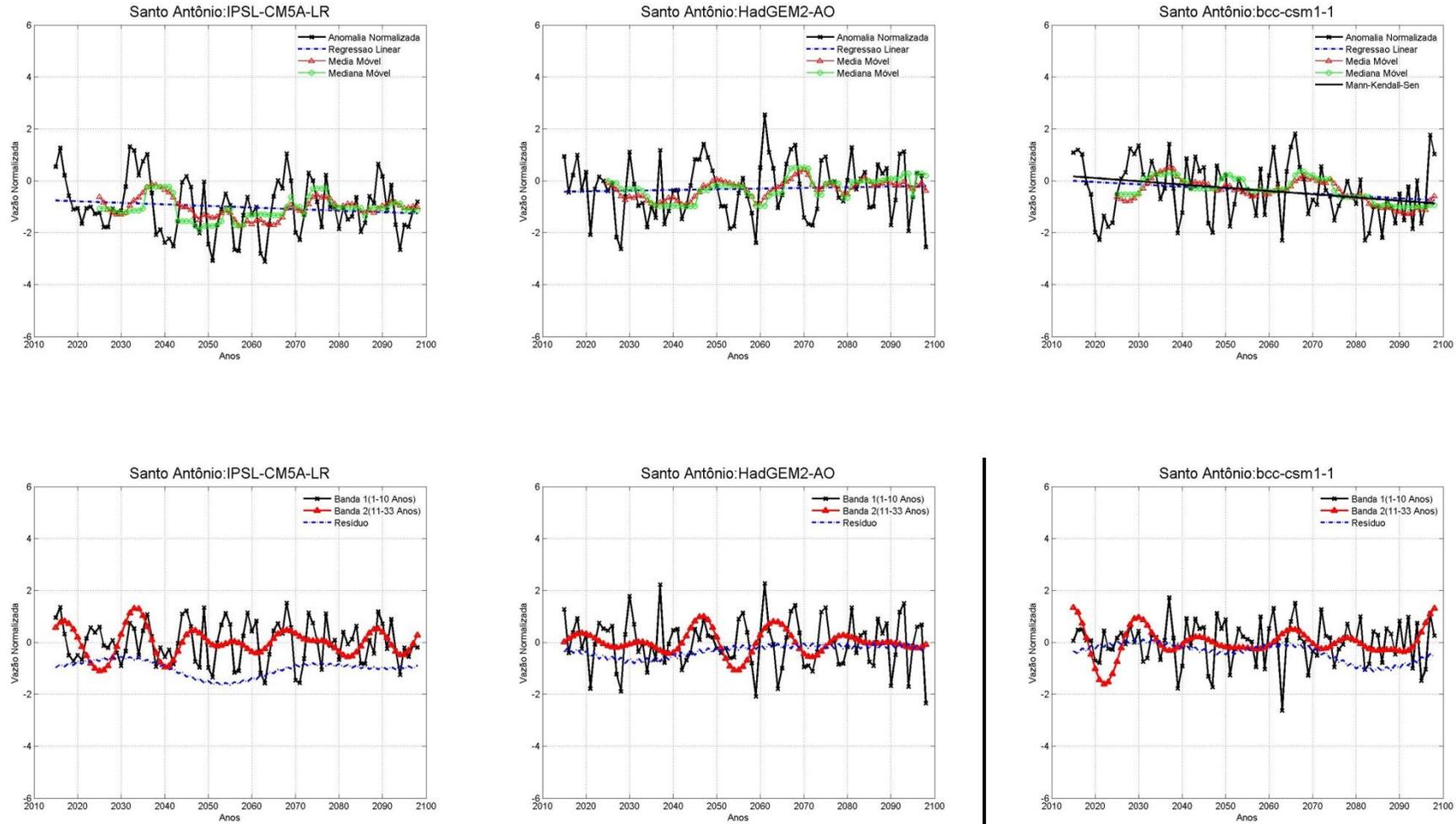
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 36 - Tendências das séries de vazões para Belo Monte dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 37 - Tendências das séries de vazões para Santo Antônio dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

7.4. Cenário RCP8.5

Nesta seção serão mostrados os resultados obtidos para o cenário RCP8.5 para o setor elétrico do Brasil.

7.4.1. Análise das Anomalias nas médias Anuais

Na Tabela 11 são mostrados os extremos inferiores e superiores de anomalia na média percentual anual nas vazões mostrada pelos modelos para os períodos de 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098 para o cenário RCP 8.5 em relação ao período de 1950 a 1999 dos modelos globais do CMIP5. Os modelos mostram maior dispersão no terceiro período, isto é associado, muito provavelmente ao fato da incerteza das projeções serem função do tempo.

Para as bacias do setor Sudeste/Centro-Oeste o conjunto de modelos analisados sugerem uma maior possibilidade de redução nas vazões no período de 2010 a 2039, visto que a média entre as projeções de vazões dos modelos é aproximadamente -10% com desvio padrão em torno de 9% para a maioria das bacias desse setor. Para os demais períodos há uma maior dispersão entre os modelos com desvio de superiora 10% em todas as bacias. Porém, os modelos sugerem margens que vão desde um aumento de 3% até reduções de aproximadamente 40% no período de 2040 a 2069 nas bacias de Emborcação, Nova Ponte, Itumbiana e São Simão.

Assim como no cenário RCP4.5, no setor Sul há uma grande variação espacial nas anomalias de vazões, com as bacias N. Avanhadava e Porto Primavera indicando sinais distintos das bacias Salto Caxias, Itá e D. Francisca, principalmente no período de 2010 a 2039.

As bacias de Salto Caxias, Itá e D. Francisca a maioria dos modelos indicam possibilidade de aumento nas vazões nos três períodos, com média das anomalias anuais sendo positiva nos três períodos. Enquanto em N.Avanhadava e Porto Primavera no período de 2010 a 2039 os modelos analisados indicam maior possibilidade de reduções nas vazões anuais, sendo que a média entre as anomalias de vazões na bacia Porto Primavera indica os maiores valores absolutos, com diminuições da ordem de 20% no terceiro período.

Na bacia de Itaipu a média entre as anomalias indica maior possibilidade de reduções nas vazões médias anuais nos três períodos, principalmente no período de

2010 a 2039 onde a média dos modelos é -6,5% com desvio padrão de 7,4%. Nos demais períodos é importante destacar a margem de possibilidades, visto que os modelos de maior e menor anomalia divergem bastante, respectivamente, 24,9% e -41,1% no período de 2070 a 2098.

No setor Nordeste os modelos indicam bastante incerteza na bacia do Xingó, não havendo convergência a respeito dos resultados dos mesmos, o desvio padrão entre as anomalias dos modelos apontam valores superiores a 30% nos três períodos. Porém, em Sobradinho os modelos sinalizam reduções nas vazões no período de 2010 a 2039, divergindo apenas em magnitude. Já em Três Marias os modelos sinalizam a possibilidade de leve aumento, de até aproximadamente 8% no período de 2070 a 2098, a reduções de maior magnitude, de até 25% em cada período.

Já nas bacias do setor Norte os modelos analisado sugerem uma maior possibilidade de reduções de vazões, de até aproximadamente 40% em Tucuruí, Belo Monte e Lajeado,ou normalidade no período de 2010 a 2039.

Apesar da divergência entre os modelos, nos demais períodos a média dos modelos sugere reduções de aproximadamente 15% em cada bacia do setor no período de 2040 a 2069.

Na bacia de Santo Antônio os modelos analisados sugerem que as vazões médias anuais devem reduzir em pelo menos 7% em cada período de 30 anos

Tabela 11 - Anomalias percentuais máximas e mínimas de vazões anuais sinalizadas pelo conjunto de modelos CMIP5 usados no experimento para os períodos de 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098 em relação ao período de 1950 a 1999 para as bacias da ONS.

Bacias	2010-2039				2040-2069				2070-2098			
	MAX	MIN	MED	DESV	MAX	MIN	MED	DESV	MAX	MIN	MED	DESV
Emborcação	3,5	-28,6	-12,3	9,1	3,0	-36,6	-14,4	11,6	4,3	-54,9	-20,4	16,7
Nova Ponte	5,0	-27,5	-11,8	9,4	2,7	-33,4	-12,8	11,6	7,2	-52,1	-17,3	16,5
Itumbiana	3,4	-29,4	-13,2	8,8	1,2	-38,6	-16,1	11,7	1,0	-57,5	-23,7	16,1
São Simão	1,5	-34,2	-14,9	9,5	-0,4	-44,4	-18,5	13,2	-2,2	-65,6	-27,7	18,3
Furnas	2,9	-20,2	-7,3	7,5	7,5	-25,5	-5,4	10,7	11,8	-33,4	-8,1	15,8
Água Vermelha	2,4	-26,3	-11,1	7,8	7,5	-33,5	-11,5	12,2	8,5	-43,5	-15,5	16,5
N. Avandava	2,9	-28,7	-10,1	8,8	11,4	-38,5	-10,5	14,9	12,1	-45,7	-14,2	19,9
Porto Primavera	-2,7	-34,0	-13,5	8,1	3,5	-43,9	-16,1	14,3	10,1	-55,9	-23,3	18,3
Rosana	5,7	-22,0	-2,9	7,1	16,1	-27,8	-4,5	13,8	29,6	-38,7	-3,4	19,2
Itaipú	3,9	-26,0	-6,5	7,4	15,4	-34,4	-9,8	14,3	24,9	-41,1	-12,0	19,1
Santa Cecília	3,7	-21,6	-6,0	7,3	10,3	-28,1	-3,8	11,6	16,6	-35,8	-5,7	16,4
Salto Caxias	17,0	-11,6	3,4	6,4	23,3	-19,9	3,9	12,6	39,3	-23,0	10,6	18,1
Itá	21,6	-11,5	6,1	8,8	41,6	-21,6	9,4	18,8	70,4	-18,2	18,3	26,8
D. Francisca	24,8	-11,3	6,5	11,2	40,2	-22,9	7,1	21,4	60,7	-21,6	16,0	28,9
Três Marias	2,7	-27,5	-10,8	9,1	4,5	-31,2	-10,9	10,5	8,2	-47,6	-15,5	16,4
Sobradinho	-3,3	-45,4	-18,7	12,6	11,3	-54,7	-18,5	18,3	31,1	-65,7	-22,9	24,5
Xingó	56,7	-63,5	-16,7	34,8	190,8	-68,6	-1,1	88,6	395,7	-89,5	7,0	139,9
Serra da Mesa	2,8	-34,6	-14,6	12,0	8,1	-45,1	-18,2	16,5	9,7	-59,7	-27,2	20,1
Lajeado	-1,2	-43,6	-16,7	13,3	20,7	-51,6	-15,7	20,7	26,0	-53,6	-21,4	22,6
Tucuruí	2,9	-42,2	-15,7	13,7	31,6	-55,5	-18,5	24,0	38,7	-72,0	-30,2	30,8
Belo Monte	-0,8	-40,4	-17,7	10,9	19,4	-61,8	-26,7	19,8	11,0	-78,3	-43,5	23,7
Teles Pires	-2,4	-19,9	-9,6	5,6	1,6	-32,3	-13,1	9,6	-4,1	-42,8	-21,3	11,6
S. L. Tapajós	2,5	-18,7	-8,3	5,9	0,8	-30,3	-13,0	9,5	-4,4	-41,3	-21,7	12,7
Santo Antônio	-6,2	-28,5	-14,5	6,9	-7,0	-49,5	-24,0	13,8	-12,8	-69,7	-35,2	19,0

*Max: Indica a anomalia na vazão anual do modelo do CMIP5 com maior valor para Bacia, cenário e período em questão; *Min: Indica a anomalia na vazão anual do modelo do CMIP5 com menor valor para Bacia, cenário e período em questão; *Med: Indica a anomalia média da vazão anual entre os modelos do CMIP5 para Bacia, cenário e período em questão e *Desv: Indica desvio padrão entre as anomalias da vazão anual dos modelos do CMIP5 para Bacia, cenário e período em questão.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 38 é mostrado o impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos (2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP 8.5 em relação ao século XX (1950-1999) para as bacias de Furnas e Emborcação.

Os modelos MIROC_ESM, BNU-ESM, IPSL-CM5A-LR e CANESM2, assim como no cenário RCP 4.5, indicam reduções nas principais bacias desse setor para todos os períodos. Essas diminuições são de maior magnitude no cenário RCP8.5, podendo atingir valores superiores a 20% em cada período de 30 anos em Furnas, segundo este modelos.

Da mesma forma, os modelos GFDL-ESM2M e GISS-E2-R (com rodadas indisponíveis para o cenários RCP4.5) indicam reduções também nos três períodos para todas as bacias deste setor. Sendo que o modelo GFDL-ESM2M indica uma possível tendência negativa em todas as bacias deste setor, conforme sugere a figura 20.

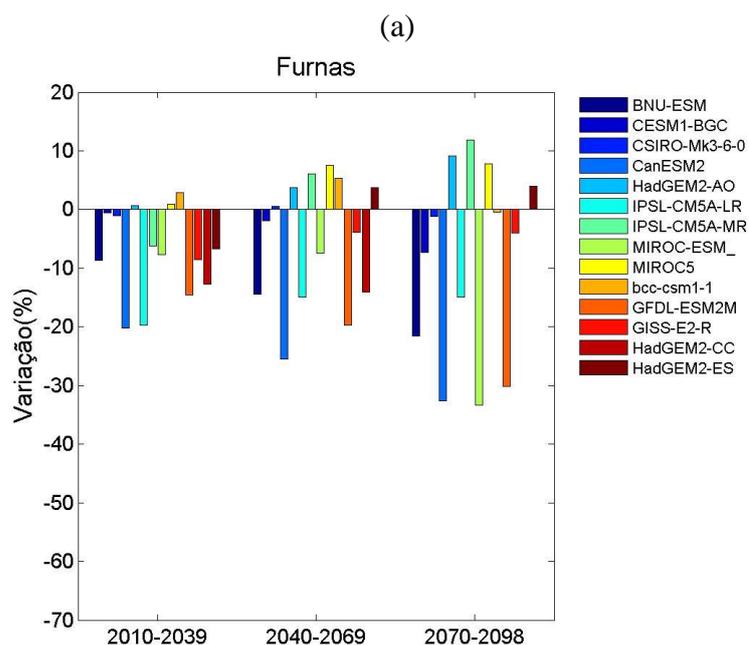
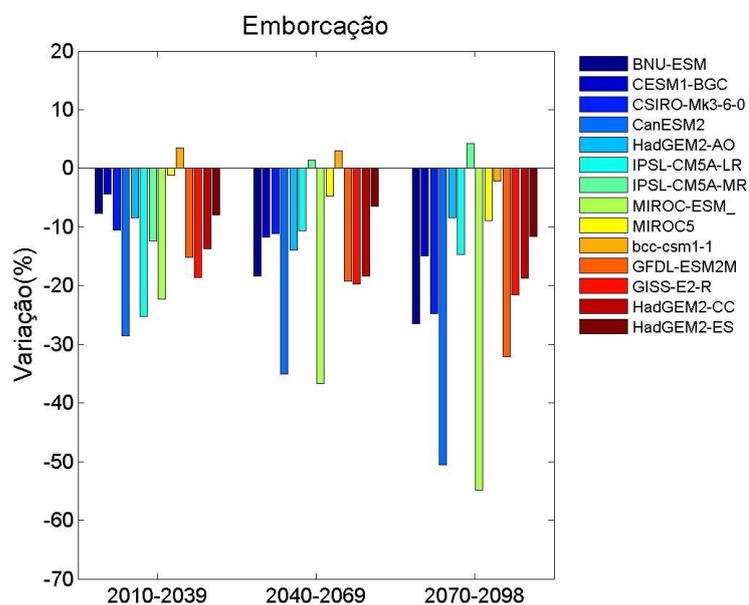
Estes modelos sugerem que é necessário um maior investimento em todo o SIN para adaptar-se as condições climáticas do século XXI.

Os modelos CESM1-BGC, CSIRO-Mk3-6-0 e HadGEM2-AO, assim como no cenário RCP4.5, indicam maior variação espacial nos impactos nas vazões anuais, indicando reduções na bacia Emborcação nos três períodos analisados e normalidade em Furnas.

O modelo IPSL-CM5A-MR mostra reduções nas vazões médias anuais no período de 2010 a 2039, seguidos por um possível aumento nos períodos de 2040 a 2069 e 2070 a 2098.

Já o modelo bcc-csm1-1 mostra leve aumento nas vazões anuais deste setor no primeiro e segundo períodos e normalidade no período de 2070 a 2098. Isto indica que este modelos não sugere impactos significativos no clima desta região para este cenário, provavelmente o sinal mostrado é associado a variabilidade decadal da precipitação.

Figura 38 - Impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos(2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 em relação ao século XX (1950-1999) para : (a) Emborcação e (b) Furnas.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 39 é mostrado o impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos (2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP 8.5 em relação ao século XX (1950-1999) para as bacias de Porto

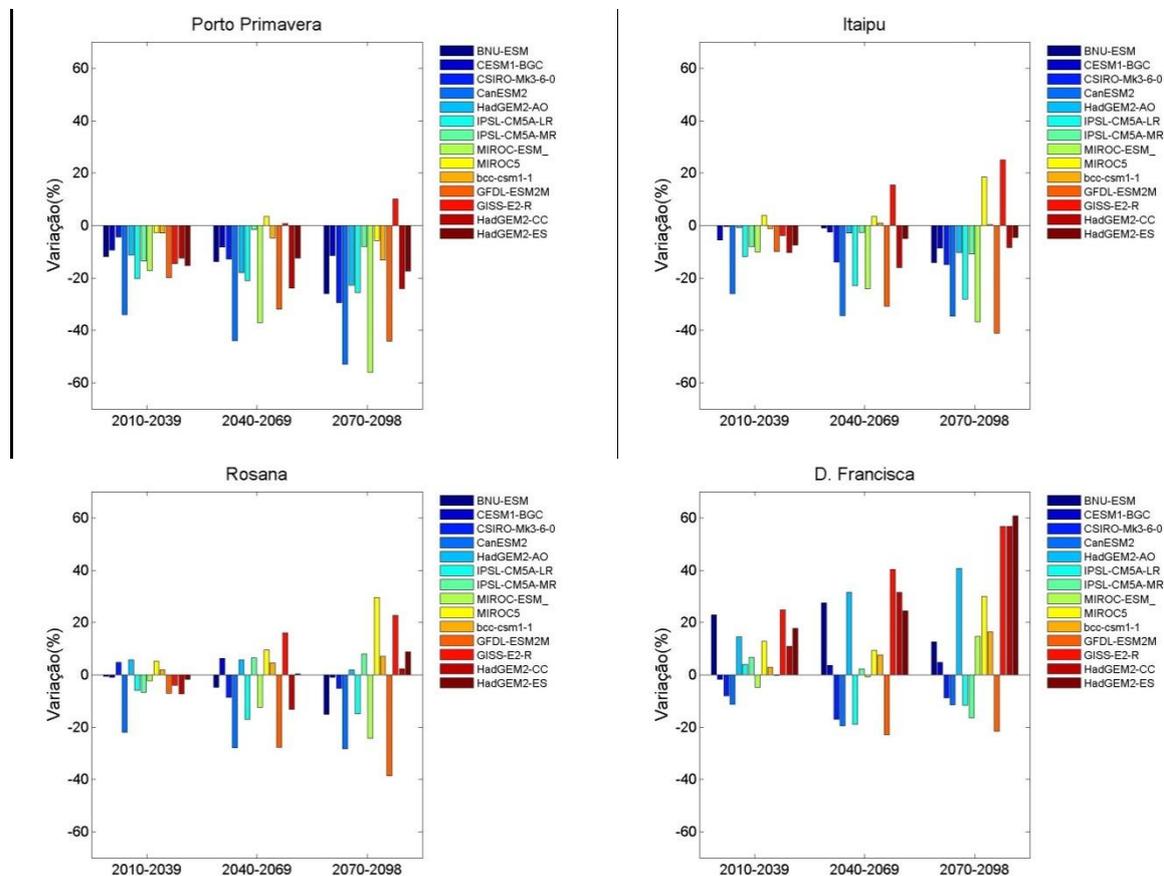
Primavera, Itaipu, Rosana e D.Francisca. Conforme já mostrado na tabela 10, há uma grande variação espacial nas anomalias de vazões anuais.

A maioria dos modelos projeta reduções nas vazões em Porto Primavera e Itaipu, porém divergem nas bacias Rosana e D. Francisca.

Os modelos GFDL-ESM2M e CanESM2 sinalizam reduções nas vazões médias anuais em todas bacias deste setor em todos períodos analisados. Sendo a magnitude das reduções aproximadamente 20% por aproveitamento hidroelétrico analisado.

O modelo MIROC5 indicam aumento nas vazões médias anuais em Itaipu, Rosana e D. Francisca, nas principais bacias desse setor para todos, atingindo valores superiores a 10% no período de 2070 a 2098, associados a pequenas flutuações em torno da média histórica na Bacia de Porto Primavera. Enquanto o modelo bcc-csm1-1 indica reduções de magnitude inferior aos demais em Porto Primavera nos períodos de 2010 a 2039 e 2040 a 2069 (inferior a 5%) associado a normalidade em Itaipu e Rosana e uma leve tendência positiva em D.Francisca, que indica aumento nas vazões médias anuais superiores a 10% no período de 2070 a 2098 nesta bacia.

Figura 39 - Impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos (2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 em relação ao século XX (1950-1999) para : (a) Porto Primavera; (b) Itaipu; (c) Rosana e (d) D. Francisca.



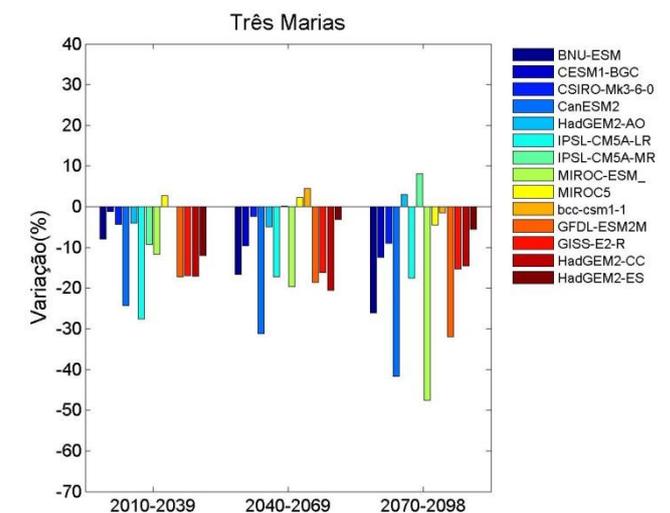
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 40 é mostrado o impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos (2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP 8.5 em relação ao século XX (1950-1999) para as bacias de Três Marias e Sobradinho. Conforme já mostrado na tabela 6, os modelos analisados indicam reduções nas vazões em Sobradinho no período de 2010 a 2039, divergindo apenas em magnitude.

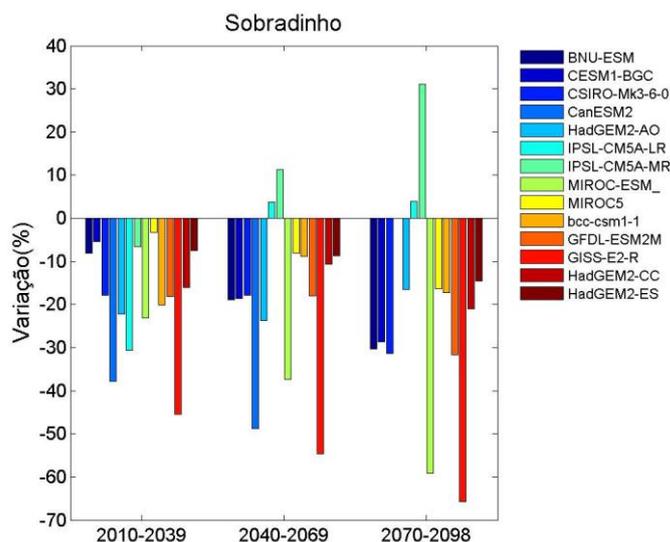
A maioria dos modelos indica reduções nas vazões anuais nestas bacias. Sendo os modelos GISS-E2-R e CanESM2 aqueles que indicam maiores diminuições nas vazões. Este último sugere projeções maiores que 30% em cada período de 20 anos em Sobradinho e maiores que 20% em Três Marias.

O modelo IPSL-CM5A-MR apresenta aumento nas vazões médias anuais em Sobradinho nos períodos de 2040 a 2069 e 2070 a 2098, indicando uma possível tendência positiva.

Figura 40 - Impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos(2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 em relação ao século XX (1950-1999) para : (a) Três Marias e (b) Sobradinho.



(a)



(b)

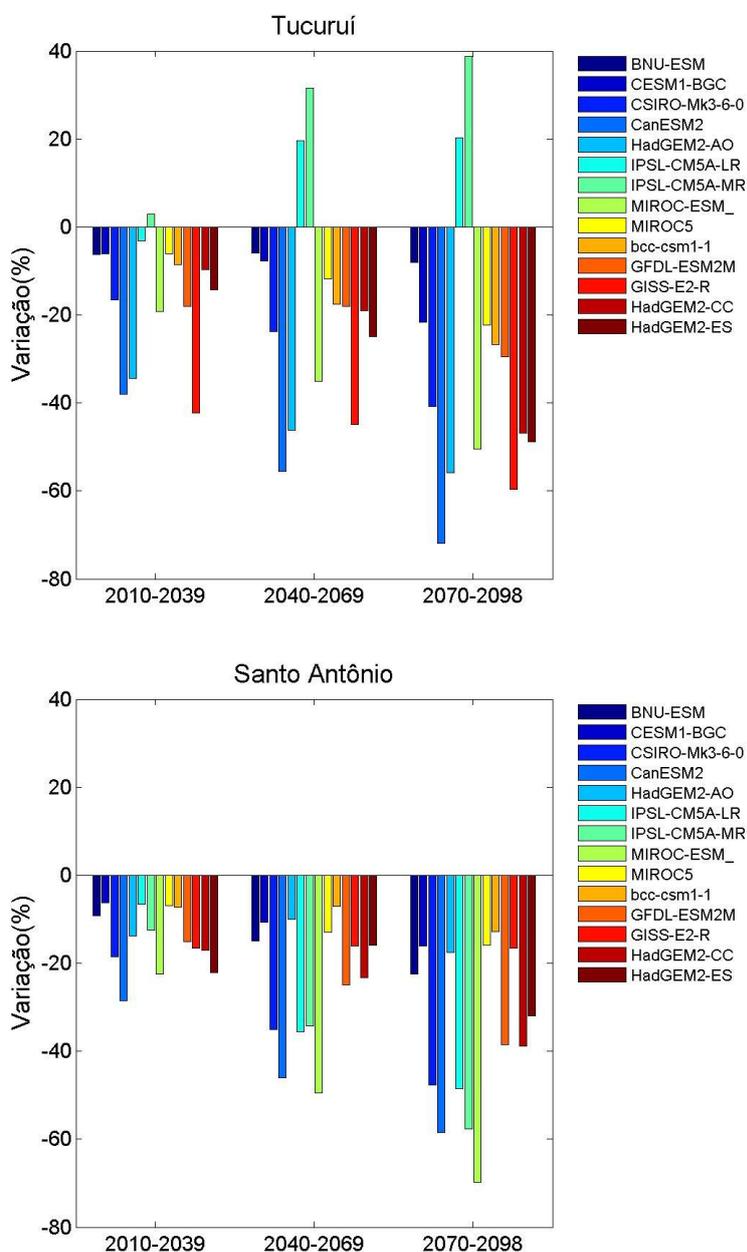
O modelo CanESM2 não completou a simulação em Sobradinho, por isso não é mostrado no terceiro período.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 41 é mostrado o impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos (2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP 8.5 em relação ao século XX (1950-1999) para as bacias Tucuruí e Santo Antônio. Assim como no cenário RCP4.5, a maioria dos modelos sinalizam uma maior possibilidade de reduções nas vazões médias anuais nas bacias deste setor.

Os modelos IPSL-CM5A-LR e IPSL-CM5A-MR sinalizam que os impactos neste setor possuem grande variabilidade espacial, sendo os únicos modelos que apontam algum aumento nas vazões em Tucuruí nos períodos de 2040 a 2069 e 2070 a 2098, associados a reduções, de aproximadamente 40%, em Santo Antônio. Os demais modelos sugerem reduções nas vazões médias anuais de pelo menos aproximadamente 10% por bacia por cada período de 30 anos.

Figura 41 - Impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos(2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 em relação ao século XX (1950-1999) para : (a) Tucuruí e (b) Santo Antônio.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

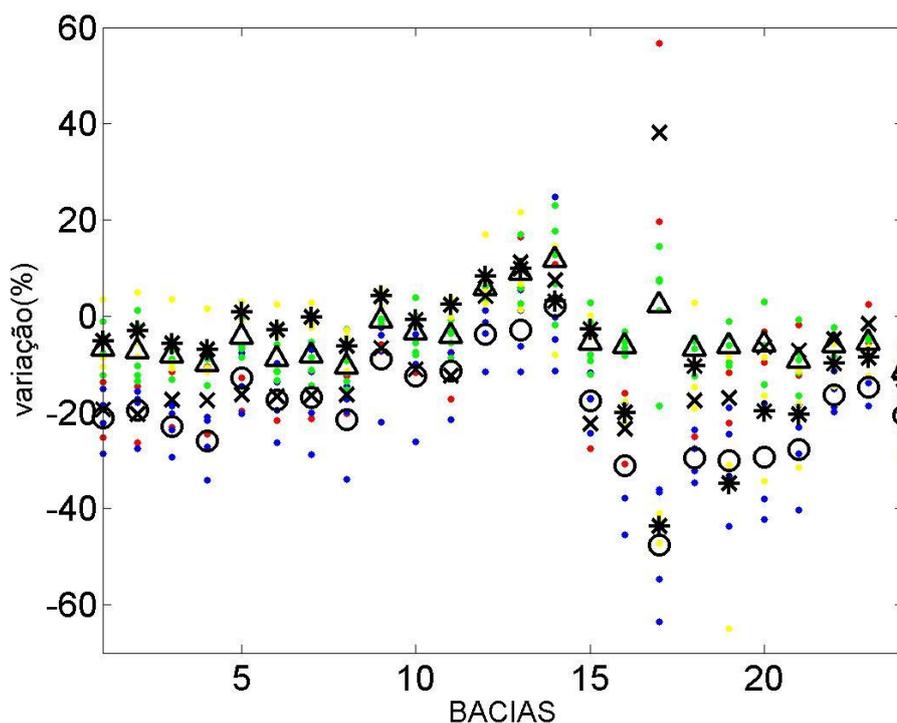
7.4.2. Análise de Agrupamento

Na Figura 42 são mostrados as anomalia das vazões médias anuais dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5, os respectivos *clusters* que os representaram para o período de 2010 a 2039 e o centroide dos mesmos. Os centroides apresentam maior

dispersão nas bacias do setor Nordeste e nas bacias do setor Norte, principalmente na bacia do Xingó. Enquanto na Tabela 12 são mostrados os modelos pertencentes a cada um dos *clusters* e são destacados os mais próximos a cada um dos centroides.

O modelo HadGEM2-CC representa o modelo mais próximo do centroide do cluster 1, também composto pelo modelo IPSL-CM5A-LR. Já o modelo MIROC-ESM é o mais próximo ao centroide do cluster 2, enquanto o CESM1-BGC é o mais próximo do centroide do cluster 3 e o modelo HadGEM2-AO é o mais próximo do centroide do cluster 4.

Figura 42 - Anomalia das vazões dos clusters para o período de 2010 a 2039 ecentroide dos mesmos. Cluster 1: modelos em vermelho; Cluster 2: modelos em azul; Cluster 3: modelos em verde; Cluster 4: modelos em amarelo; Centróide 1: representado por x; Centróide.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Tabela 12 - Modelos do CMIP5 utilizados para o cenário RCP8.5 e seus respectivos clusters.

Modelos	Cluster-RCP 8.5
BNU-ESM	3
CESM1-BGC	3
CSIRO-Mk3-6-0	4
CanESM2	2
HadGEM2-AO	4
IPSL-CM5A-LR	1
IPSL-CM5A-MR	3
MIROC-ESM	2
MIROC5	3
bcc-csm1-1	4
GFDL-ESM2M	2
GISS-E2-R	2
HadGEM2-CC	1
HadGEM2-ES	3

Em negrito os modelos mais próximos de cada centroíde de cada *cluster*.
 Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 43 são mostrados as anomalia das vazões médias anuais dos modelos mais próximos a cada centroíde para o cenário RCP8.5 para os periodo de 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098. Os modelos, assim como no setor RCP4.5, convergem quanto ao sinal da anomalia no setor Norte, indicando que as vazões médias anuas devem reduzir na maioria das bacias deste setor do SIN. Porém, divergem principalmente em Xingó, Salto Caxias, Itá e D. Francisca.

O modelo HadGEM2-CC indica reduções em praticamente todo o setor Sudeste/Centro-Oeste e Norte, principalmente em Tucuruí e Belo Monte (onde o modelo apresenmta uma grande tendência negativa, conforme tabela 12). No setor Sul a grande variabilidade espacial das anomalias, enquanto há aumento das vazões nas bacias Salto Caxias, Itá e D. Francisca nos três períodos de 30 anos, há reduções nas vazões médias anuais em Porto Primavera e N. Avanhandava também em todos períodos avaliados. Já no setor Nordeste o modelo projeta reduções de aproximadamente 15% a cada período de 30 anos nas vazões médias anuais em Sobradinho e Três Marias, associados a sucessivos aumentos em Xingó.

A configuração do cluster 1 indica que a oferta de energia gerada pelo setor Sul pode aumentar em algumas regiões e diminuir em outras desse setor, indicando que há a possibilidade de transmissão de energia para manter os níveis de garantia do século XX

no século XXI nesta região. Porém, a sinalização negativa mostrada em todo o setor Norte associado às reduções de menor magnitude no setor Sudeste/Centro-oeste, indicam que a região Sudeste do País (principal setor econômico do Brasil) pode ter problemas para atender a demanda energética se novos investimentos em infraestrutura hídrica não forem realizados.

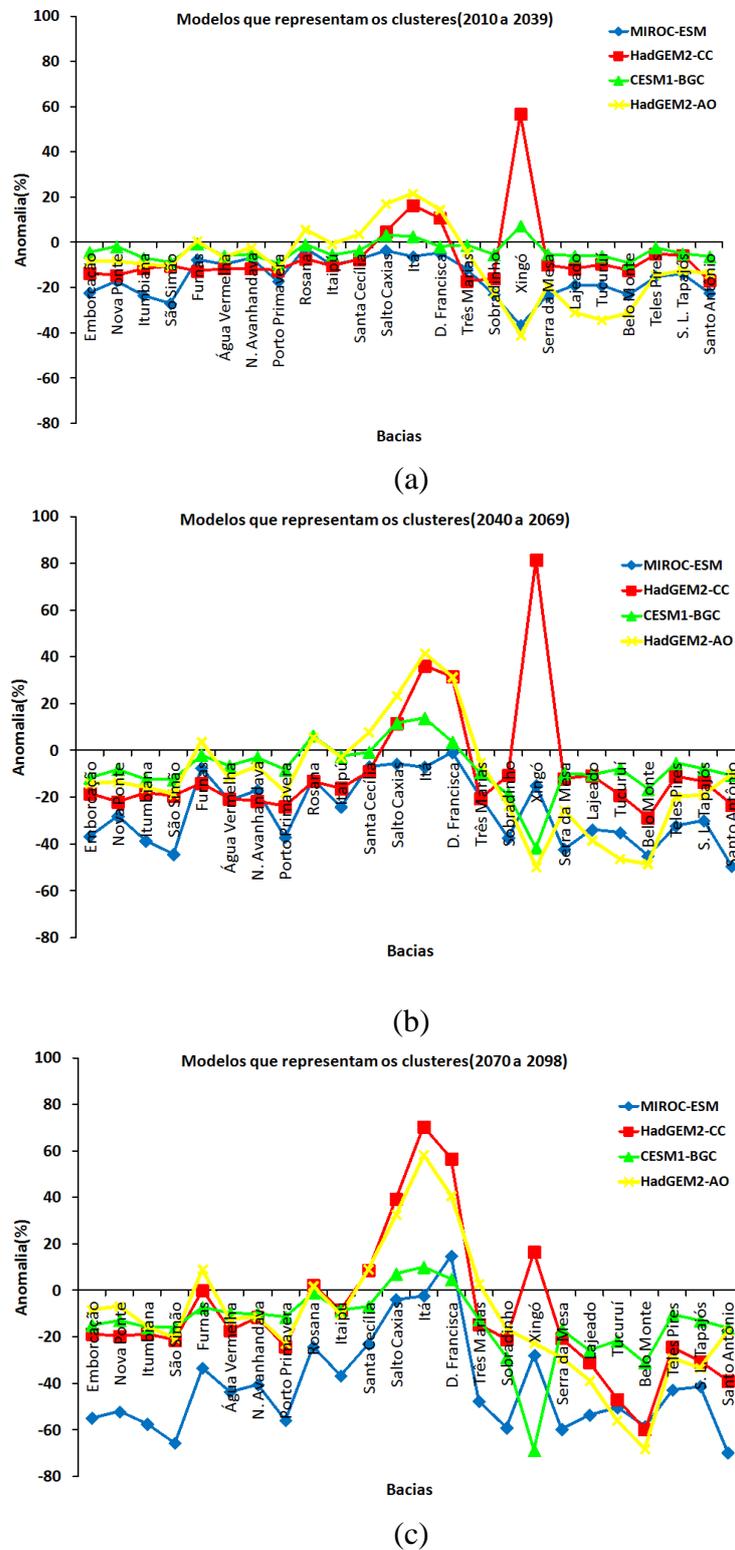
O *cluster 2*, representado pelo modelo MIROC-ESM, indica reduções nas principais bacias de cada setor para todos os períodos, principalmente no setor Norte, indicando tendência negativa na maioria das bacias (conforme tabela 12). Para as bacias do setor Sudeste/Centro-Oeste no período de 2070 a 2098, este modelo indica reduções nas vazões anuais de aproximadamente 40% por bacia.

O *cluster 2* sugere que é necessário um maior investimento em infraestrutura hídrica, uma maior participação de energia proveniente de termelétricas na matriz de energia elétrica brasileira e/ou um maior investimento em fonte de energias renováveis (como eólica e solar, por exemplo) para que a redução na oferta não possa impactar a geração de energia e os níveis de garantia do século XX possam ser mantidos no século XXI.

O modelo CESM1-BGC mostra reduções nas vazões médias anuais inferiores a 5% na maioria das Bacias do SIN no período de 2010 a 2039, indicando que nesse período se a demanda energética for mantida o sistema não deve ter grandes problemas para atendê-la. Nos períodos de 2040 a 2069 e 2070 a 2098 este modelo indica flutuações em torno da normalidade no setor Sul, associados a anomalias negativas em todo os aproveitamentos dos setores Norte e Nordeste do SIN, atingindo valores inferiores a -15% no último período.

O modelo HadGEM2-AO mostra impactos significativos nos setores Norte e Nordeste nos três períodos, principalmente em Belo Monte e Tucuruí, associados a aumentos superiores a 20 % em cada 30 anos nas Bacias de Salto Caxias, Itá e D.Francisca. Destaca-se ainda, a condição de normalidade projetada para Furnas e Itaipu nos três períodos de 30 anos.

Figura 43 - Anomalia das vazões dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 mais próximos dos centroides, para o período de (a) 2010 a 2039; (b) 2040 a 2069 e (c) 2070 a 2098.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Tabela 13 são mostradas as declividades da tendência dos modelos mais próximos a cada centroide para cenários RCP 8.5 do CMIP5 para o teste de Man Kendall-Sen das vazões anuais normalizadas. O modelo HadGEM2-CC algumas bacias com tendência positiva no setor Sul, associado a tendência negativa no setores Norte e Nordeste. Já cluster 2 representado pelo modelo MIROC-ESM indicam reduções nas principais bacias de cada setor para todos os períodos, principalmente no setor Norte. Enquanto o CESM-BGC não indica tendência significativa nos Setores Sul e Sudeste/Centro-oeste, porém indicam tendência nos setores Norte e Nordeste. Já o HadGEM-AO mostra tendência negativa em algumas bacias do setor Norte, aliado a tendência positiva em D.Francisca e Itá.

Tabela 13 - Tendência segundo o Teste de Man-Kendal-Sen identificada para as vazões anuais padronizadas dos modelos do CMIP5 do cenário RCP8.5 mais próximos do centroíde de cada cluster.

Bacias	HadGEM2-CC	MIROC-ESM	CESM1-BGC	HadGEM2-AO
Emborcação	-	-0,0295	-	-
Nova Ponte	-	-0,0303	-	-
Itumbiana	-	-0,0359	-	-
São Simão	-0,0129	-0,0385	-	-
Furnas	0,0108	-0,0335	-	-
Água Vermelha	-	-0,0305	-	-
N. Avanhandava	-	-0,0282	-	-
Porto Primavera	-0,0133	-0,0363	-	-0,0092
Rosana	-	-0,0202	-	-
Itaipú	-	-0,0232	-	-
Santa Cecília	0,0178	-0,0238	-	-
Salto Caxias	0,0364	-	-	-
Itá	0,0475	-	-	0,0315
D. Francisca	0,0278	0,0081	-	0,0181
Três Marias	-	-0,0331	-	-
Sobradinho	-0,011	-0,0222	-0,0184	-
Xingó	-	0,0040	-0,0069	-
Serra da Mesa	-0,0129	-0,0283	-	-
Lajeado	-0,0207	-0,0182	-0,0144	-
Tucuruí	-0,0409	-0,0191	-0,0147	-0,0161
Belo Monte	-0,0728	-0,0239	-0,0306	-0,0441
Teles Pires	-0,0491	-0,0433	-0,0089	-0,0246
S. L. Tapajós	-0,0659	-0,0422	-0,0123	-0,0453

Santo Antônio	-0,0307	-0,0499	-0,0117	-
----------------------	---------	---------	---------	---

- Ausência de tendência significativa

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 44 são mostradas as tendências das vazões médias anuais e as bandas geradas a partir da transformada em ondeletas dos modelos CESM1-BGC, HadGEM2-AO, MIROC-ESM e HadGEM2-CC para o cenário RCP8.5 para Furnas para o período de 2015 a 2098. Todos os modelos concordam com o aumento da amplitude da banda de baixa frequência, indicando a possibilidade de eventos extremos cada vez mais frequentes.

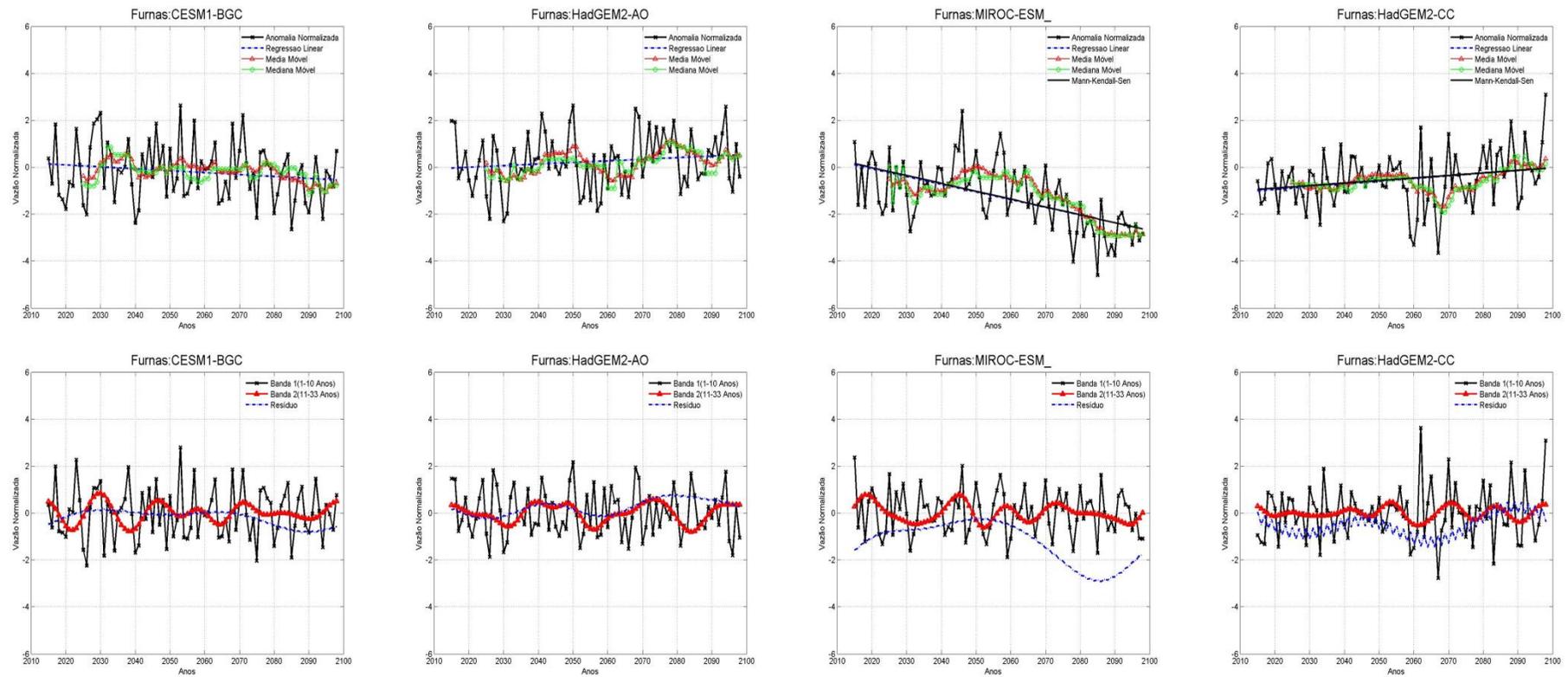
O modelo CESM1-BGC mostra um possível padrão de variabilidade de baixa frequência captado pela média e mediana móvel de dez anos, indicando uma grande alternância entre anos chuvosos e secos. Destaca-se o aumento na variabilidade da série, com o aumento da amplitude de oscilação das vazões médias anuais para todo o século. Apesar de no período de 2070 a 2098 as vazões do modelo estarem na fase seca, claramente os eventos de secas atingem patamares mais intensos do que nos demais períodos, esse padrão é captado pelo resíduo da transformada em ondeletas.

O modelo HadGEM2-AO, assim como o CESM1-BGC, mostra um possível padrão de baixa frequência e uma intensificação da amplitude da banda de baixa frequência. A leve tendência positiva mostrada pela regressão linear justificam os valores positivos encontrados na anomalia das vazões de 2040 a 2069 e 2070 a 2098.

O modelo MIROC-ESM indica tendência negativa em todas as bacias do setor Sudeste/Centro-Oeste, com padrão semelhante ao mostrado em Furnas na figura 26. Onde o modelo indica uma acentuada tendência negativa, notada principalmente no período de 2060 a 2098. Essa tendência é creditada ao resíduo da transformada em ondeletas, o que possivelmente é um dos efeitos da mudança climática global no ciclo hidrológico da região.

O modelo HadGEM2-CC mostra também um padrão de variação de baixa frequência tendência positiva segundo o teste de Man-Kendall-Sem. Há uma clara mudança de amplitude nos eventos a partir de 2050, com mudanças nos patamares do eventos de vazões acima da média na fase fria (fases essas, mostrada pela média e mediana móveis) no período de 2080 a 2098. Indicando o aumento de eventos acima da média histórica, sendo estes mais intensos do que no século XX.

Figura 44 - Tendências das séries de vazões para Furnas dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 45 e na Figura 46 são mostradas as tendências das vazões médias anuais e as bandas geradas a partir da transformada em ondeletas dos modelos CESM1-BGC, HadGEM2-AO, MIROC-ESM e HadGEM2-CC para o cenário RCP8.5 para as bacias de Itaipu e D.Françisca para o período de 2015 a 2098. Os modelos mostram variabilidade espacial neste setor, com características distintas para as projeções das bacias de Itaipu e D.Françisca.

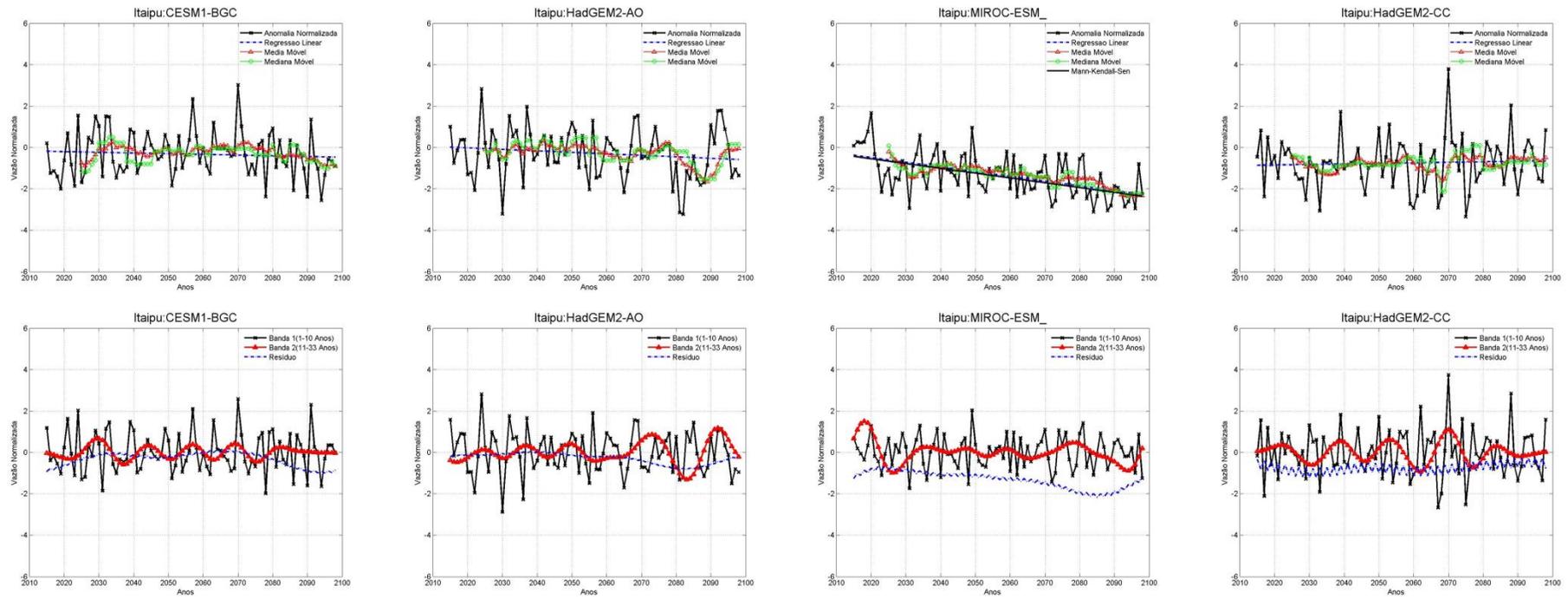
O modelo CESM1-BGC não mostra impactos significativos nas vazões médias anuais em D.Françisca em todo o século XXI. Em Itaipu há um grande alternância de anos secos e chuvosos, sendo os eventos de anos abaixo da média cada vez mais intensos, principalmente no período de 2070 a 2098. Assim como em Furnas, apesar de no período de 2070 e 2098 as vazões do modelo estarem na fase seca, claramente os eventos de secas atingem patamares mais intensos do que nos demais períodos, esse padrão é captado pelo resíduo da transformada em ondeletas.

O modelo HadGEM2-AO mostra em Itaipu uma aumento na amplitude de variação da série, com ocorrência de uma maior quantidade de efeitos extremos. Assim como sinalizado pelo modelo HadGEM2-CC,este também mostra tendência positiva para a bacia de D.Françisca, com mudanças significativas nos valores das vazões médias anuais a partir de 2060.

O modelo MIROC-ESM indica tendência negativa em Itaipu, sugerindo reduções dos patamares de vazões médias anuais já a partir do início da série do século XXI. Enquanto na bacia de D.Françisca esse modelo mostra leve tendência positiva, sendo os padrões de variabilidade naturais da série o maior responsável pelo sinal da anomalia na Figura 43.

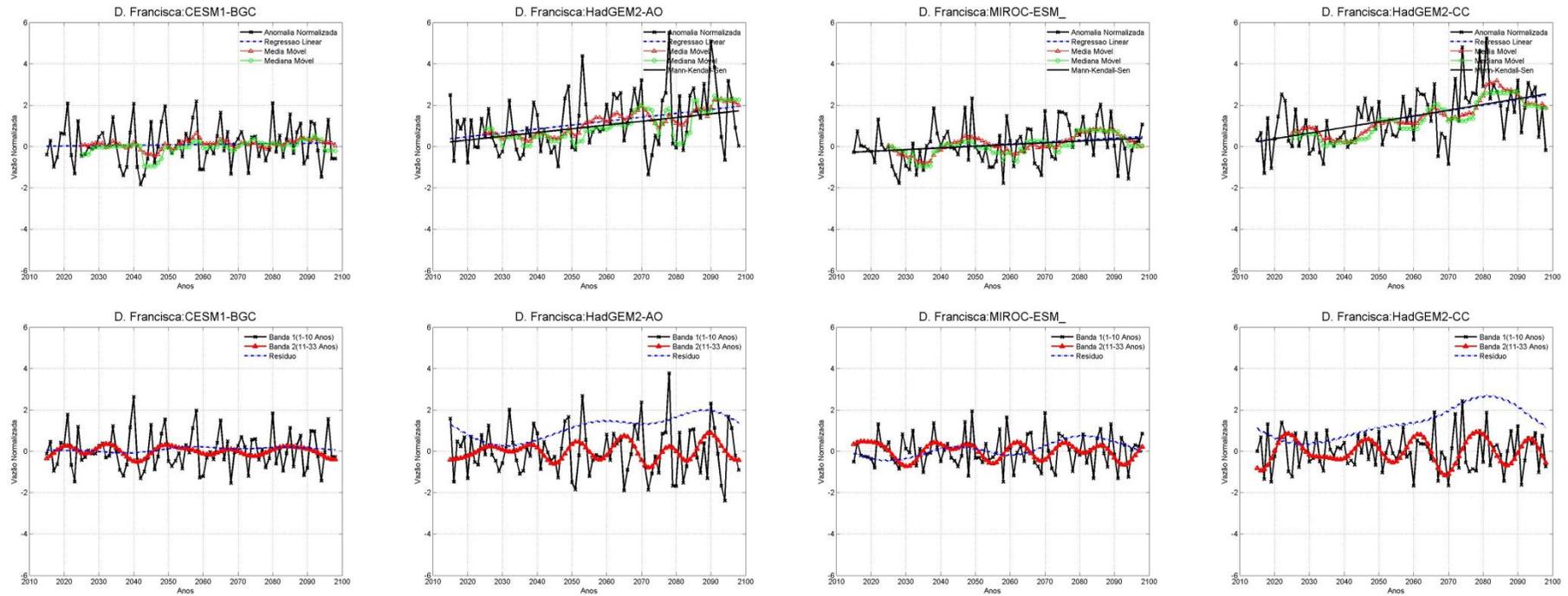
O modelo HadGEM2-CC mostra também um padrão de variação de baixa frequência e tendência positiva segundo o teste de Man-Kendall-Sen. Em ambas as bacias, há uma clara mudança de amplitude na banda de baixa frequência. Indicando o aumento de eventos acima da média histórica, sendo estes mais intensos do que no século XX.O resíduo da transformada em ondeletas capta a tendência em D. Françisca e sugere que as vazões devem atingir valores muita acima da média histórica do século XX, principalmente a partir 2060.

Figura 45 - Tendências das series de vazões para Itaipu dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 46 - Tendências das séries de vazões para D.Francisca dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 47 e na Figura 48 são mostradas as tendências das vazões médias anuais e as bandas geradas a partir da transformada em ondeletas dos modelos CESM1-BGC, HadGEM2-AO, MIROC-ESM e HadGEM2-CC para o cenário RCP8.5 para Sobradinho e Xingó, respectivamente, para o período de 2015 a 2098.

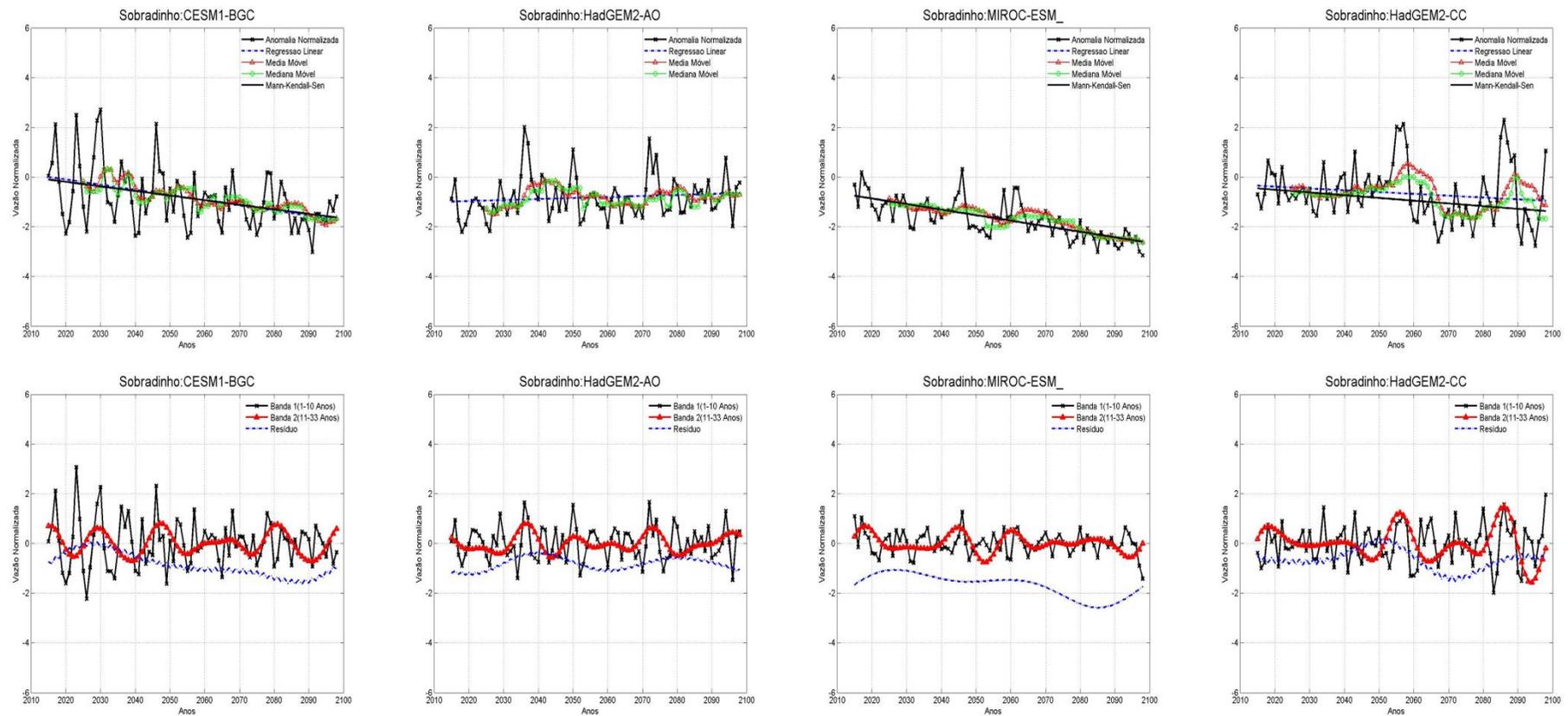
O modelo CESM1-BGC indica a possibilidade de uma série de eventos extremos no setor Nordeste no período de 2015 a 2060, seguido por uma redução da amplitude de variação da série no período de 2060 a 2098. Em ambas as bacias o modelo mostra tendência negativa, sendo está também captada pelo resíduo e mais intensa a partir de 2050.

O modelo HadGEM2-AO mostra em Sobradinho um padrão de variação de baixa frequência, apesar disso a série possui patamares de vazões abaixo da série histórica em praticamente todo o século. Em Xingó o modelo mostra também patamares de vazão abaixo do século XX, com alguns eventos extremos de cheia ao longo do século.

O modelo MIROC-ESM indica tendência negativa em Sobradinho, sugerindo reduções dos patamares de vazões médias anuais já a partir do início da série do século XXI. Enquanto na bacia de Xingó esse modelo mostra leve tendência positiva, porém as vazões médias anuais encontram-se abaixo dos patamares do século XXI, o que justifica os valores negativos de anomalia na Figura 43.

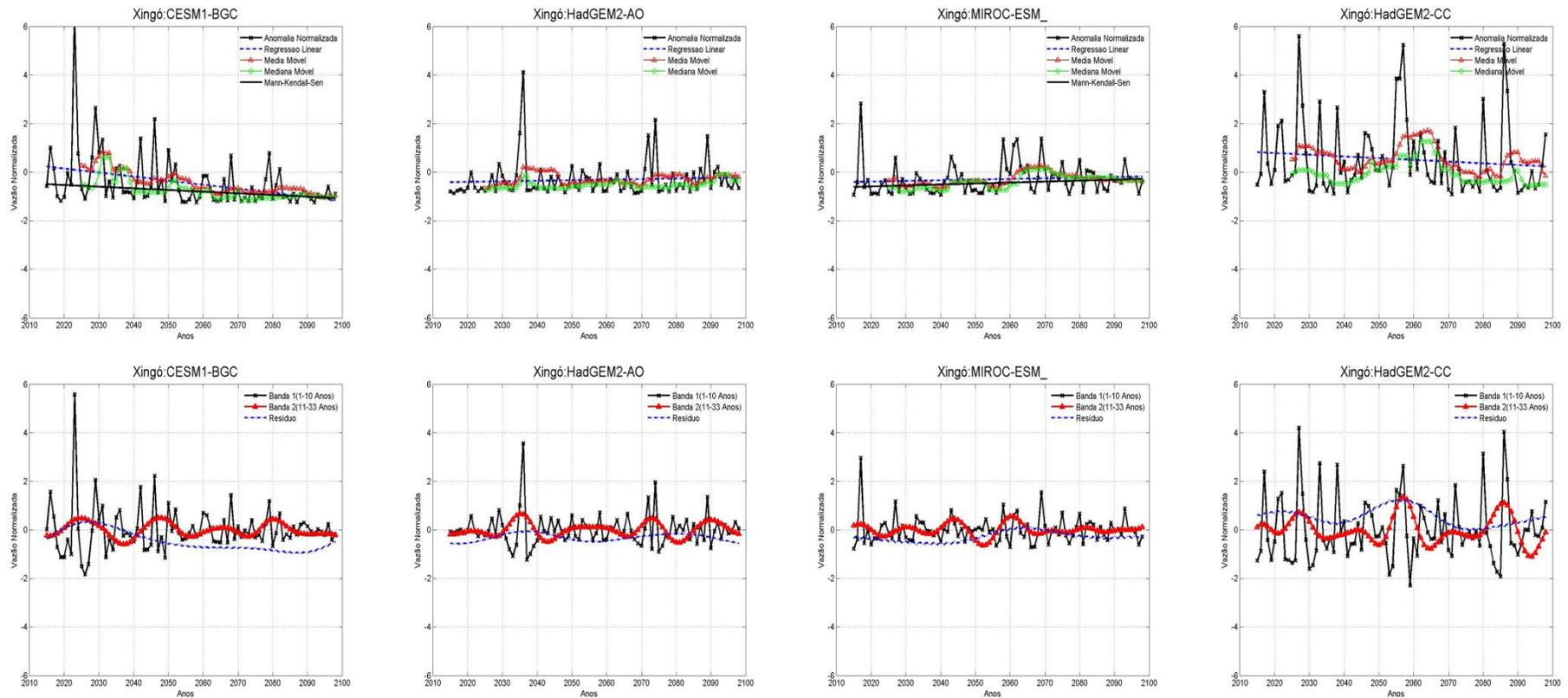
O modelo HadGEM2-CC mostra também um padrão de variação de baixa frequência tendência negativa, segundo a regressão linear. Em ambas as bacias, há uma clara mudança de amplitude na banda de baixa frequência. Indicando o aumento de eventos acima da média histórica, sendo estes mais intensos do que no século XX, principalmente em Xingó.

Figura 47 - Tendências das séries de vazões para Sobradinho dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 48 - Tendências das séries de vazões para Xingó dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 49, na Figura 50 e na Figura 51 são mostradas as tendências das vazões médias anuais e as bandas geradas a partir da transformada em ondeletas dos modelos CESM1-BGC, HadGEM2-AO, MIROC-ESM e HadGEM2-CC para o cenário RCP8.5 para Tucuruí, Belo Monte e Santo Antônio, respectivamente, para o período de 2015 a 2098.

Os modelos apresentados mostram comportamento semelhante nas bacias analisadas para esse setor, com tendência bastante negativa em todas as bacias.

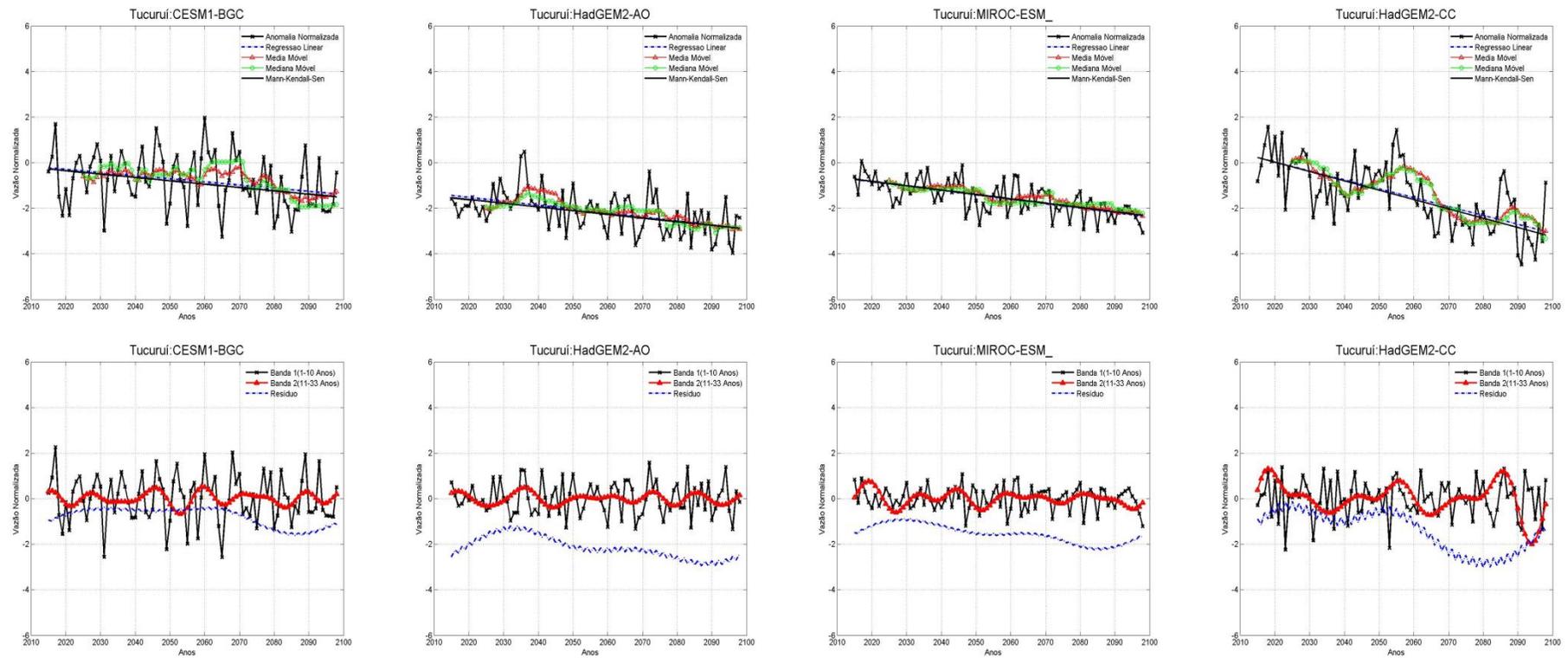
O modelo CESM1-BGC mostra aumento na variabilidade da série, principalmente associado ao aumento da amplitude da baixa frequência, associado a tendência negativa.

O modelo HadGEM2-AO mostra tendência negativa na maioria das bacias deste setor, em Santo Antônio o teste de Man-Kendall-Sen não mostra tendência, porém há um evidente aumento da amplitude da baixa frequência.

O modelo MIROC-ESM indica tendência negativa em Tucuruí, Belo Monte e Santo Antônio, sugerindo reduções dos patamares de vazões médias anuais já a partir do início da série do século XXI.

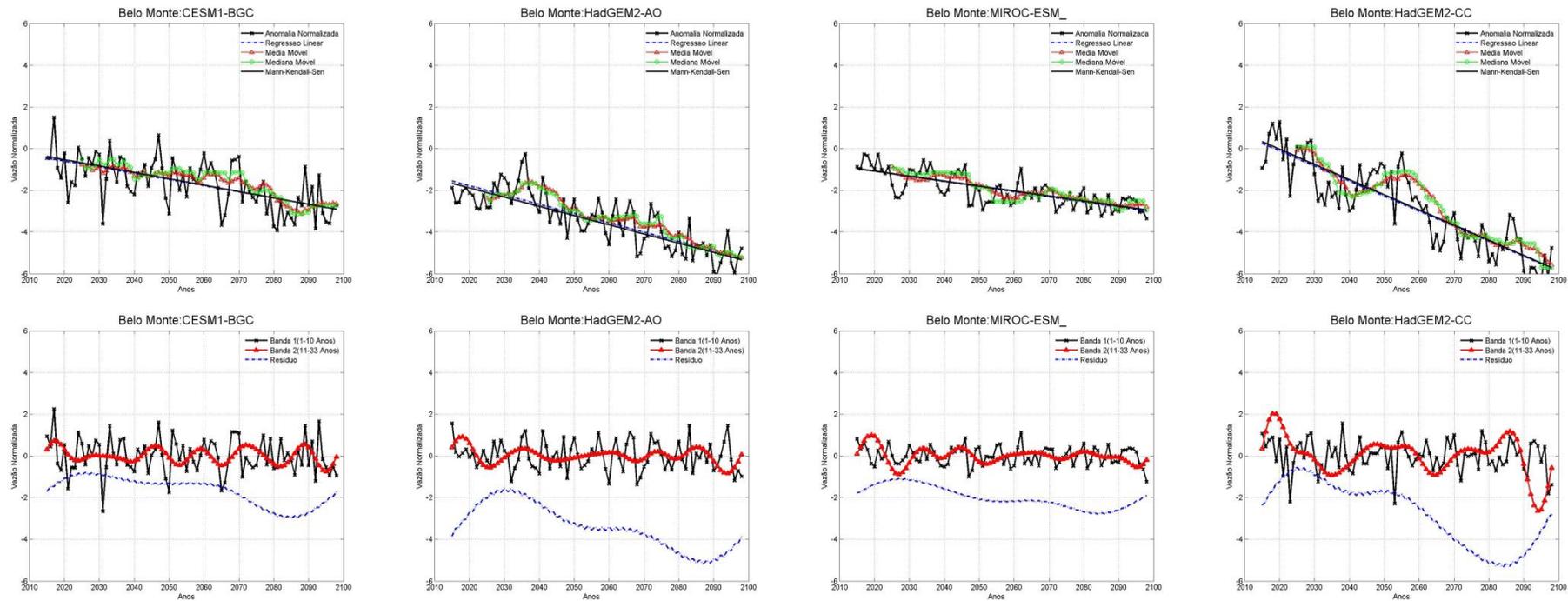
O modelo HadGEM-CC mostra impacto em todas as bandas da transformada em ondeletas, no período de 2080 a 2098 há mudanças significativas na amplitude da banda de 10 a 33 anos em todas as bacias do setor norte. O resíduo indica mudanças significativas nos padrões de variação das vazões médias anuais no período de 2060 a 2098. Essas modificações na amplitude mostram, além da tendência negativa da série, uma maior variabilidade das vazões com grande frequência de ocorrência de eventos extremos.

Figura 49 - Tendências das séries de vazões para Tucuruí dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.



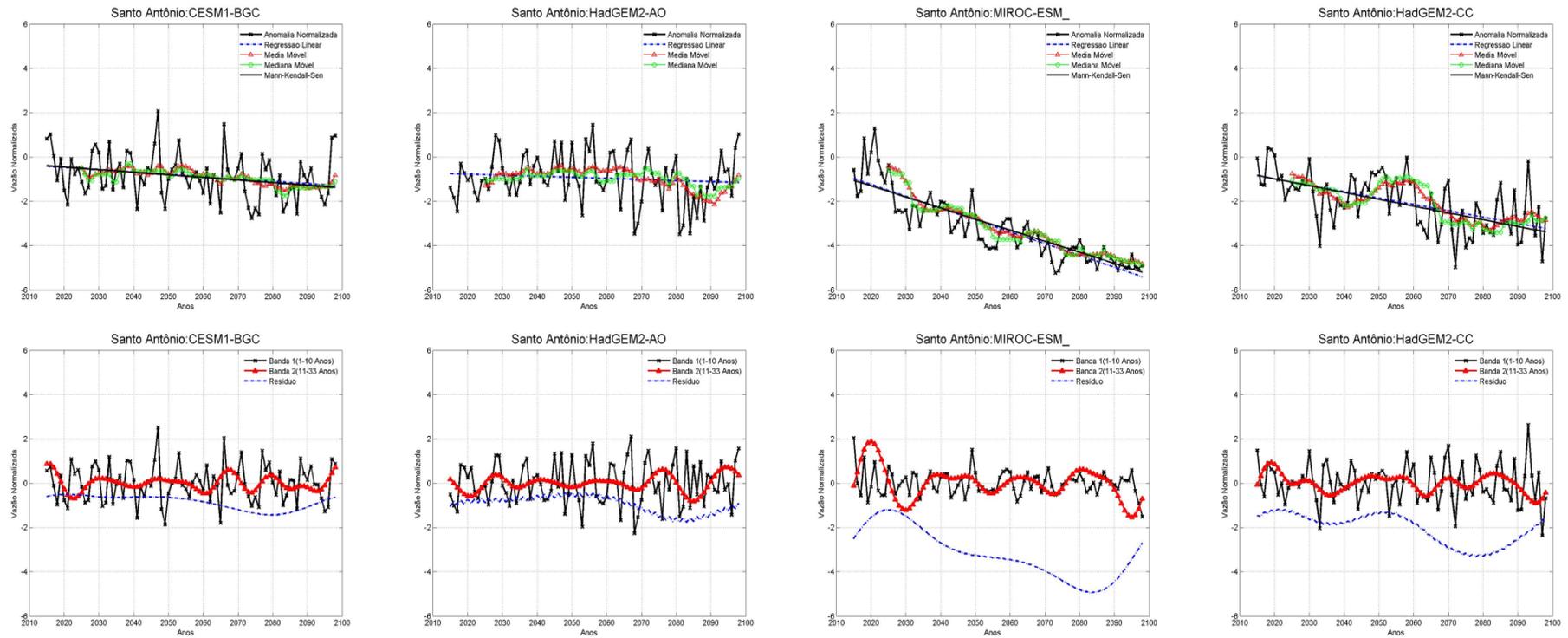
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 50 - Tendências das series de vazões para Belo Monte dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 51 - Tendências das series de vazões para Santo Antônio dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 mais próximos dos centroides, usando regressão linear, média e mediana móveis de 10 anos e transformada em ondeletas.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

8. RESULTADOS E DISCUSSÕES: ESCALA DE LONGO PRAZO – CEARÁ

Esta seção expõe os resultados obtidos para as vazões a partir de dados de entrada dos modelos do CMIP5 para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 e para o sistema Jaguaribe-Metropolitano, destacando três períodos: 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2099.

8.1. Avaliação dos Modelos do CMIP5

Na Tabela 14 são mostrados os índices CORREL, RMSE e AVAL para avaliação sazonal dos modelos do CMIP5 para as Bacias do Orós, Castanhão, Banabuiú, Pacoti-Riachão, para α_c igual a 0,50. A maioria dos modelos apresentou correlações superiores a 0,85 em todas as bacias, associados à RMSE inferiores a 4,00. Isto indica que a maioria dos modelos capta os padrões sazonais de variabilidade no Ceará.

Tabela 14-Modelos do CMIP5, CORREL,, RMSE e AVAL para $\alpha_c = \alpha_r = 0,5$ para as bacia do Orós, Castanhão, Banabuiú e Pacoti-Riachão.

Modelos	Orós			Castanhão		
	CORREL	RMSE	AVAL	CORREL	RMSE	AVAL
BNU-ESM	0,93	3,28	0,80	0,93	3,41	0,72
CESM1-BGC	0,96	2,62	0,96	0,97	2,27	0,95
CSIRO-Mk3-6-0	0,92	6,22	0,40	0,92	5,96	0,40
CanESM2	0,81	6,55	0,09	0,82	6,58	0,10
HadGEM2-AO	0,97	2,88	0,97	0,99	3,01	0,91
IPSL-CM5A-LR	0,93	5,81	0,48	0,90	6,05	0,36
IPSL-CM5A-MR	0,91	6,37	0,37	0,91	6,46	0,32
MIROC-ESM	0,78	5,86	0,09	0,78	5,93	0,08
MIROC5	0,95	3,58	0,81	0,96	3,48	0,80
bcc-csm1-1	0,91	3,62	0,71	0,94	3,27	0,77
GFDL-ESM2M	0,94	3,86	0,75	0,95	3,86	0,73
GISS-E2-R	0,87	3,35	0,63	0,89	3,25	0,64
HadGEM2-CC	0,96	3,28	0,88	0,97	3,37	0,84
HadGEM2-ES	0,96	3,39	0,86	0,97	3,49	0,82
Modelos	Banabuiú			Pacoti-Riachão		
	CORREL	RMSE	AVAL	CORREL	RMSE	AVAL
BNU-ESM	0,95	2,59	0,93	0,98	1,83	0,99
CESM1-BGC	0,94	2,74	0,89	0,92	3,30	0,75
CSIRO-Mk3-6-0	0,89	6,09	0,37	0,90	7,80	0,32
CanESM2	0,83	5,81	0,28	0,89	5,04	0,53
HadGEM2-AO	0,97	2,43	1,00	0,97	2,23	0,94

IPSL-CM5A-LR	0,86	5,61	0,37	0,82	6,31	0,28
IPSL-CM5A-MR	0,85	6,11	0,29	0,92	4,20	0,67
MIROC-ESM	0,73	6,39	0,00	0,77	5,96	0,18
MIROC5	0,93	3,98	0,71	0,97	3,25	0,86
bcc-csm1-1	0,94	2,85	0,87	0,94	2,97	0,81
GFDL-ESM2M	0,92	3,58	0,74	0,92	3,42	0,73
GISS-E2-R	0,78	5,11	0,26	0,76	5,68	0,18
HadGEM2-CC	0,97	2,69	0,95	0,98	2,15	0,97
HadGEM2-ES	0,95	3,01	0,88	0,97	2,24	0,95

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Os modelos CanESM2 e MIROC-ESM apresentaram correlações ligeiramente inferiores aos demais, com um RMSE superior a 5 em todas as bacias, estes fatores contribuíram para que esses modelos obtivessem AVAL inferiores a 0,30 na maiorias dos casos. Indicando que os mesmo não representam adequadamente a sazonalidade no Ceará.

Os modelos CSIRO_MK3_6 e IPSL-CM5A-LR, apesar de apresentarem correlações superiores a 0,85 em todas as bacias apresentam RMSE superior a 5,60, por isso apresentaram AVAL inferior à maioria dos modelos avaliados nas quatro regiões. Da mesma forma, o IPSL-CM5A-MR possui comportamento semelhante a esses dois modelos, quanto aos índices de avaliação sazonal, diferenciando-se apenas na bacia de Pacoti-Riachão onde o mesmo possui uma melhor correlação e RMSE, e por isso um AVAL de aproximadamente 0,67 nesta bacia.

Para as bacias do Orós e Castanhão os modelos CESM1-BGC e HadGEM2-AO apresentaram o maiores AVALs, segundo a avaliação proposta neste trabalho para α_c igual a 0,5. Enquanto para a bacia do Pacoti-Riachão os modelos BNU-ESM, HadGEM2-AO, HAdGEM2-CC e HadGEM2-ES apresentaram AVALs superiores a 0,94.

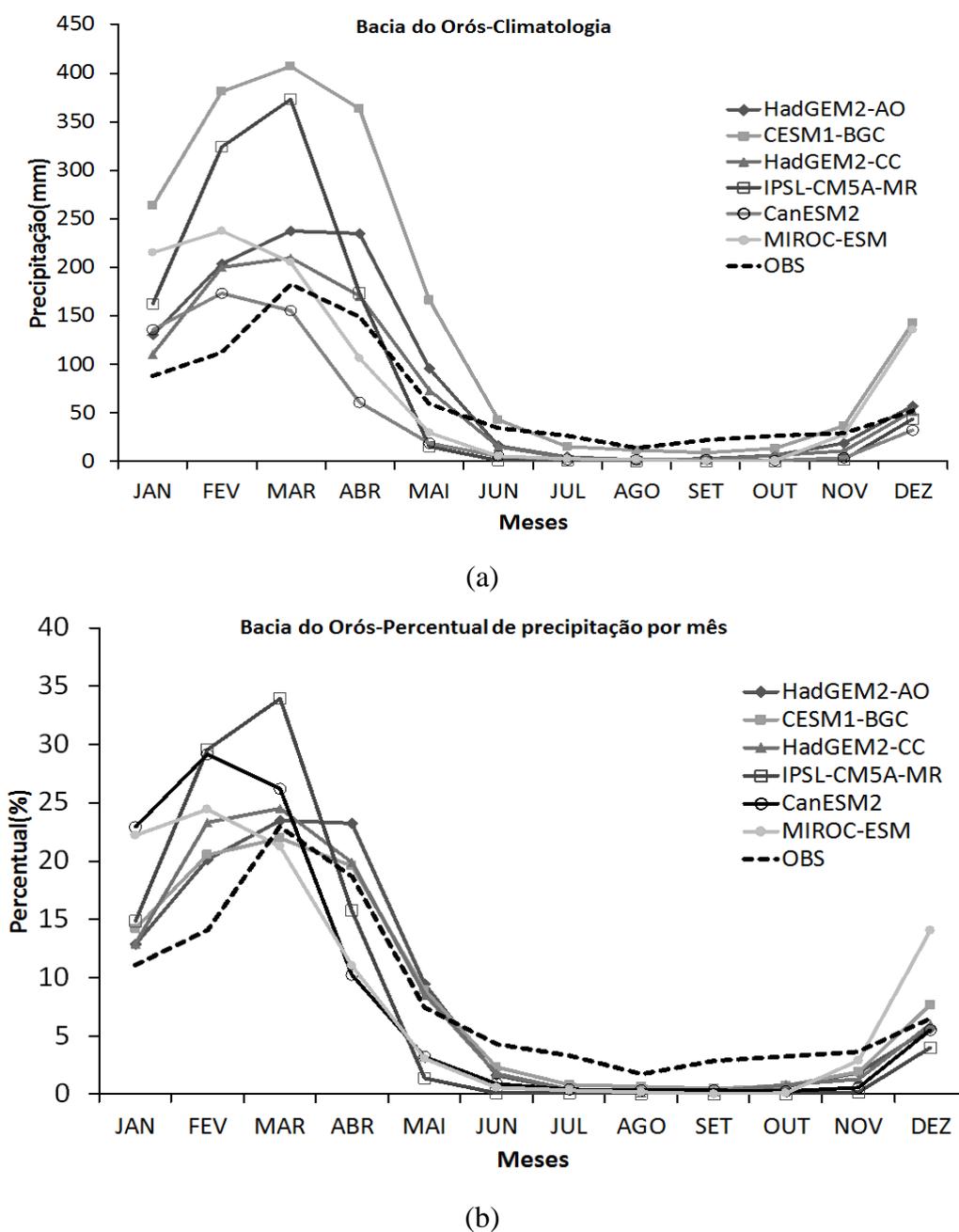
Já na bacia de Banabuiú destaca-se o modelo HadGEM2-AO que apresentou a melhor representação da climatologia e o modelo MIROC-ESM que apresntou AVALs igual a zero.

A Figura 52 mostra as climatologias dos três melhores (HadGEM2-AO, CESM1-BGC e HadGEM2-CC) modelos do CMIP5 e dos três piores (IPSL-CM5A-MR, CanESM2 e MIROC-ESM), segundo a avaliação sazonal, em comparação ao observado sobre a Bacia do Orós.

Os modelos MIROC-ESM e CanESM2 apresentam dificuldade de representar a climatologia observada, superestimando a precipitação em dezembro, janeiro e fevereiro

e subestimando em abril, maio e junho. Em termos percentuais, o modelo CanESM2 possui dificuldade de representar a sazonalidade, atribuindo o maior valor percentual de chuva para o mês de fevereiro. Já o modelo MIROC-ESM não representa satisfatoriamente a pré-estação, apresentando valores percentuais de precipitação nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro que superam em até 10% os valores observados.

Figura 52-Climatologia dos Modelos do CMIP5 para século XX (1950-1999) para a Bacia do Orós: (a) Quantidade de precipitação por mês; (b) Percentual de chuva por mês.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

8.2. Anomalia das médias anuais de vazões

Esta seção apresenta anomalia percentual de vazões obtidas a partir do modelo SMAP com dados de entrada dos modelos globais do CMIP5 para os cenários RCP4.5 e RCP8.5. Estes resultados são divididos em três períodos do século XXI: 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098.

8.2.1. Cenário RCP4.5

Na Figura 53 apresenta-se a variação percentual na média anual de vazões no século XXI em três períodos (2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para 10 modelos do CMIP5 para o cenário RCP 4.5 em relação ao século XX (1950-1999) para as bacias de Banabuiu, Castanhão, Óros e Pacoti-Riachão. Os modelos IPSL-CM5A-LR e o IPSL-CM5A-MR projetam aumento da média anual de vazões em todas as bacias, chegando a atingir valores superiores a 100% de variação percentual em relação ao século XX.

Para a bacia de Banabuiu, nota-se que a maioria dos modelos projeta redução da média anual de vazões nos três períodos em estudo. Para o período de 2010 a 2039, o modelo que mostrou maior redução foi o BNU-ESM, com valor percentual próximo a 60%, e o que apresentou menor redução foi CESM1-BGC, com percentagem de 10%. Para o período de 2040-2069, o modelo que apresentou maior redução percentual foi CSIRO-Mk3-6.0 e o de menor variação da média anual foi, novamente, o CESM1-BGC.

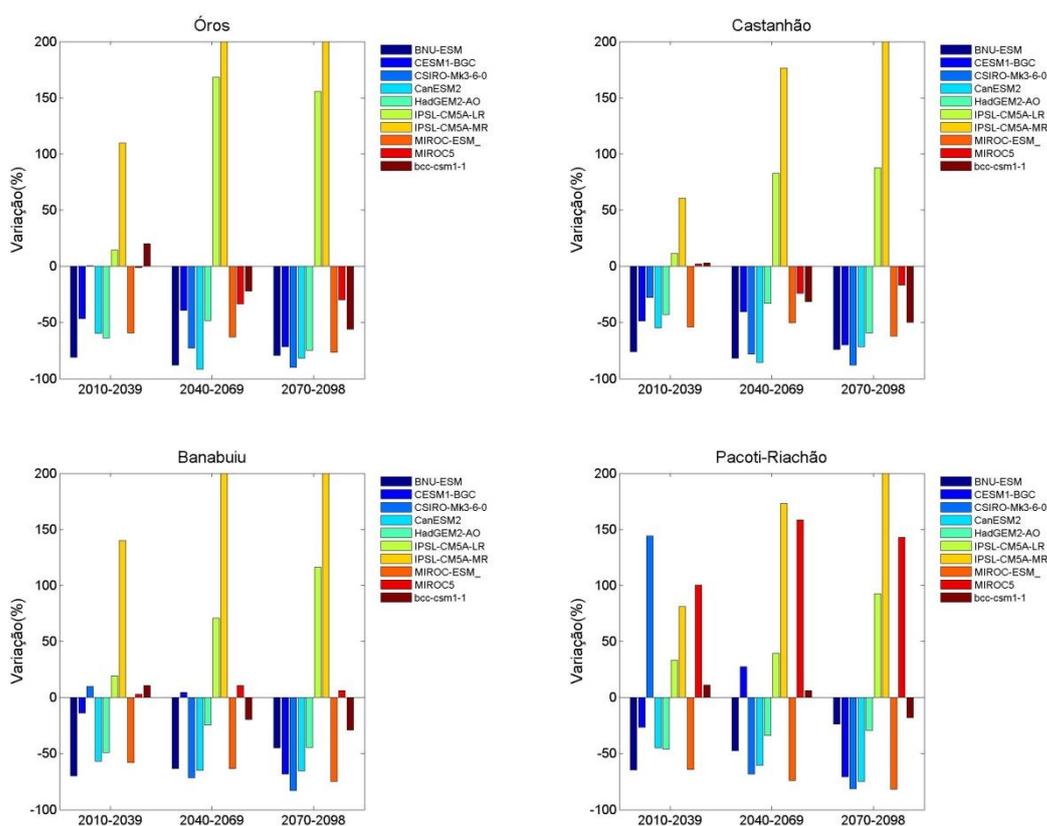
Para a bacia do Castanhão, com exceção dos modelos IPSL-CM5A-LR e o IPSL-CM5A-MR, os demais mostram que as vazões devem reduzir em todos os períodos em estudo, sendo que essa diminuição maior que 20% e menor que 90%.

Enquanto para a bacia do Orós, da mesma forma, a maioria dos modelos apontam reduções nas vazões, exceto os modelos IPSL-CM5A-LR e o IPSL-CM5A-MR que projetam aumento percentual da vazão média anual nos três períodos analisados.

A bacia do Pacoti-Riachão é a que apresenta um maior número de modelos indicando aumento da vazão média anual, em comparação com as demais bacias em estudo, isto caracteriza a grande variação espacial provocada pelos impactos das mudanças climáticas. Em relação aos modelos que apresentaram aumento da vazão

média, identificou-se que o CSIRO-Mk3-6.0 tem valor percentual superior a 150% no período de 2010-2039, o IPSL-CM5A-MR tem valores superiores a 150% tanto no período de 2040-2069 como no período de 2070-2098, e o MIROC5 varia de valores percentuais próximo 100% até próximo a 150%.

Figura 53-Variação percentual na média anual de vazões no século XXI para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5 para: (a) Óros, (b) Castanhão, (c) Banabuiu e (d) Pacoti-Riachão.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

8.2.2. Cenário RCP8.5

Na Figura 54 apresenta-se a variação percentual na média anual de vazões no século XXI para 14 modelos do CMIP5 para o cenário RCP 8.5 em relação ao século XX (1950-1999) para as bacias de Banabuiu, Castanhão, Óros e Pacoti-Riachão. Assim como no cenário RCP4.5, os modelos IPSL-CM5A-LR e o IPSL-CM5A-MR projetam aumento da média anual de vazões em todas as bacias.

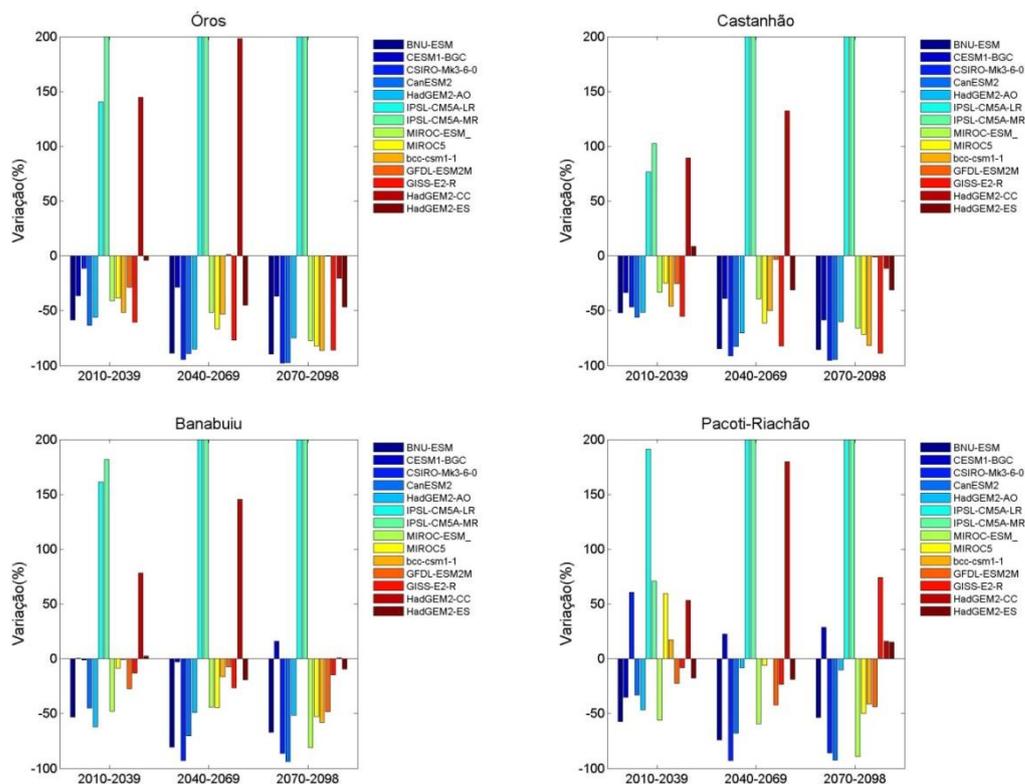
A Figura 54 mostra que os modelos divergem quanto as projeções das vazões médias anuais para a bacia de Banabuiu. Para o período de 2010-2039, os modelos que sugerem redução das vazões médias indicam margens de aproximadamente 5% até 65%, já entre 2040 e 2069 varia a margem é de aproximadamente 5% até 75% e no período de 2070 a 2098 varia entre de 5% até 90%. Os modelos IPSL-CM5A-LR, o IPSL-CM5A-MR e o HadGEM2-CC indicam variação positiva nos três períodos.

Para bacia do Castanhão, verifica-se que a maioria dos modelos apresenta reduções nas vazões no primeiro período. Os modelos que apresentaram as maiores reduções ao longo de quase todo o século XXI foram os modelos CSIRO-Mk3-6.0 e o BNU-ESM, indicando valores superiores a 50% no período de 2040-2069, e valores próximos a 100% para o período de 2070-2098. Os modelos IPSL-CM5A-LR e IPSL-CM5A-MR foram os que apresentaram, novamente, uma maior variação percentual de aumento da vazão, com valores superiores a 100% nos dois últimos períodos. O modelos HadGEM2-CC apresenta aumentos nas vazões nos dois primeiros períodos seguido por uma inversão de sinal no último período, sugerindo redução das vazões médias anuais de aproximadamente 10%.

Para a bacia do Orós, o comportamento dos modelos é semelhante ao mostrado para a bacia do Castanhão.

Para a bacia de Pacoti-Riachão, o período de 2010-2039 mostrou 6 modelos com projeção de aumento da vazão média anual, sendo este superior a 50% em alguns casos. Para o período de 2040 a 2098, notou-se que os modelos CSIRO-Mk3-6.0, MIROC5 e bcc-csm1-1, sofreram uma inversão do sinal da anomalia, indicando uma possível tendência negativa.

Figura 54-Variação percentual na média anual de vazões no século XXI para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 para: (a) Óros, (b) Castanhão, (c) Banabuiu e (d) Pacoti-Riachão.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

8.3. Análise de tendência

Na Tabela 15 são mostradas as declividades da tendência dos modelos para os cenários RCP8.5 e RCP4.5 do CMIP5 para o teste de Man Kendall-Sen das vazões anuais padronizadas. Na maioria dos casos, a tendência é mais pronunciada para o cenário RCP8.5, indicando que esse cenário pode levar a eventos extremos mais intensos do que o RCP4.5 para as bacias do Ceará.

A maioria dos modelos indica tendência negativa para as bacias do Castanhão e Óros, principalmente para o cenário RCP8.5. Porém, os modelos IPSL-CM5A-LR e IPSL-CM5A-MR apresentam tendência positiva maiores em módulo do que todos os demais.

Tabela 15- Tendência identificada para as vazões anuais padronizadas (desvios padrões por ano) dos modelos do CMIP5 para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 o sistema Jaguaribe-Metropolitano do Ceará.

	Modelos	Óros	Castanhão	Banabuiú	Pacoti-Richão
RCP8.5	BNU-ESM	-0,002	-0,003	-0,002	-0,001
	CESM1-BGC	-	-0,003	-	-
	CSIRO-Mk3-6-0	-0,002	-0,002	-0,001	-0,001
	CanESM2	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001
	HadGEM2-AO	-	-	-	0,004
	IPSL-CM5A-LR	0,050	0,046	0,037	0,052
	IPSL-CM5A-MR	0,190	0,095	0,064	0,029
	MIROC-ESM_	-	-	-	-0,001
	MIROC5	-0,003	-0,003	-	-0,007
	bcc-csm1-1	-0,004	-0,006	-0,008	-0,008
	GFDL-ESM2M	-	-	-	-
	GISS-E2-R	-0,002	-0,002	-	-
	HadGEM2-CC	-0,009	-0,010	-	-
	HadGEM2-ES	-0,003	-0,005	-	-
	RCP4.5	BNU-ESM	-	-	-
CESM1-BGC		-0,002	-0,003	-0,002	-
CSIRO-Mk3-6-0		-0,005	-0,004	-0,002	-0,001
CanESM2		-	-0,001	-	-
HadGEM2-AO		-	-0,002	-	-
IPSL-CM5A-LR		0,008	0,008	-	-
IPSL-CM5A-MR		0,069	0,037	0,029	0,017
MIROC-ESM_		-	-	-	-
MIROC5		-	-	-	-
bcc-csm1-1		-0,007	-0,009	-0,007	-
GFDL-ESM2M		*	*	*	*
GISS-E2-R		*	*	*	*
HadGEM2-CC		*	*	*	*
HadGEM2-ES		*	*	*	*

- Ausência de tendência segundo o teste de Man-Kendall Sen.

* Simulação não avaliada para o cenário em questão.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

8.3.1. Análise de tendência do cenário RCP4.5

Na Figura 55 são mostradas as tendências das vazões médias anuais e as bandas geradas a partir da transformada em ondeletas dos modelos BNU-ESM, IPSL-CM5A-LR e bcc-csm1-1 para o cenário RCP4.5 para a bacia do Óros para o período de 2015 a 2098.

O modelo IPSL-CM5A-LR o modelo mostra tendência positiva para a bacia do Óros. O comportamento desse modelo a partir de 2060 indica um grande aumento na

ocorrência de eventos extremos, principalmente de vazões muito acima da média histórica. Essa mudança de amplitude dos eventos é captada pela banda de baixa frequência (1-10 anos).

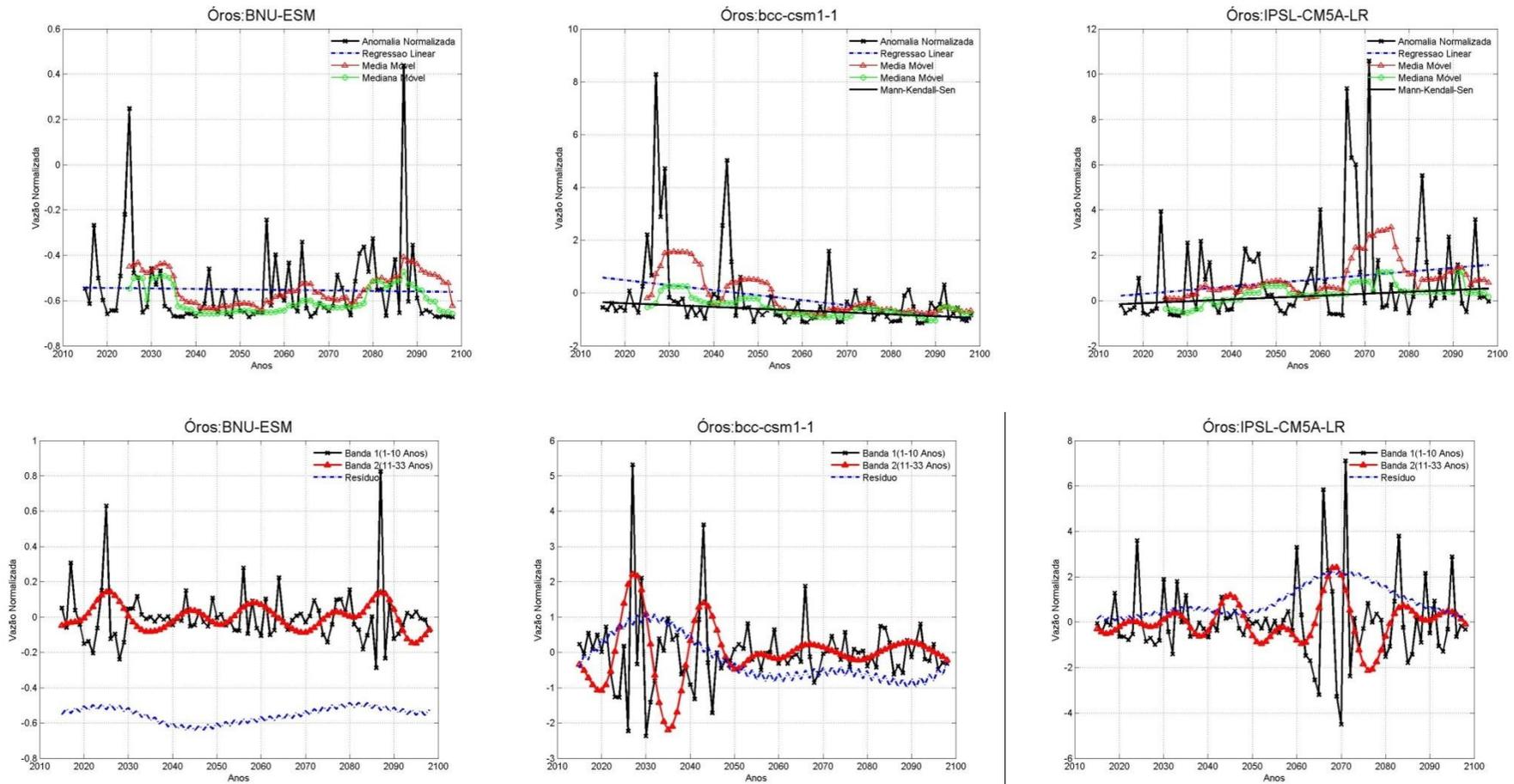
Já o modelo bcc-csm1-1 mostra alguns anos de extremos de cheia na primeira metade do século seguido por uma possível estabilização na segunda metade com sensível tendência negativa. Este fato é reforçado pela amplitude da banda de baixa frequência e alta frequência, que apresentam valores positivos extremamente elevados no período de 2015 a 2050.

Os valores negativos de anomalia nas vazões médias anuais do modelo BNU-ESM mostrados na Figura 51 são explicadas pelo comportamento do resíduo que apresenta valores negativos em todo o século XXI.

Na Figura 56 são mostradas as tendências das vazões médias anuais e as bandas geradas a partir da transformada em ondeletas dos modelos BNU-ESM, IPSL-CM5A-LR e bcc-csm1-1 para o cenário RCP4.5 para a bacia de Pacoti-Riachão para o período de 2015 a 2098. Os modelos possuem em comum um aumento da variabilidade das vazões anuais e a ausência de tendência segundo o teste de Man-Kendall Sen.

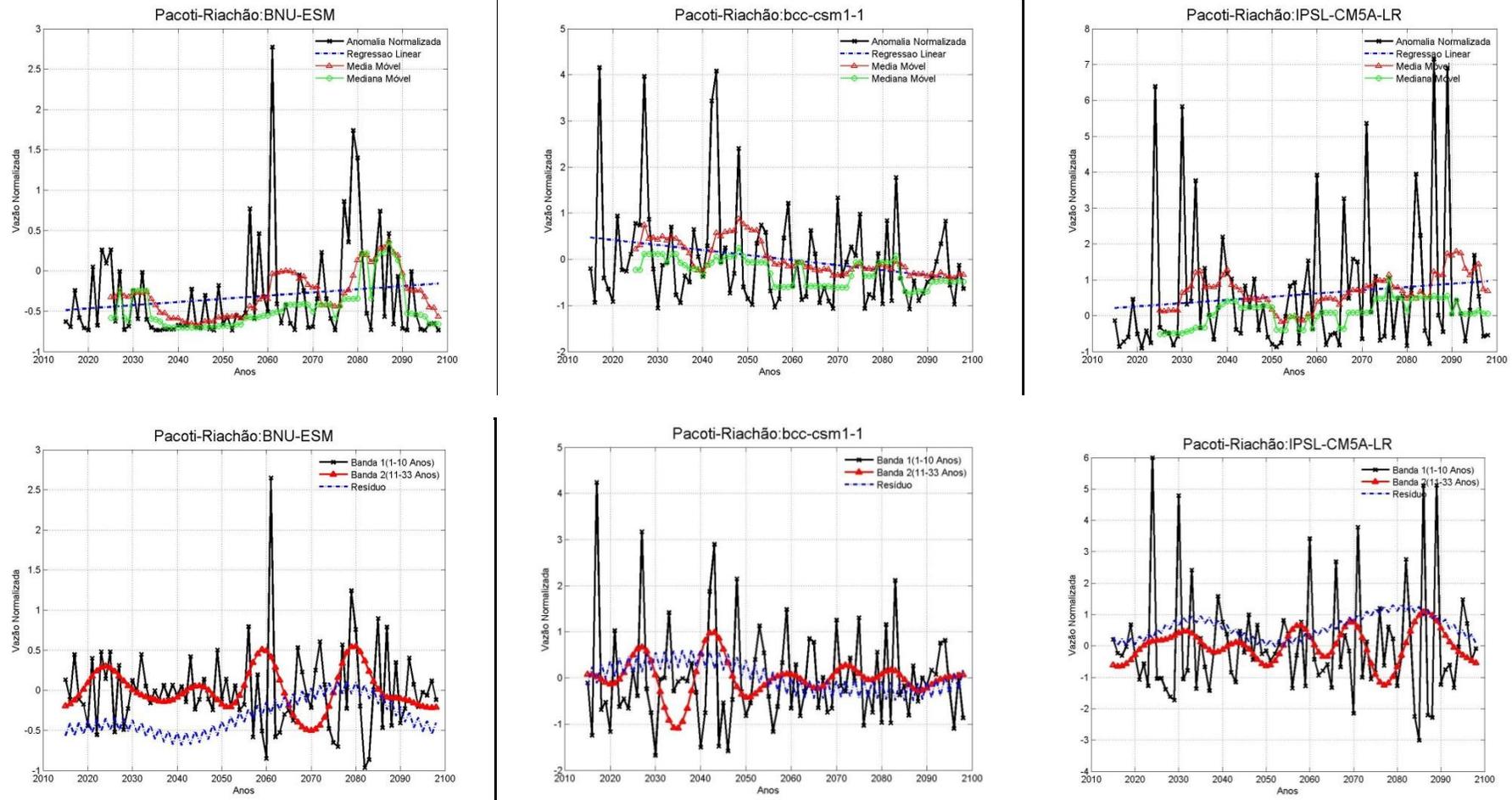
A banda de 1 a 10 anos apresenta um aumento de amplitude, para todos os modelos, principalmente para os últimos trinta anos do período avaliado. Isso pode indicar um aumento na ocorrência de eventos extremos de vazões.

Figura 55-Tendências das séries de vazões para a bacia do Óros dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5: BNU-ESM,bcc-csm1-1 e IPSL-CM5A-LR.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 56-Tendências das séries de vazões para a bacia do Pacoti-Riachão dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5: BNU-ESM,bcc-csm1-1 e IPSL-CM5A-LR



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

8.3.2. Análise de tendência do cenário RCP8.5

Na Figura 57 são mostradas as tendências das vazões médias anuais e as bandas geradas a partir da transformada em ondeletas dos modelos BNU-ESM, IPSL-CM5A-LR, HadGEM2-CC e bcc-csm1-1 para o cenário RCP8.5 para a bacia do Orós para o período de 2015 a 2098.

O modelo BNU-ESM mostra tendência negativa, está explicada principalmente pelo comportamento do resíduo que mostra valores negativos em todo o século XXI.

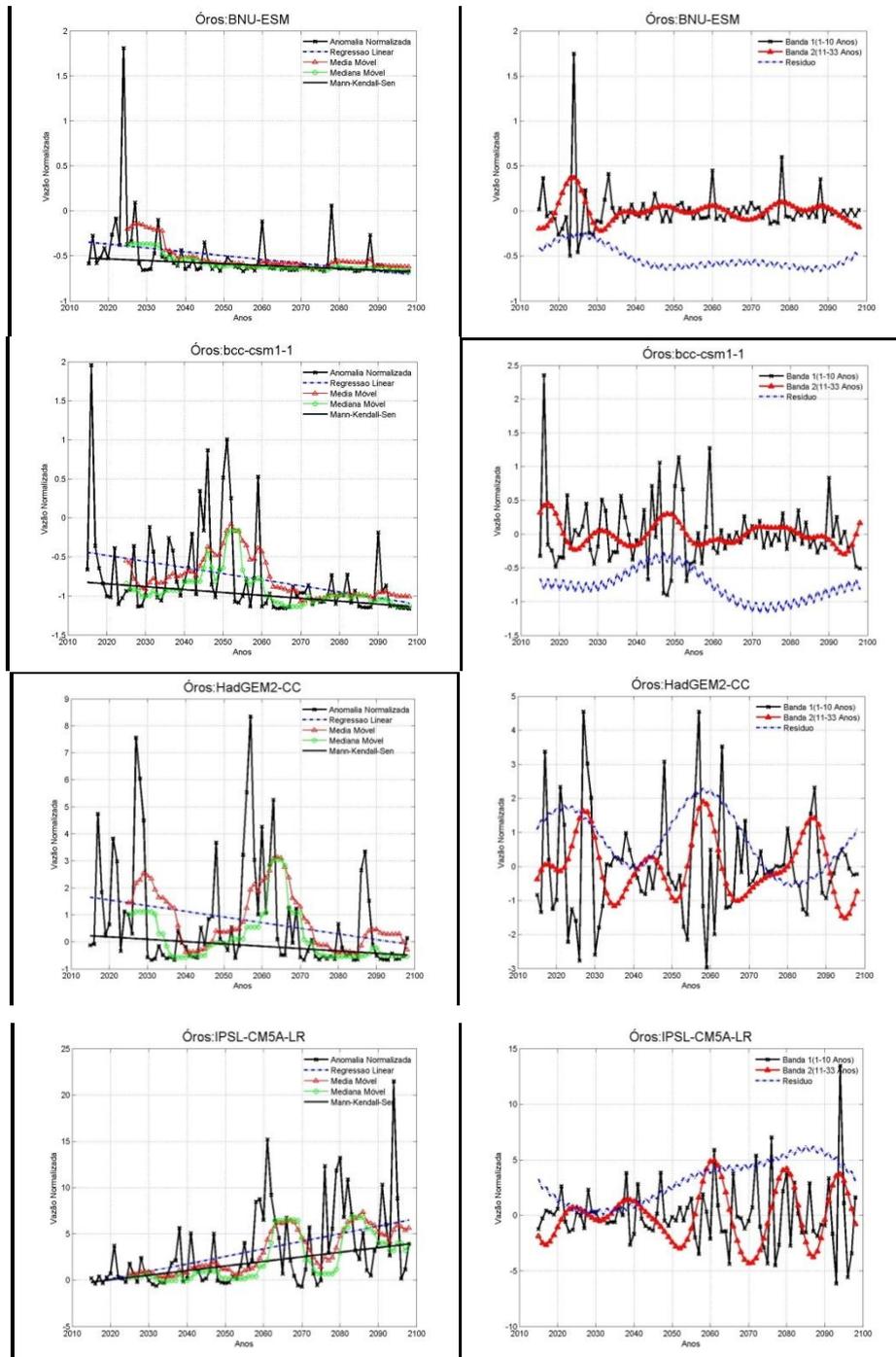
Já o modelo bcc-csm1-1 mostra alguns anos de extremos de cheia na primeira metade do século seguido por uma possível estabilização na segunda metade com sensível tendência negativa. Este fato é reforçado pela amplitude da banda de baixa frequência e alta frequência, que apresentam valores positivos extremamente elevados no período de 2015 a 2050.

O modelo IPSL-CM5A-LR, assim como no cenário RCP4.5, mostra tendência positiva para a bacia do Orós. O comportamento desse modelo a partir de 2050 indica um grande aumento na ocorrência de eventos extremos de cheias. Essa mudança de amplitude dos eventos é captada pela banda de baixa frequência (1-10 anos), média frequência e resíduo.

O modelo HadGEM2-CC mostra alternância entre períodos muito úmidos e secos captados pela média e mediana móveis de 10 anos e pelas bandas de variação de ondeletas. Indicando fases úmidas de 2015 a 2030 e 2045 a 2055, enquanto apresenta fases normais ou secas entre e depois desses períodos. Destaca-se a amplitude dos eventos de precipitação acima da média, que apresentam valores superiores a 3 desvios padrões em relação a série modelada do século XX, sugerindo eventos de cheias bem mais frequentes e intensos.

Na Figura 57 são mostradas as tendências das vazões médias anuais e as bandas geradas a partir da transformada em ondeletas dos modelos BNU-ESM, IPSL-CM5A-LR, HadGEM2-CC e bcc-csm1-1 para o cenário RCP8.5 para a bacia do Pacoti-Riachão para o período de 2015 a 2098. Os modelos apresentam em comum um aumento na amplitude da alta frequência, o que sugere eventos extremos mais intensos.

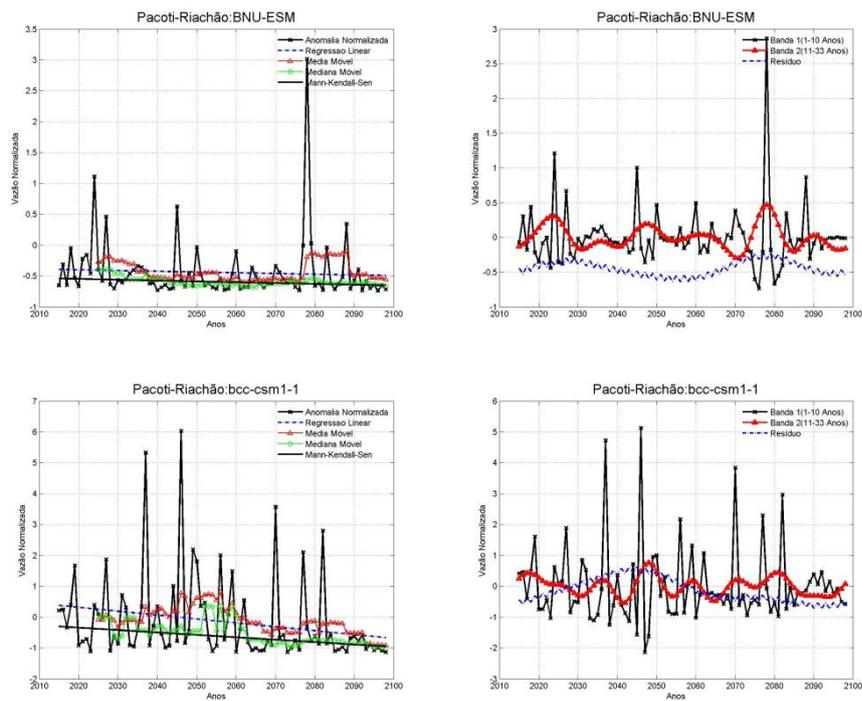
Figura 57-Tendências das séries de vazões para a bacia do Orós dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5: BNU-ESM, bcc-csm1-1, HadGEM2-CC e IPSL-CM5A-LR.

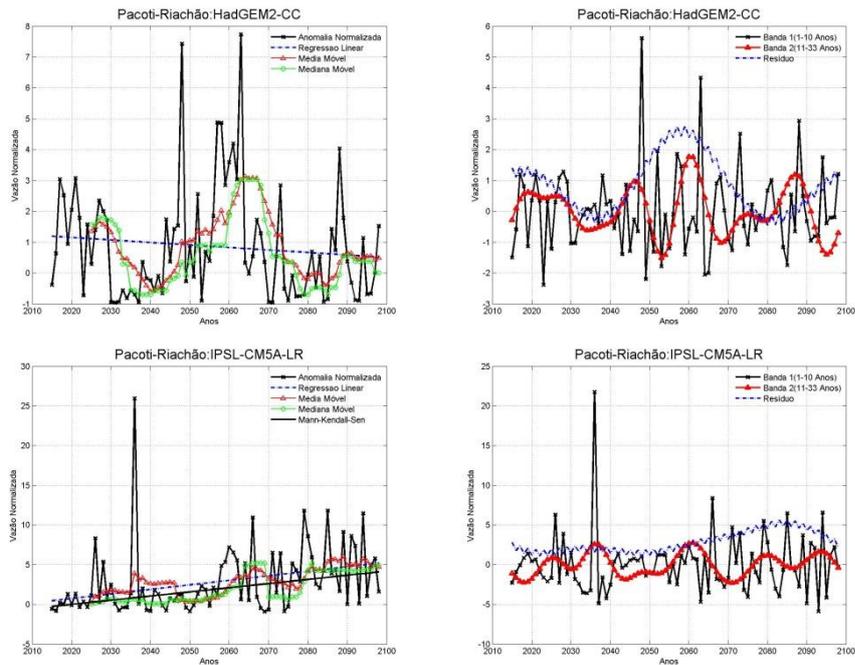


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

O modelo BNU-ESM mostra tendência negativa, assim como no cenário RCP4.5 e para as demais bacias, está explicada principalmente pelo comportamento do resíduo que mostra valores negativos em todo o século XXI.

Figura 58-Tendências das séries de vazões para a bacia do Pacoti-Riachão dos modelos do CMIP5 para o cenário RCP4.5: BNU-ESM, bcc-csm1-1, HadGEM2-CC e IPSL-CM5A-LR.





Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Já o modelo HadGEM2-CC apresenta mais padrões de variabilidade do que propriamente tendência, porém os eventos mais úmidos são mais intensos no século XXI.

O modelo bcc-csm1-1 apresenta tendência com vários eventos de seca no período de 2080 a 2098, porém no demais períodos indica uma grande alternância de anos secos e úmidos com amplitude de até 6 desvios padrões para os eventos acima da média.

Enquanto isso, o modelo IPSL-CM5A-LR apresenta tendência positiva, assim como nas demais bacias, com vários anos no período de 2080 a 2098 com vazões de aproximadamente 10 desvios padrões. Comportamento que concorda com a acentuação da amplitude do resíduo no final do século XXI.

9. METODOLOGIA- ESCALA DE MÉDIO PRAZO:

Neste trabalho foram utilizados métodos baseados em regressão linear (modelo auto regressivo), modelo baseado na transformada de Fourier, modelo baseado na transformada em ondeletas. Todas as metodologias são descritas nas seções seguintes.

9.1. Dados Utilizados

Para avaliar a destreza dos modelos e efetuar as devidas calibrações foram utilizadas a base de dados de precipitação pluviométrica observada da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) e Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) para o período de 1912 a 2012. Enquanto as vazões nas bacias de interesse foram obtidas a partir da Agência Nacional de águas (ANA) e os dados de vazões naturalizadas disponibilizados pelo ONS. Devido às falhas nas séries históricas de vazões, as mesmas são completadas por meio do modelo chuva-vazão SMAP.

9.2. Modelos auto regressivos

Considerando que as curvas de maior frequência de variáveis hidrológicas são distribuídas de maneira assimétrica, ou estão vinculadas a zero, é frequentemente necessário padronizar essas variáveis a fim de realizar a análise estatística de interesse. A padronização de todas as séries anuais é a primeira etapa de cálculo da maioria das análises estatísticas series hidrológicas, conforme a equação 30:

$$z_i = \frac{x - \bar{x}}{\sigma_x} \quad (30)$$

onde x é o dado a ser padronizado, \bar{x} é a média da série e σ_x é o desvio padrão da série. Após padronizada, é realizada a regressão linear dos dados, considerando os anos anteriores como preditores. A regressão linear é da por:

$$z_i^p = \varepsilon_1 + \sum_{j=i-n}^{i-1} z_j \cdot \beta_n \quad (31)$$

onde z_j são os anos considerados preditores, β_n são os coeficientes calculados de cada preditor, ε_1 é o viés/ruído/resíduo e n é número de termos usado no modelo auto-regressivo. Sendo z_i^p um conjunto de valores previstos pelo modelo para um período de p anos.

Em seguida é utilizado o método *stepwise*. A regressão linear *stepwise* (passo a passo) é utilizada quando se possui uma grande variedade de variáveis (preditores) de entrada na regressão. A regressão *stepwise* introduz os preditores passo a passo no modelo, começando com a variável independente mais correlacionada com a variável prevista.

Depois do primeiro passo, o algoritmo seleciona do grupo de variáveis remanescentes (preditora secundária) aquela que dá a maior redução na variância residual (não explicada) da variável dependente, isto é, a variável cuja correlação parcial com a variável prevista é maior. Essa função, então, executa um teste-F parcial na entrada para checar se a variável preditora secundária provocará uma significativa variação na variável prevista em comparação a variável prevista com a remoção da preditora secundária.

O usuário pode especificar um valor de F mínimo para a inclusão de qualquer variável. A função avalia se o valor de F obtido em um dado passo satisfaz o mínimo e, se satisfizer, a variável participará da regressão. Similarmente, o programa decide a cada passo se qualquer variável previamente incluída ainda satisfaz um mínimo estabelecido e, caso contrário, remove-se tal variável. Em qualquer passo do *stepwise* os resultados são calculados da mesma maneira de uma regressão padrão usando-se um conjunto particular de variáveis. Portanto o passo final da *stepwise* mostra os mesmos coeficientes que uma regressão linear padrão, utilizando os mesmos coeficientes que sobreviveram a todos os passos.

O período usado para a calibração dos parâmetros foi de 1912 a 2002 no Ceará e 1931 a 1998 para os dados do SIN, todo ele com lag1 (um ano). Logo, a geração de ε_1 é dada através da geração de m valores distribuídos aleatoriamente numa função normal multivariada de média, desvio padrão e covariância da diferença entre a variável prevista e observada com lag1 ao longo de 1912 a 2002. Sendo assim z_i^1 possui m cenários possíveis.

A geração da previsão com lag2 admite que todos os cenários gerados para z_i^1 são futuros plausíveis, sendo os anos anteriores preditores do ano previsto têm-se:

$$z_i^2(c) = \varepsilon_2 + z_i^1(c) \cdot \beta_1 + \sum_{j=i-n}^{i-2} z_j \cdot \beta_n \quad (32)$$

Sendo ε_2 apenas um valor aleatório selecionado da distribuição ε_1 .

A Figura 59 mostra três dos modelos auto-regressivos utilizados: AR com *stepwise* (ARs), AR com *stepwise* da média móvel de 5 anos (ARsMedia) e AR com *stepwise* da Mediana móvel de 5 anos (ARsMediana). Estes três modelos diferenciam-se apenas na definição de z_j .

No modelo ARs, z_j é a variável anual normalizada e, portanto z_i^p representa o valor previsto da média anual da variável. Enquanto para o ARsMedia z_j representa a média móvel anual de 5 anos normalizada e z_i^p representa a média móvel prevista normalizada. O mesmo caso do ARsMedia se aplica ao ARsMediana, porém para mediana móvel de 5 anos.

9.3. O modelo baseado na série de *Fourier*

Nesta seção é apresentada a transformada de Fourier e a formulação dos modelos baseados neste tipo série.

9.3.1. Transforma discreta de Fourier

A análise de Fourier ou análise harmônica é uma das formas mais tradicionais para tratamento de sinais e séries temporais. Esta técnica foi criada por Jean Baptiste Joseph Fourier e publicada em 1822 no seu trabalho intitulado *Thèorie Analytique de la Chaleur*. Essencialmente, ela permite que se observem informações de frequência invés de tempo.

Na análise de séries temporais, resultado da observação de processos estocásticos, normalmente se utiliza a transformada discreta de Fourier, tendo como

objetivo básico o de aproximar uma função do tempo por uma combinação linear de harmônicos (componente senoidais) (MORETTIN & TOLOI, 2006).

Em 1827, Joseph Fourier afirmou (BOLZAN, 2004), na sua teoria de análise de frequências, que qualquer função periódica $f(x)$ poderia ser obtida, de maneira aproximada, pela somatória de funções senoidais:

$$f(x) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(kx) + b_k \text{sen}(kx)) \quad (33)$$

Onde: a_0 , a_k e b_k são constantes dadas por:

$$a_0 = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx \quad (34)$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(kx) dx \quad (35)$$

$$b_k = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \text{sen}(kx) dx \quad (36)$$

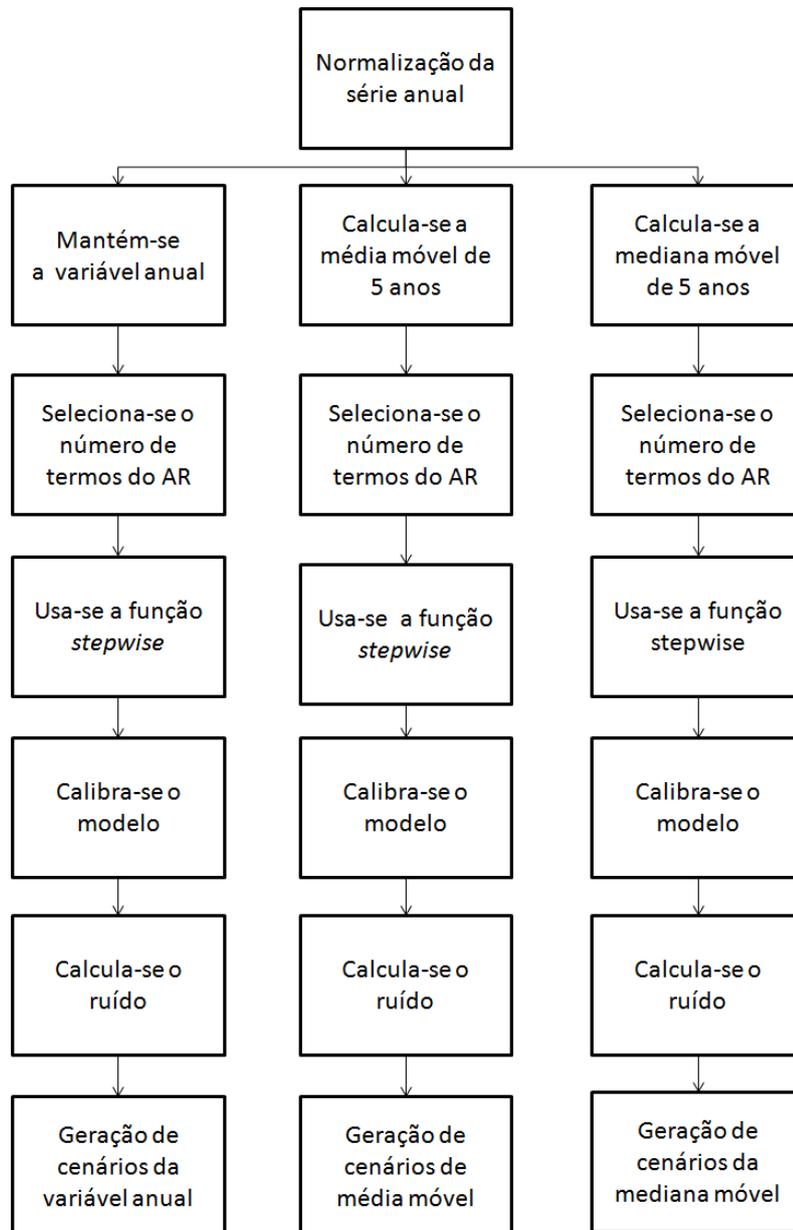
Sendo a séries de Fourier periódicas, logo $f(x + p) = f(x)$, sendo p o período.

A transformada de Fourier pode ser considerada um limite de uma combinação linear infinita de ondas senoidais. Uma função aperiódica pode ser considerada o caso limite de uma função periódica, cujo período tende ao infinito. Assim, pode-se representar uma série temporal como (BOLZAN, 2004):

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (37)$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-i\omega t} dx \quad (38)$$

Figura 59 - Opções de modelos auto-regressivos usados para projeção decadal- ARs(coluna 1), ARsMedia(coluna 2) e ARsMediana (coluna 3).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

9.3.2. A geração do modelo baseado na série de Fourier

A transformada de Fourier é uma transformada reversível, porém não há informação de frequência disponível no domínio do tempo da série ou sinal, com isso não há informação de tempo disponível na transformada de Fourier do sinal. Ou seja,

através da informação da transformada do sinal fornecido é possível estimar quanto de cada frequência existe no sinal, mas isso não informa desde quando no tempo estas componentes de frequência existem. Esta informação não é necessária quando o sinal é estacionário (sinais cujo conteúdo de frequência não muda com o tempo).

Um processo é estacionário se ele se desenvolve no tempo, de modo que a escolha de uma origem dos tempos não seja importante, as características probabilísticas são as mesmas ao longo da série temporal (MORETTIN, 1999). Nesse caso, todas as componentes de frequência existem o tempo todo. Para tornar mais sutil essa suposição nas séries de vazões e precipitação é feito o teste de tendência de Man Kendall-Sen com nível de significância de 95%, caso hipótese de tendência seja confirmado a mesma é retirada da série para em seguida ser usada a transformada de *Fourier*.

Na Figura 60 é mostrado o desenho esquemático dos modelos baseados em séries de Fourier e na seção 10.3.2.1 é mostrada a obtenção dos parâmetros da série de Fourier.

10.3.2.1 Estimação dos parâmetros periódicos de séries de Fourier

A representação da série de Fourier de u_τ , denotada por \hat{u}_τ , pode ser obtida pela equação 39 (YEVJEVICH,1972)

$$\hat{u}_\tau = \bar{u} + \sum_{j=1}^h \left[A_j \cos\left(\frac{2\pi j\tau}{\omega}\right) + B_j \sin\left(\frac{2\pi j\tau}{\omega}\right) \right], \tau = 1, \dots, \omega \quad (39)$$

Onde \bar{u} é média de u_τ , A_j e B_j são os coeficientes da série de Fourier, j é o harmônico e h é o número total de harmônico. Sendo h igual a $\frac{\omega}{2}$ (em caso de ω par) ou $\frac{\omega-1}{2}$ (em caso de ω ímpar). Para a análise das séries temporais o ω é exatamente igual ao número total de anos usados para a calibração.

Sendo,

$$\bar{u} = \frac{1}{\omega} \sum_{\tau=1}^{\omega} u_\tau \quad (40)$$

$$A_j = \frac{2}{\omega} \sum_{\tau=1}^{\omega} u_\tau \cdot \cos\left(\frac{2\pi j\tau}{\omega}\right), j = 1, \dots, h. \quad (41)$$

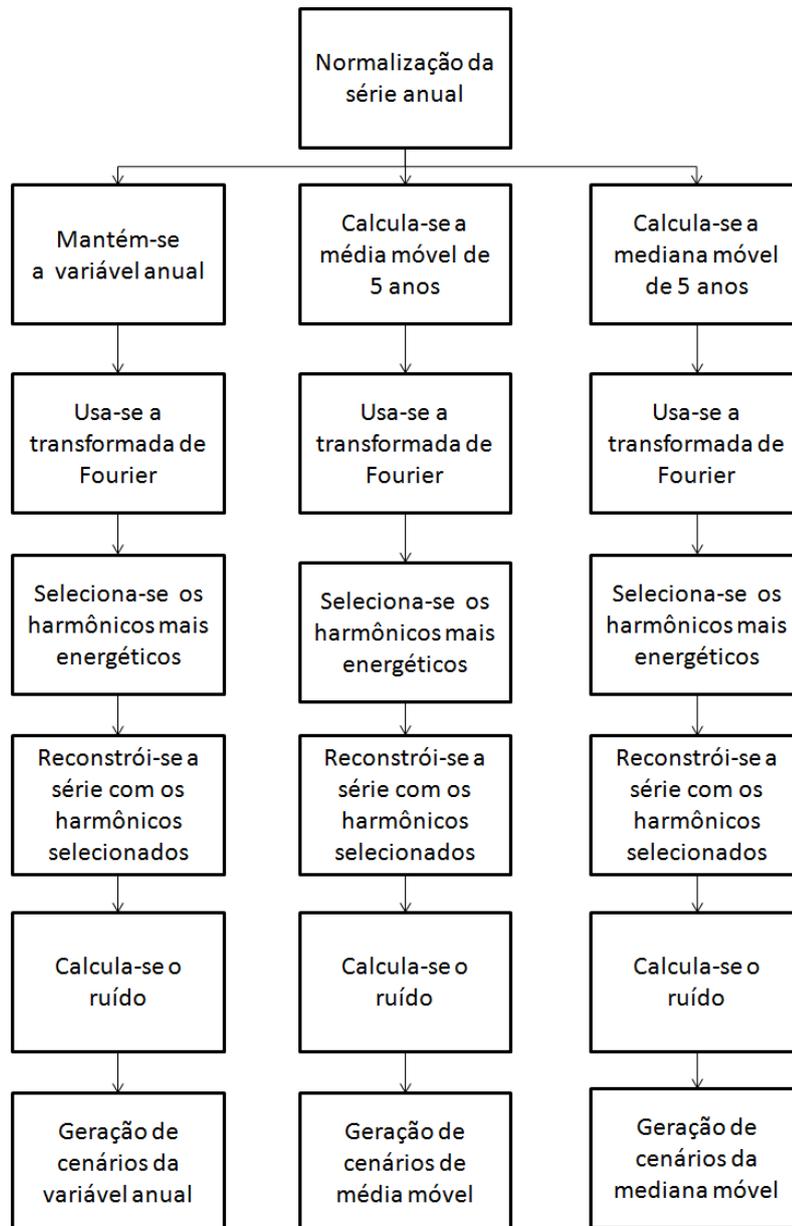
$$B_j = \frac{2}{\omega} \sum_{\tau=1}^{\omega} u_{\tau} \cdot \text{sen} \left(\frac{2\pi j \tau}{\omega} \right), j = 1, \dots, h. \quad (42)$$

Onde \hat{u}_{τ} da equação X é calculado inicialmente usando todos os harmônicos $j = 1, \dots, h$ (todos os coeficientes A_j e B_j , espera-se que \hat{u}_{τ} seja aproximadamente igual a z_{τ} para todos os valores de $\tau = 1, \dots, \omega$).

Para realizar as projeções usando essa técnica são selecionados alguns harmônicos $h^* < h$ (aqueles que possuem maior significância, ou seja, aqueles que mais contribuem para a variabilidade da série temporal). A seleção dos h^* é feita pela análise do espectro de potência da série de Fourier.

Sendo a série de Fourier projetada baseada na equação 39 com uso apenas dos h^* .

Figura 60 - Opções de modelos baseados na série de Fourier para projeção decadal- FA(coluna 1), FMedia(coluna 2) e FMediana(coluna 3).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

9.4.O modelo baseado na série de *Ondeletas*

Segundo Wilks (1995), existem duas formas fundamentais de análise de séries temporais quanto à variabilidade interanual e interdecadal: análises no domínio do

tempo e no domínio de frequência. A primeira busca caracterizar a série de dados considerando o mesmo domínio em que os dados foram coletados/observados. Já as análises no domínio de frequência buscam a representação da série temporal em termos da contribuição de cada escala temporal para um dado valor.

Diante da dificuldade em se caracterizar as variabilidades tanto de espaço como de tempo no padrão de chuvas e vazões, torna-se necessário utilizar um método de análise adequado na localização temporal das estruturas de multiescalas. Um dos métodos usados neste estudo para caracterizar as variabilidades tanto no espaço como no tempo é a Transformada em Ondeletas (TO). Este método é recomendado para o estudo de fenômenos transientes, espacialmente heterogêneos e que atuam simultaneamente em várias escalas do escoamento (TORRENCE & COMPO, 1998).

Para identificar as frequências de variação mais significativas de uma série temporal pode-se utilizar a potência do sinal do Espectro Global da Ondelela. A potência está associada da intensidade do sinal da série histórica para uma dada frequência ou banda (intervalo) de frequências. A potência é o valor absoluto (norma da parte real e imaginária da ondeleta) ao quadrado dos valores da transformada da ondeleta da série temporal para cada frequência em determinado instante de tempo (TORRENCE & COMPO, 1998). Este procedimento, conhecido na literatura científica pelo termo em inglês de *Global Wavelet Spectrum* (Espectro de Ondelela Global), é uma forma similar do espectro de energia obtido via Transformada Rápida de *Fourier*.

No espectro de energia global é possível identificar exatamente as bandas (frequências) características presentes na série analisada. Esta representação possui um caráter muito vantajoso e utilitário que é a localização no tempo da variabilidade da energia de uma série temporal. A transformada contínua de ondeletas envolve um enorme número de escalas o que gera um volume grande de dados. Uma estratégia computacionalmente mais eficiente é a escolha de apenas um subconjunto de escalas e posições para os quais os coeficientes devem ser calculados. Adotando-se essa estratégia, a transformada de ondeletas deixa de ser contínua para ser discreta. Este análise permite que um sinal seja representado como uma soma das componentes, conforme equação 29.

Após a seleção das bandas de frequência de ondeletas, ocorre o processo de reconstrução para as mesmas. Em seguida, é aplicado um modelo autorregressivo a cada banda, considerando que as mesmas são ortogonais. O mesmo pode ser dado pela equação 43:

$$z_i^p = \sum_{i=1}^b ARS_b(i) + ARS_{R(i)}(i) \quad (43)$$

Onde ARS_b representa o modelo autorregressivo de cada banda e ARS_R representa o modelo autorregressivo do resíduo.

9.5. Modelos Baseado nas transformadas de Fourier e ondeletas

Para utilização das duas técnicas o procedimento primário é identificar as bandas de variação da transformada em ondeletas e em seguida considerar que cada banda pode ser reconstruída usando a transformada de Fourier (do mesmo modo que o modelo FA). O próximo passo é considerar que os sinais reconstruídos segundo Fourier mantém a ortogonalidade das bandas, logo a projeção das variáveis é dada pelo somatório das bandas mais resíduo reconstruídos segundo Fourier.

9.6. Métricas para avaliação de desempenho dos modelos

Após calcular as previsões de vazões para todas as regiões de interesse, é necessário avaliar o desempenho dos modelos propostos. Para os modelos autorregressivos é usada a razão da máxima verossimilhança (conforme descrito na seção 6.5.1.), enquanto para modelos baseados na série de Fourier é usada a análise qualitativa da distribuição de probabilidades acumulada do período de anos previstos.

9.6.1. Estimador de máxima verossimilhança

Para calcular este estimador faz-se necessário definir a função de verossimilhança para as observações y_1, \dots, y_n , correspondentes às variáveis Y_1, \dots, Y_n , que é dada por:

$$L(\theta) = f(y_1, \dots, y_n; \theta), \quad (46)$$

onde f é uma densidade de probabilidade conjunta do vetor das observações (y_1, \dots, y_n) e θ é um vetor de parâmetros a ser estimado.

Se Y é a variável resposta, partindo da hipótese de que as observações são mutuamente independentes e identicamente distribuídas, a função L pode ser escrita como:

$$L(\theta; y_1, \dots, y_n) = f(y_1; \theta)f(y_2; \theta) \dots f(y_n; \theta). \quad (47)$$

O princípio da verossimilhança revisto por Lindgren (1976) afirma que: “Uma inferência estatística deve ser consistente com a hipótese de que a melhor explicação de um conjunto de dados é fornecida por $\hat{\theta}$, um valor de θ que maximiza a função de verossimilhança”. Intuitivamente, maximizar a verossimilhança significa obter a população com a maior probabilidade de ter gerado a amostra.

No caso do modelo de regressão, o vetor de parâmetros de interesse é

$$\theta' = (\beta', \sigma^2), \quad (48)$$

e definindo-se L como função de β e σ^2 tem-se

$$L(\beta, \sigma^2) = \prod_{i=1}^n f_{Y_i}(y_i | \beta, \sigma^2). \quad (49)$$

Encontrar o vetor de parâmetros estimados que maximizem a função de verossimilhança é equivalente a maximizar a verossimilhança. Portanto, para obter este vetor, deriva-se parcialmente a verossimilhança em relação a cada parâmetro e iguala-se a zero. Este é o método usual de maximização do cálculo.

A FDP gama é definida pela equação 42.

$$y = f_{Y_i}(y_i | \beta, \sigma^2) = f(x | a, b) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} x^{a-1} e^{-\frac{x}{b}} \quad (50)$$

que calcula em cada um dos valores em x , usando os parâmetros correspondentes em a e b . X , a , e b podem ser vetores, matrizes ou matrizes multidimensionais, tendo todos o mesmo tamanho.

Os estimadores de máxima verossimilhança são facilmente calculados quando se utilizam ferramentas computacionais. O software MatLab retorna os parâmetros a e b da distribuição gama que estimam a máxima verossimilhança, por intermédio da função *gamfit*. Uma entrada escalar é expandida para uma matriz constante com as mesmas

dimensões como as outras entradas. Os parâmetros a e b devem ser positivos, e os valores em x devem situar-se no intervalo $[0, \infty)$.

E o cálculo do desempenho na previsão, utilizando essa metodologia com a climatologia em comparação aos dados observados totais, é realizado conforme a equação 51:

$$Desempenho = \left(\frac{L(\beta, \sigma^2)_{previsão}}{L(\beta, \sigma^2)_{climatologia}} \right)^{1/n} \quad (51)$$

onde n é o número de anos da série histórica utilizada. Quando $Desempenho > 1$, significa que houve uma melhora na previsão em relação à climatologia. Ao contrário, quando $Desempenho < 1$, significa que houve uma piora na previsão.

10. RESULTADOS E DISCUSSÕES: ESCALA DE MÉDIO PRAZO- SIN

Este capítulo apresenta as técnicas usadas para projetar cenários de médio prazo (de 2 a 10 anos), aplicadas as vazões do setor elétrico do Brasil. Foram usados modelos auto regressivos, modelos baseados em Fourier e modelos baseados em ondeletas.

10.1. Análise de tendência usando métodos clássicos

Os resultados da análise de tendências (método de Mann-Kendal e declividade de Sen) apresentados na Figura 61 mostram uma tendência de aumento, ou variabilidade de baixa frequência nas vazões nos postos das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, enquanto se observa uma tendência de redução, ou variabilidade de baixa frequência nas vazões das regiões Norte e Nordeste.

A Figura 61 indica ainda que existem três áreas em diferentes situações no país, quanto ao sinal da tendência: com tendência positiva (região Sul, Mato Grosso do Sul e São Paulo), negativa (região Nordeste, Espírito Santo e Minas Gerais) e ausência de tendência (demais regiões e estados).

A Tabela 16 apresenta os resultados para os 21 postos selecionados por este estudo (localizados nas principais bacias hidrográficas do setor hidroelétrico), sendo que no teste de hipótese (h), o valor igual a zero indica a ausência de tendência significativa na série. Apenas oito postos apresentam tendência significativa, sendo que sete destes registraram tendência positiva, enquanto apenas um acusou tendência negativa. Os resultados para as médias e medianas móveis, além do método Lowess, mostram uma variabilidade de alta frequência, com período de poucos anos, nas séries de vazões médias mensais naturalizadas dos 192 postos estudados. e as Figuras 62,63 e 64 exemplificam e apresentam os gráficos de tendência de Sen, dos três casos possíveis quanto ao sinal da mesma ausência de tendência (Furnas), tendência negativa (Sobradinho) e tendência positiva (Porto Primavera).

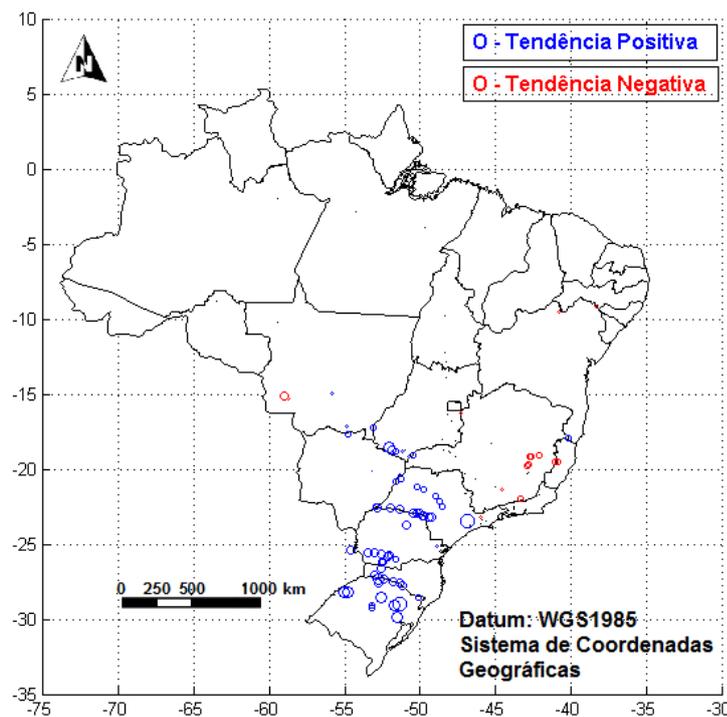
Nas Figuras 62, 63 e 64 observa-se uma acentuada variabilidade interanual das vazões médias. Observa-se, ainda, que essas vazões médias apresentam uma amplitude elevada no período de tempo analisado, com mínimo de 400m³/s e máximo de

2.200m³/s na Figura 62 mínimo de 1.250m³/s e máximo de 5.000m³/s na Figura 63, e mínimo de 4.000m³/s e máximo de 15.000m³/s na Figura 64.

A série histórica em Sobradinho mostra uma possível relação com a anomalia da ODP (conforme mostra a Figura 7 e a Figura 8), indicando que a tendência por ela indicada pode estar relacionada à variabilidade climática. Essa relação sugere que para períodos de fase fria da ODP as vazões tendem a ser menores.

Os postos Furnas e Porto Primavera apresentaram séries históricas bastante correlacionadas, sinalizando que ambas sofrem influência de fenômenos meteorológicos semelhantes. Isso sugere que a mudança de patamares mostrada na série de Porto Primavera pode estar associada a outros fatores, além da variabilidade climática; como, por exemplo, mudanças no uso e ocupação do solo e mudanças climáticas.

Figura 61 - Mapa de distribuição espacial das tendências de Sen das vazões médias mensais naturalizadas dos postos do ONS. O tamanho do círculo indica a intensidade da declividade de Sen,



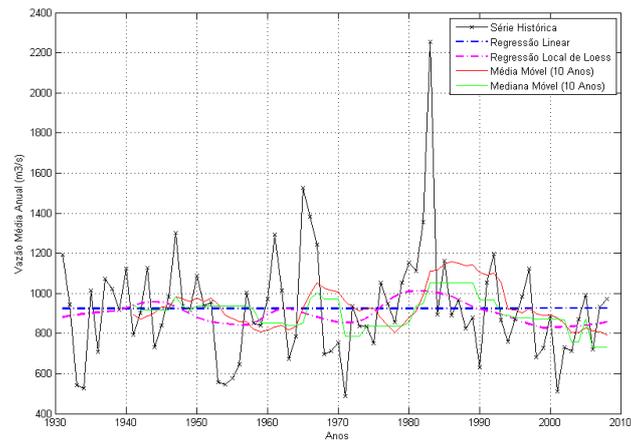
Fonte: Alves et al. (2012).

Tabela 16 - Declividade de Sen para 21 dos 192 postos selecionados neste estudo.

Postos do Sistema Interligado Nacional (SIN)	Nome da Bacia	Mann-Kendall Ajustado (Taub)	H ₀	Declividade de Sen (m ³ /s/ano)	Vazão Média (m ³ /s) 1931-2010	Variação anual
EMBORCAÇÃO (24)	Alto Paranaíba	-0,030	0	-0,242	486	-0,05%
NOVA PONTE (25)	Alto Paranaíba	-0,076	0	-0,443	299	-0,15%
ITUMBIARA (31)	Paranaíba	-0,054	0	-1,349	1.557	-0,09%
SÃO SIMÃO (33)	Paranaíba	0,195	1	7,599	2.410	0,32%
FURNAS (6)	Alto Grande	-0,029	0	-0,443	927	-0,05%
ÁGUA VERMELHA (18)	Grande	0,051	0	1,614	2.102	0,08%
NOVA AVANHANDAVA (242)	Tietê	0,216	1	2,567	753	0,34%
PORTO PRIMAVERA (246)	Paraná	0,314	1	26,824	7.259	0,37%
ROSANA (63)	Paranapanema	0,273	1	6,967	1.293	0,54%
ITAIPU (266)	Paraná	0,421	1	57,201	10.239	0,56%
SANTA CECÍLIA (125)	Paraíba do Sul	-0,100	0	-0,370	297	-0,12%
SALTO CAXIAS (222)	Iguaçu	0,217	1	6,990	1.339	0,52%
ITÁ (92)	Uruguai	0,190	1	4,932	1.033	0,48%
DONA FRANCISCA (114)	Jacuí	0,135	0	1,016	324	0,31%
TRÊS MARIAS (156)	Alto São Francisco	-0,019	0	-0,199	691	-0,03%
SOBRADINHO (169)	Médio São Francisco	-0,160	1	-6,652	2.666	-0,25%
XINGÓ (178)	Baixo São Francisco	-0,143	0	-6,016	2.763	-0,22%
SERRA DA MESA (270)	Alto Tocantins	-0,114	0	-1,659	774	-0,21%
LAJEADO (273)	Tocantins	-0,069	0	-2,858	2.444	-0,12%
TUCURUI (275)	Tocantins	0,021	0	3,278	10.980	0,03%
SANTO ANTÔNIO (287)	Madeira	-0,083	0	-18,090	18.890	-0,10%

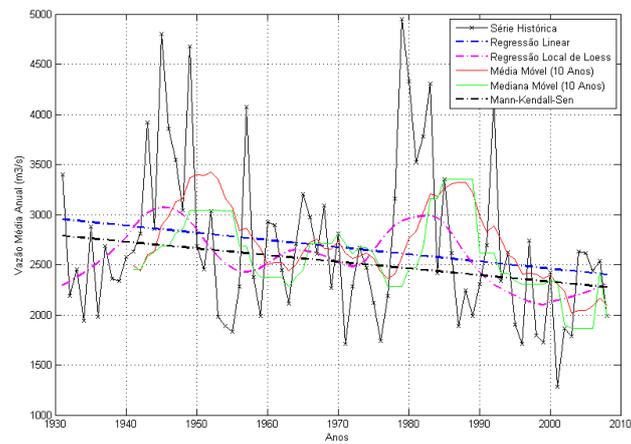
Fonte: Alves et al. (2012).

Figura 62-Ausência de tendência de Sen – Posto Furnas (6).



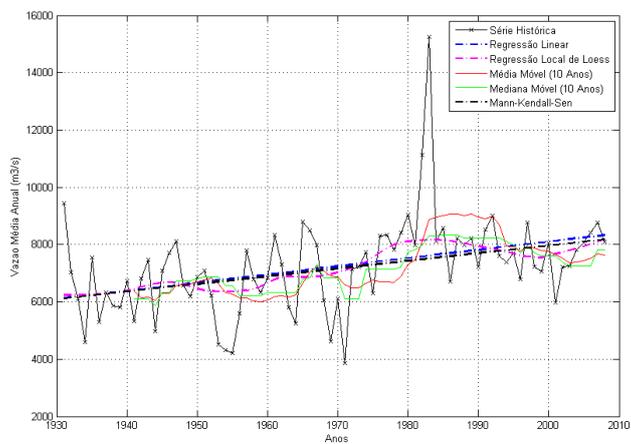
Fonte: Alves et al. (2012).

Figura 63 - Tendência de Sen Negativa – Posto Sobradinho (169).



Fonte: Alves et al. (2012).

Figura 64 - Tendência de Sen Positiva – Posto Porto Primavera (246).



Fonte: Alves et al. (2012).

10.2. Modelo baseado na série de Fourier

Na Figura 65 são mostrados os espectros globais de potência das séries observadas de vazões anuais usando a transformada de *Fourier* em função da frequência, para Furnas, Sobradinho, Itaipu e Tucuruí. Os espectros mostram oscilações em diversas escalas de frequência, porém em Furnas e Sobradinho há três harmônicos que apresentam maior potência. Em Tucuruí é difícil destacar quais harmônicos apresentam maiores potências, pois há vários de alta frequência contribuindo com a variabilidade da série temporal.

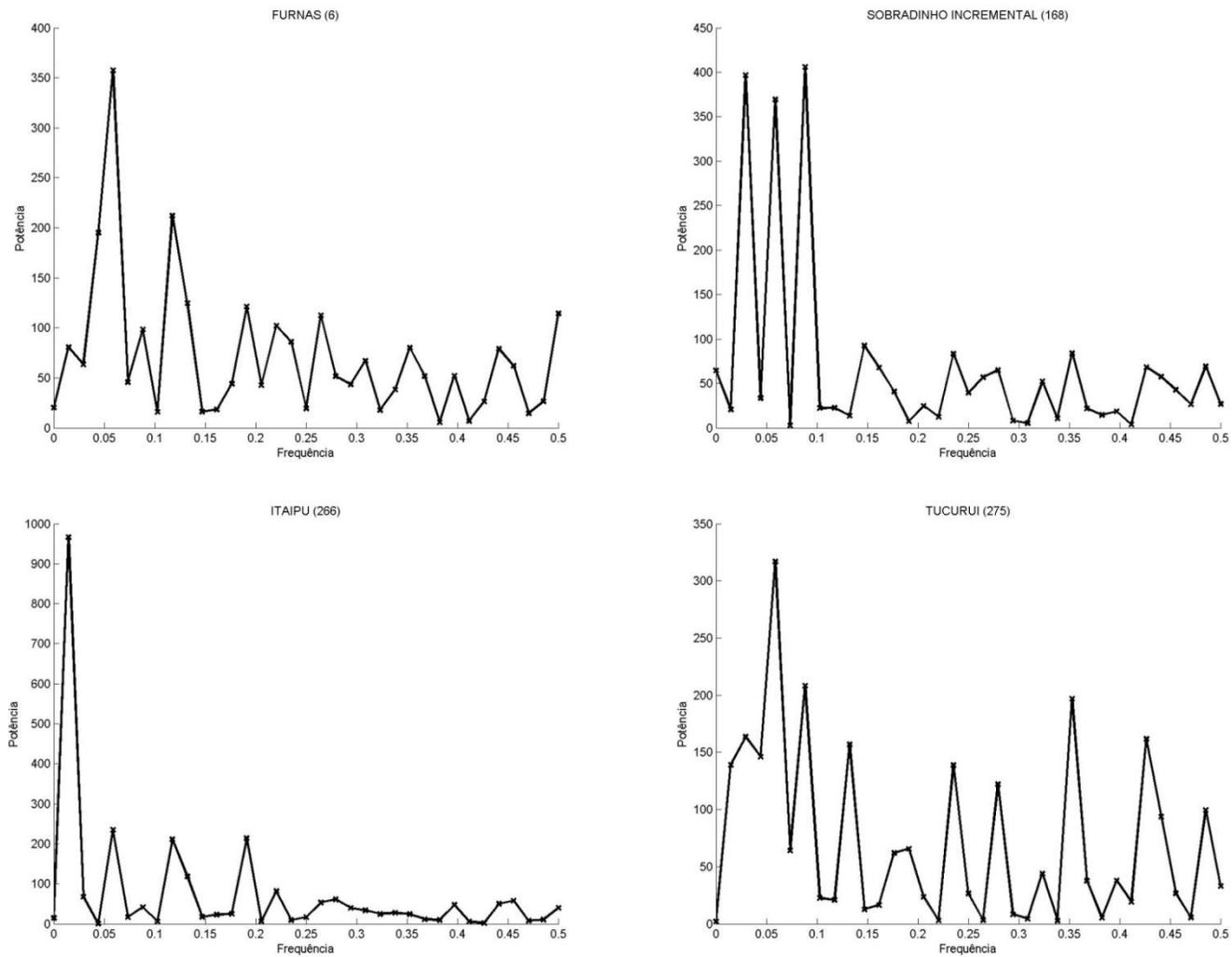
Na Tabela 17 são mostrados os harmônicos utilizados para a geração do modelo baseado em *Fourier*, juntamente com os seus respectivos coeficientes da série de *Fourier*. Os quatro postos apresentam um modo de variação em comum de aproximadamente $0,059 \text{ ano}^{-1}$, o que corresponde a aproximadamente 17 anos. Enquanto, em Furnas e Itaipu há também outro modo de variação comum de $0,118 \text{ ano}^{-1}$. Assim como, Sobradinho e Tucuruí que apresentam outro modo comum de $0,088 \text{ ano}^{-1}$.

Tabela 17 - Coeficientes de Fourier para os harmônicos selecionados para construção do modelo baseado em Fourier.

Posto	Nº do harmônico	A	B	Frequência
Furnas	3	0,516	-0,208	0,044
	2	0,359	0,234	0,118
	1	-0,324	0,252	0,059
Sobradinho	3	-0,312	0,504	0,059
	2	-0,575	0,113	0,029
	1	0,446	-0,347	0,088
Itaipu	4	0,292	-0,866	0,118
	3	0,278	-0,355	0,191
	2	0,282	-0,325	0,059
	1	0,424	0,053	0,015
Tucuruí	3	0,368	-0,065	0,353
	2	-0,361	-0,075	0,088
	1	-0,195	0,297	0,059

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 65 - Espectro de potência das vazões anuais normalizadas usando transformada de Fourier para Furnas, Sobradinho, Itaipu e Tucuruí.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

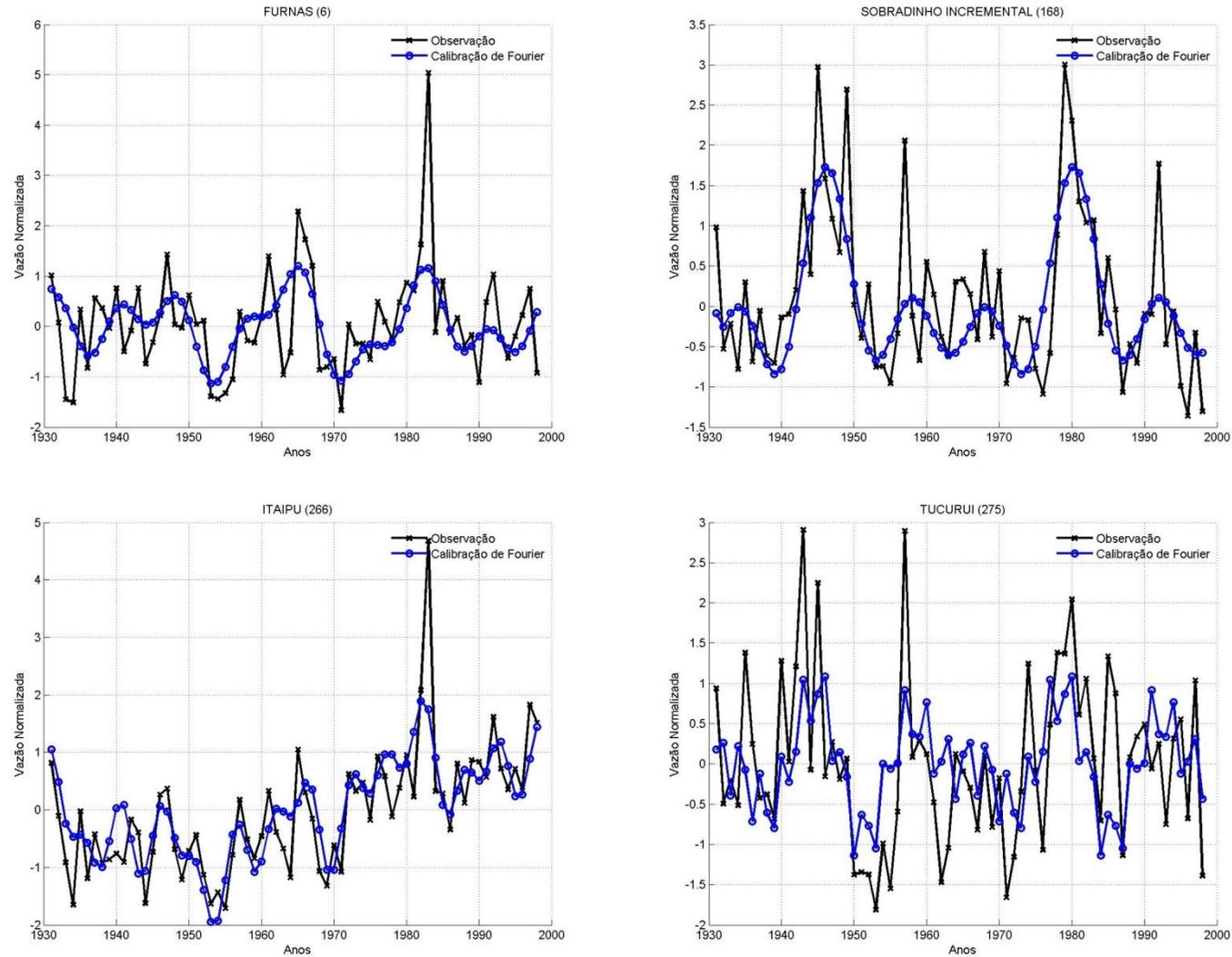
Na Figura 66 são mostradas as séries observadas de vazões e a série de *Fourier* com os harmônicos mostrados na

Tabela 17 para o período de calibração (1931 a 1998). O modelo consegue capturar a variabilidade das vazões no SIN, capturando a maioria dos máximos e mínimos das séries temporais.

Na Figura 67 é mostrado o harmônico de 0,059 de frequência, aproximadamente 17 anos, comum às séries de Furnas, Sobradinho, Itaipu e Tucuruí. Em Furnas, Sobradinho e Itaipu as projeções do harmônico indicam que este deve entrar na fase de menores vazões no período previsto. Enquanto em Tucuruí o harmônico encontra-se já na fase de menores vazões, com uma possível transição no fim do período projetado.

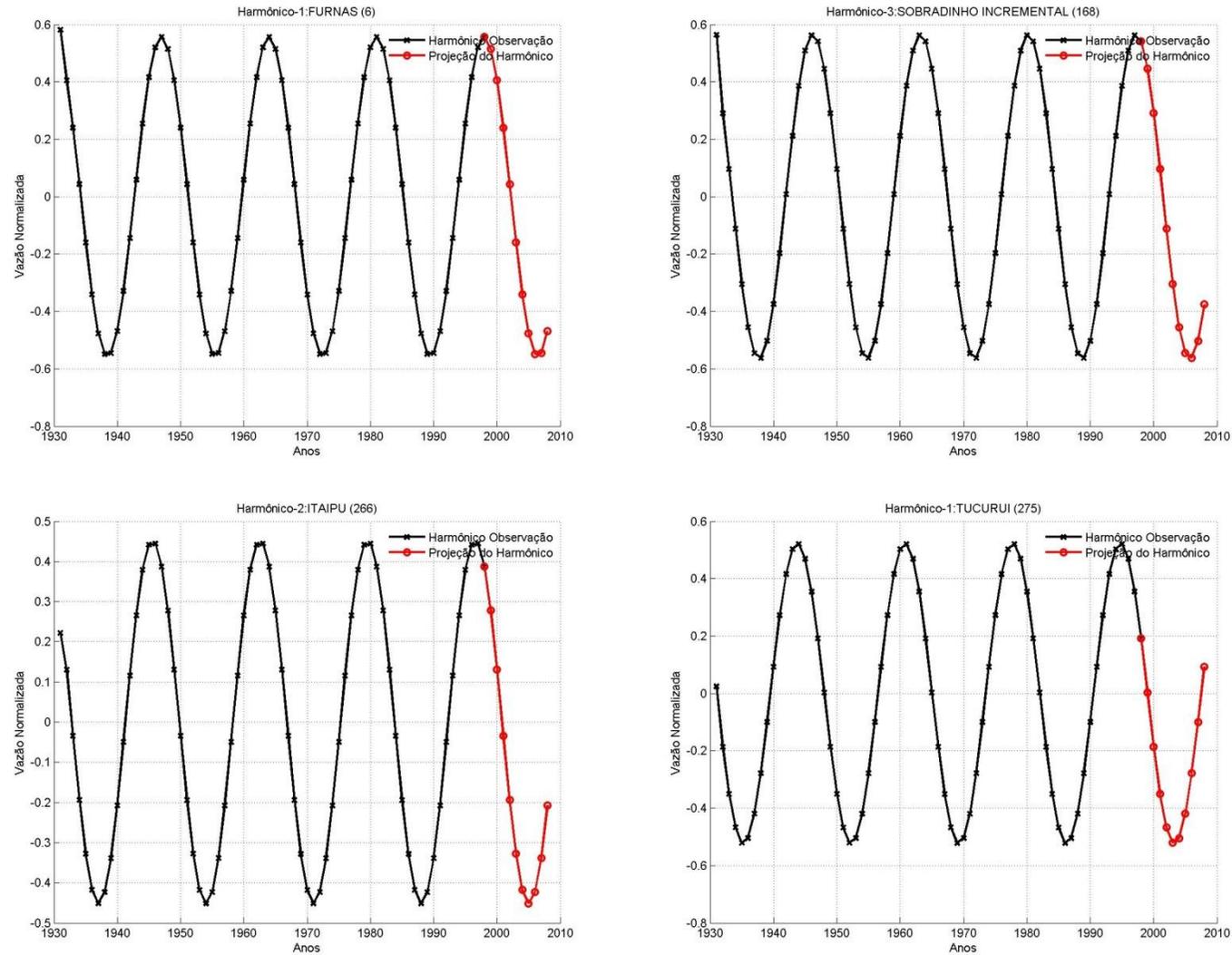
Na Figura 68 é mostrado o harmônico de 0,118 de frequência, aproximadamente 8,5 anos, comum às séries de Furnas e Itaipu. No período previsto este harmônico entra na fase de menores vazões e começa o período de transição para vazões de maior magnitude. Enquanto na Figura 69 é mostrado o harmônico comum a Tucuruí e Sobradinho, aproximadamente 11 anos, o mesmo inicia a fase de vazões de maior magnitude no período previsto e em seguida declina para o período de vazões menores.

Figura 66 – Série observada e reconstruídas a partir dos Harmônicos de *Fourier*.



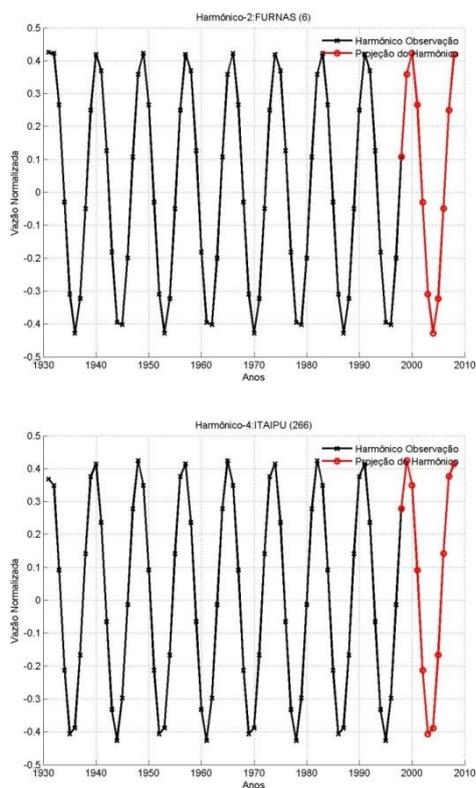
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 67 - Harmônico de frequência 0,059 para Furnas, Sobradinho, Itaipu e Tucuruí.



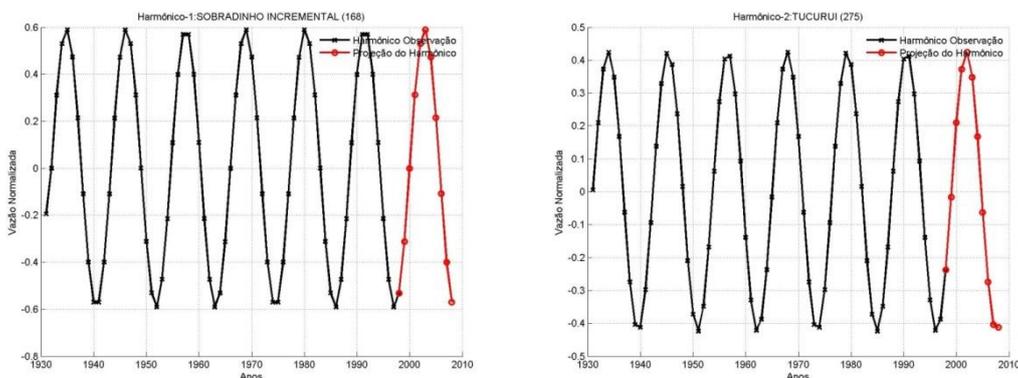
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 68 - Harmônico de frequência 0,118 para Furnas e Itaipu.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

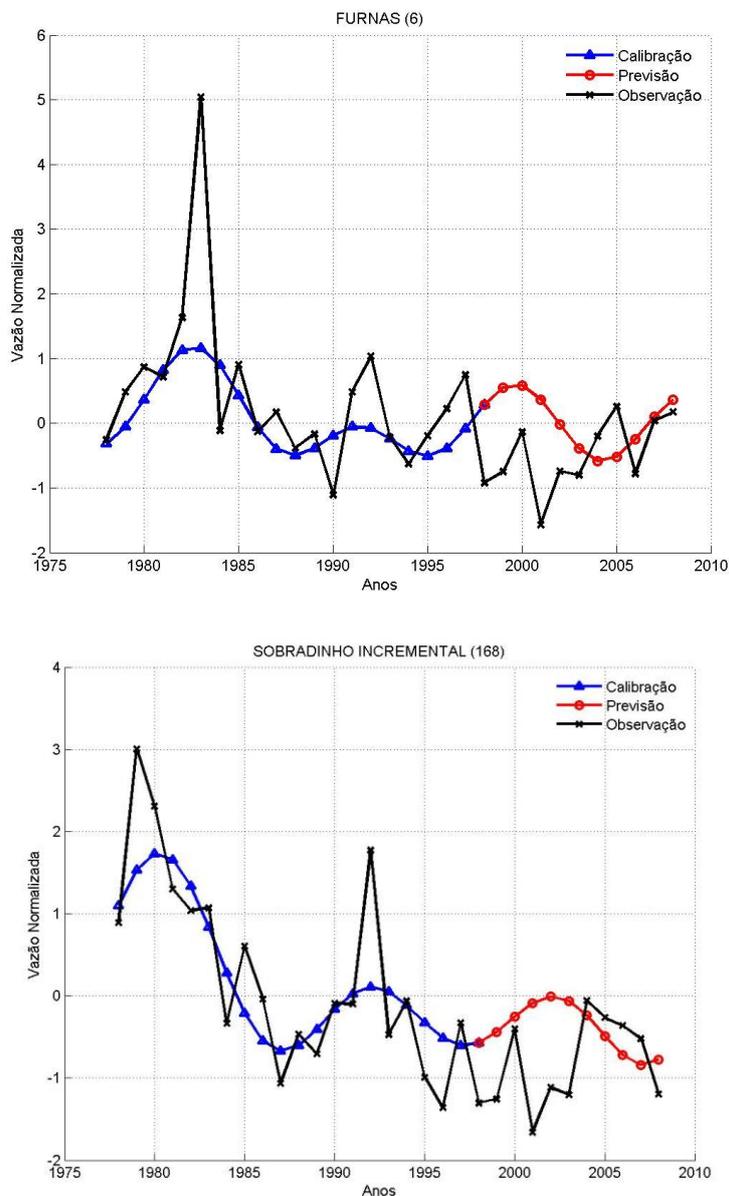
Figura 69 - Harmônico de frequência 0,088 para Sobradinho e Tucuruí.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 70 são mostradas as projeções para Furnas e Sobradinho Incremental usando os harmônicos de *Fourier*. Para Sobradinho, posto onde os harmônicos mais energéticos são de baixa frequência, o modelo identifica que as vazões no período projetado devem ser abaixo da média. Enquanto em Furnas o modelo superestimou os valores de vazões na maioria dos anos projetados, porém os últimos anos da projeção são bem capturados pelo modelo.

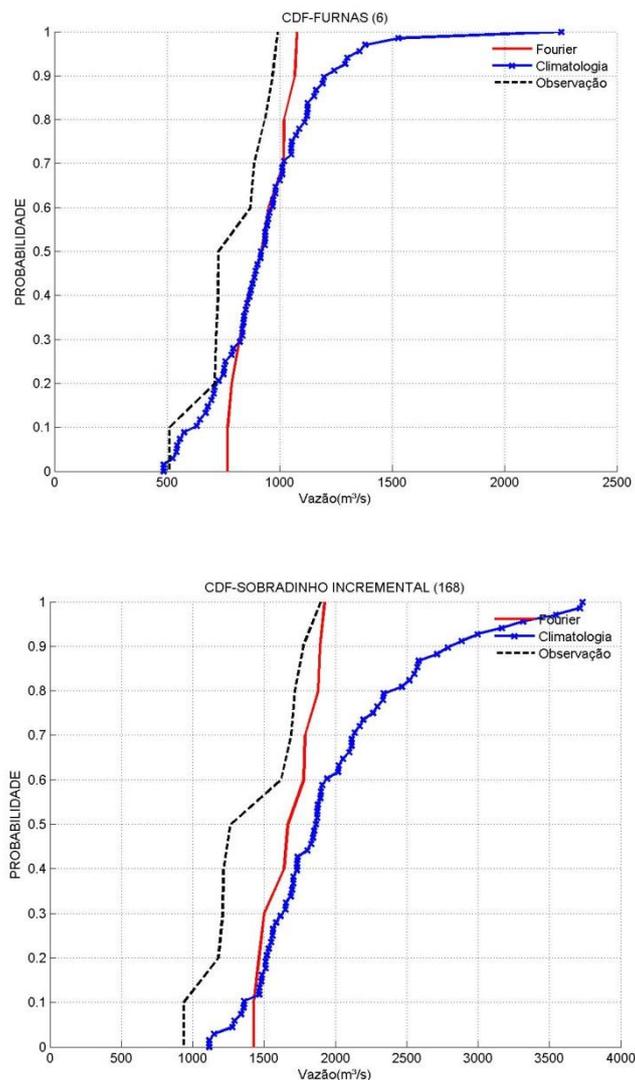
Figura 70-Projeção composta pelos harmônicos selecionados para as vazões anuais em Furnas e Sobradinho Incremental.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 71 são mostradas comparações entre as funções de distribuição de probabilidade acumulada (CDF) previstas pelo modelo baseado na série de *Fourier* (FA), a climatologia e a observação para diferentes horizontes de previsão para Furnas e Sobradinho. Em todos os horizontes mostrados há uma clara redução da variância em relação à climatologia e modelo identifica, principalmente em Sobradinho, que se trata de um período de vazões abaixo da média histórica, indicando que essa informação pode ser utilizada no planejamento de médio prazo.

Figura 71-Comparação entre as funções de distribuição de probabilidade acumulada previstas pelo modelo FA para 10 anos, a climatologia e a observação para diferentes horizontes de previsão. Para Furnas e Sobradinho Incremental.

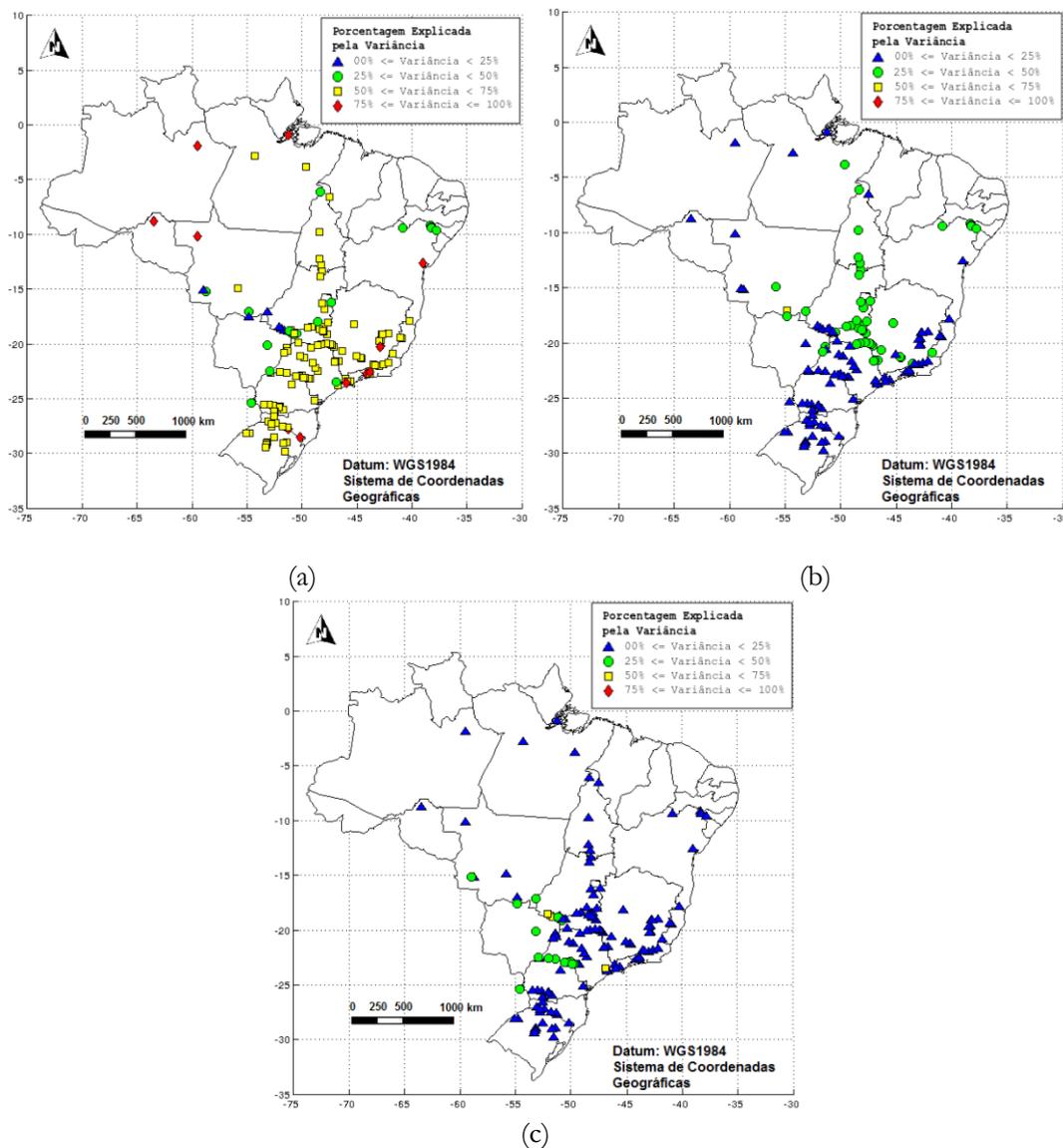


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

10.3. Análise da transformada em ondeletas

Os resultados da análise da transformada em ondeletas para os postos analisados são apresentados na Figura 72, na forma de mapas, mostrando a distribuição espacial das proporções da variância explicadas pelas bandas de alta, média e baixa frequências, respectivamente.

Figura 72-(a) Mapa das proporções da variância explicada pela banda de alta frequência (1 a 8 anos); (b) Mapa das proporções da variância explicada pela banda de média frequência (9 a 39 anos); e (c) Mapa das proporções da variância explicada pela banda de baixa frequência (mais de 40 anos).



Fonte: Alves et al.(2012)

Na Figura 72(a), observa-se que a banda de alta frequência é responsável por mais de 50% da variância na maioria das séries de vazões dos postos localizados nas regiões Norte, Sul e Sudeste. Enquanto isso, nas regiões Centro-Oeste e Nordeste, a banda de alta frequência é responsável por menos de 50% da variância na maioria dos postos, com exceção de um na região Nordeste e um na região Centro-Oeste.

A Figura 72(b) mostra que a banda de média frequência é responsável por menos de 25% da variância nas séries de vazões dos postos na região Sul, no leste da região

Sudeste, no estado de São Paulo e nas áreas central e oeste da região Norte. Em parte da região Centro-Oeste, no leste da região Norte e na maior parte do Nordeste a banda de média frequência é responsável por até 50% da variância das séries.

A Figura 72(c) mostra que na maior parte do país a banda de baixa frequência é responsável por menos de 25% da variância das séries, exceto em partes da região Centro-Oeste, nos postos na divisa de São Paulo com o Paraná e em mais dois postos na região Sudeste.

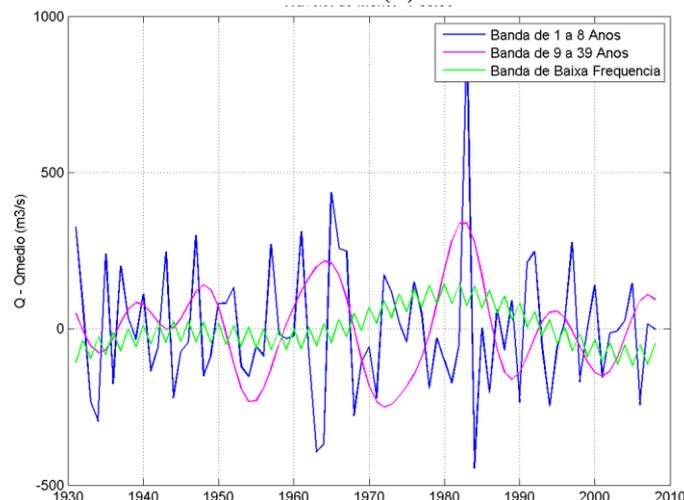
As Figuras 73, 74 e 75 apresentam e exemplificam os gráficos da análise de ondeletas para os mesmos três postos antes apresentados nas Figuras 62, 63 e 64 Furnas, Sobradinho e Porto Primavera, respectivamente.

Nas Figuras 73 e 74, observam-se uma oscilação periódica na banda de baixa frequência com período de aproximadamente 30 anos. Na Figura 75, observa-se uma oscilação periódica na banda de baixa frequência com período de 50 anos.

Observa-se, ainda, nas três citadas figuras, uma oscilação periódica na banda de média frequência com período entre 10 e 20 anos.

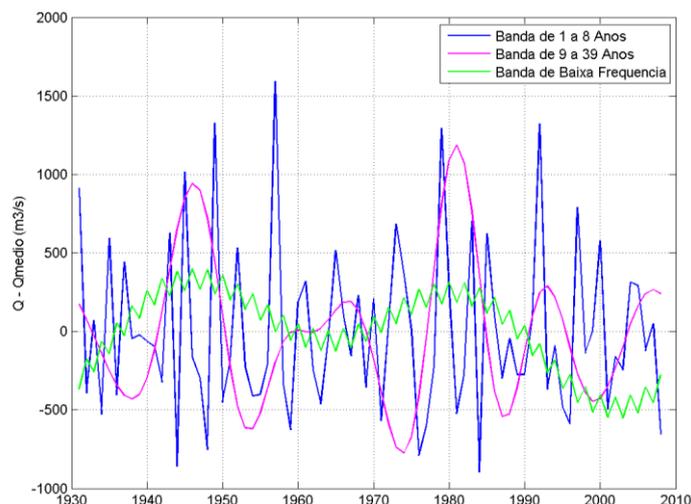
Nos postos Furnas e Porto Primavera a banda de baixa frequência apresentou mudança de fase na segunda metade do século XX, com um acentuado pico na década de 1980. A influência dessa banda na série histórica e a sua possível inversão nos próximos anos pode levar a um período de vazões menores nos próximos 30 anos.

Figura 73– Wavelet de Morlet – Posto Furnas (6).



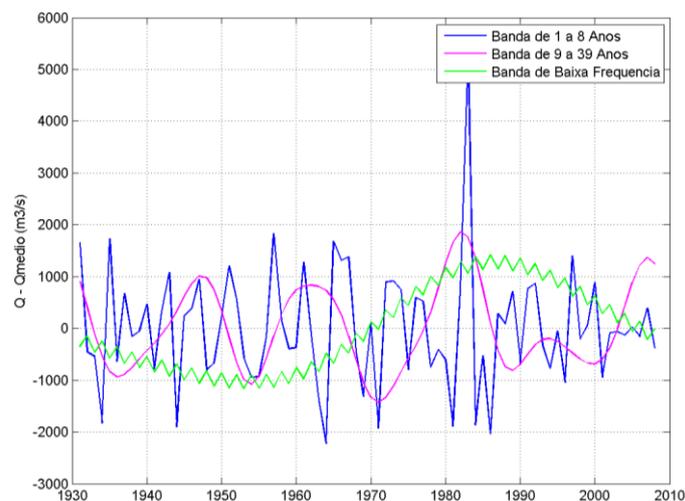
Fonte: Alves et al. (2012)

Figura 74- Wavelet de Morlet – Posto Sobradinho (169).



Fonte: Alves et al. (2012).

Figura 75- Wavelet de Morlet – Posto Porto Primavera (246).



Fonte: Alves et al. (2012).

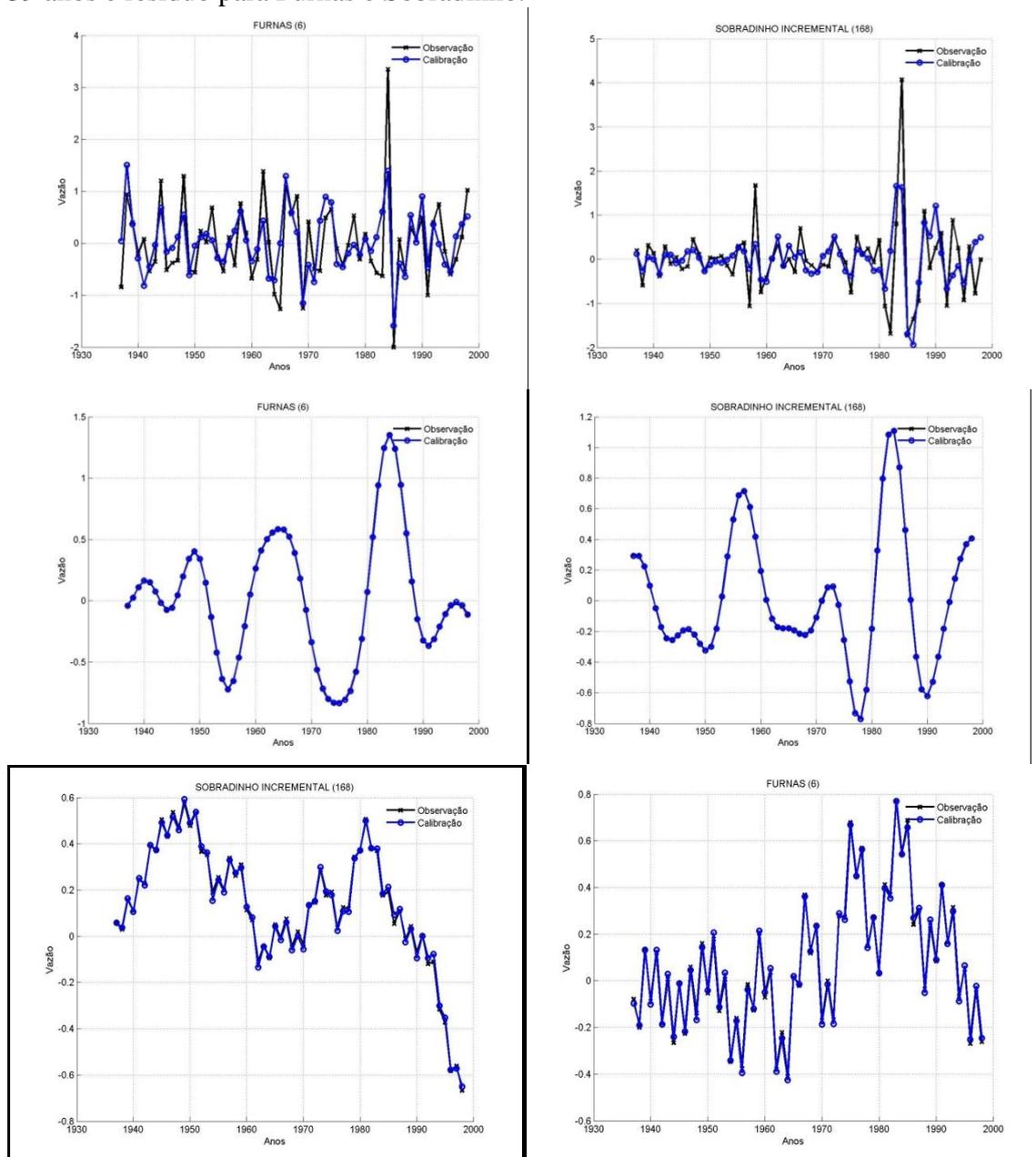
Na Figura 76 é mostrada a calibração do modelo WARs para as diferentes bandas de variação selecionadas para Furnas e Sobradinho. O modelo representa bem todas as bandas com um viés muito próximo de zero em todas elas, porém para a banda de alta frequência o modelo suaviza a maioria dos mínimos e máximos, indicando grande incerteza e aleatoriedade nessa banda.

Na Figura 77 é mostrada a projeção do modelo WARs para as diferentes bandas da transformada em ondeletas para o período de 1998 a 2008 para Furnas e Sobradinho. A amplitude do ruído da previsão cresce com horizonte da previsão, o que parece consistente com a representação da incerteza associado a processos climáticos. A banda de alta frequência apresenta ruído de amplitude elevada, superior a 1 desvio padrão

tanto para Furnas quanto para Sobradinho, o que caracteriza bastante incerteza nesse padrão de variação. O modelo identifica os padrões da banda 2, sinalizando mudanças de fase na mesma.

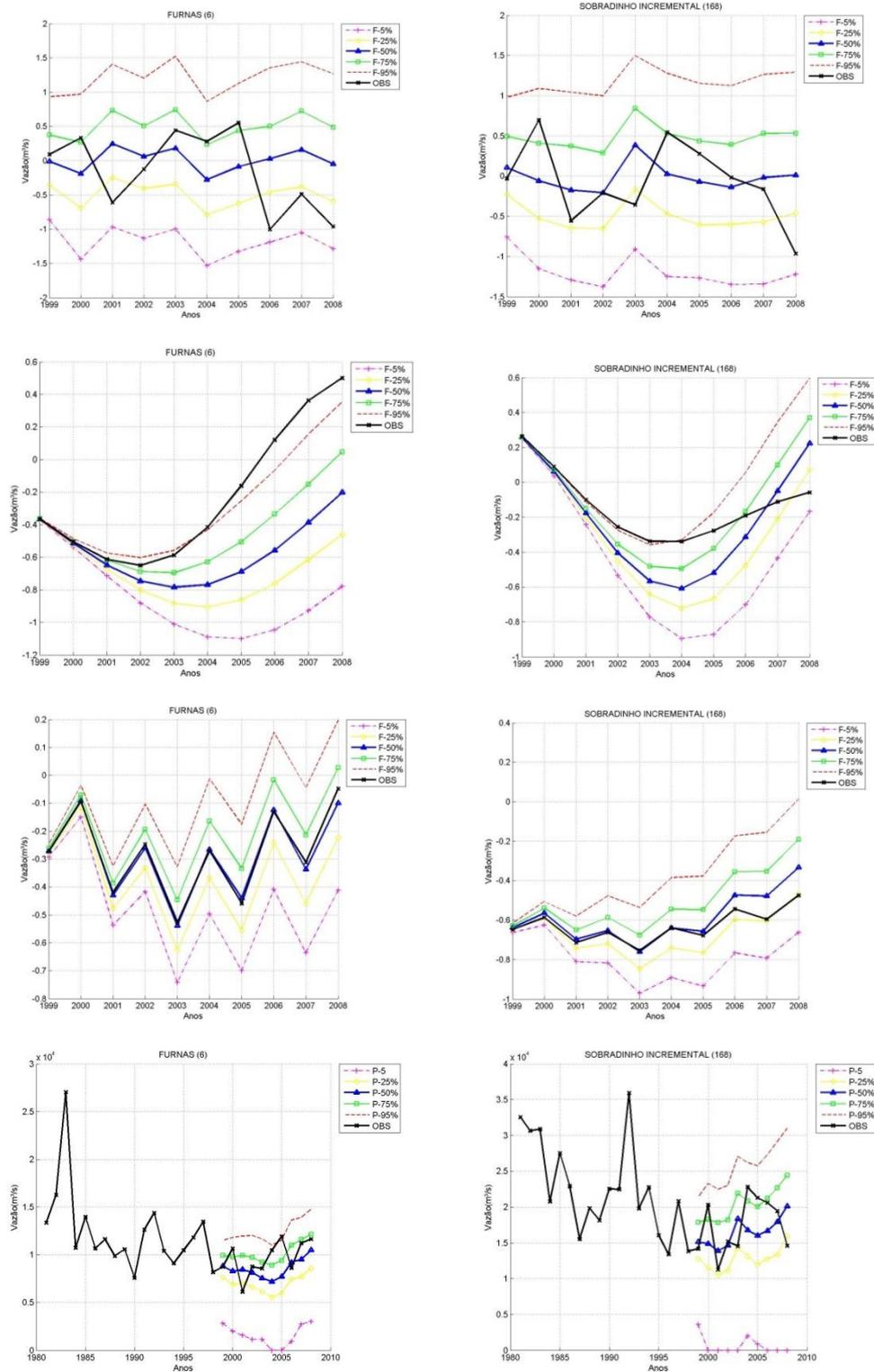
A Figura 78 mostra a razão de verossimilhança entre o modelo WARs e a climatologia. Ao compara o modelo com a climatologia da série histórica de vazões do SIN o mesmo demonstra ganho na maioria do país de 3 a 10 projetados, porém no extremo Sul do Brasil o modelo apresentou resultados piores do que a climatologia.

Figura 76-Bandas de variação da transformada em ondetas e calibração do modelo WARs. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: banda de 2 a 8 anos, banda 9 a 39 anos e resíduo para Furnas e Sobradinho.



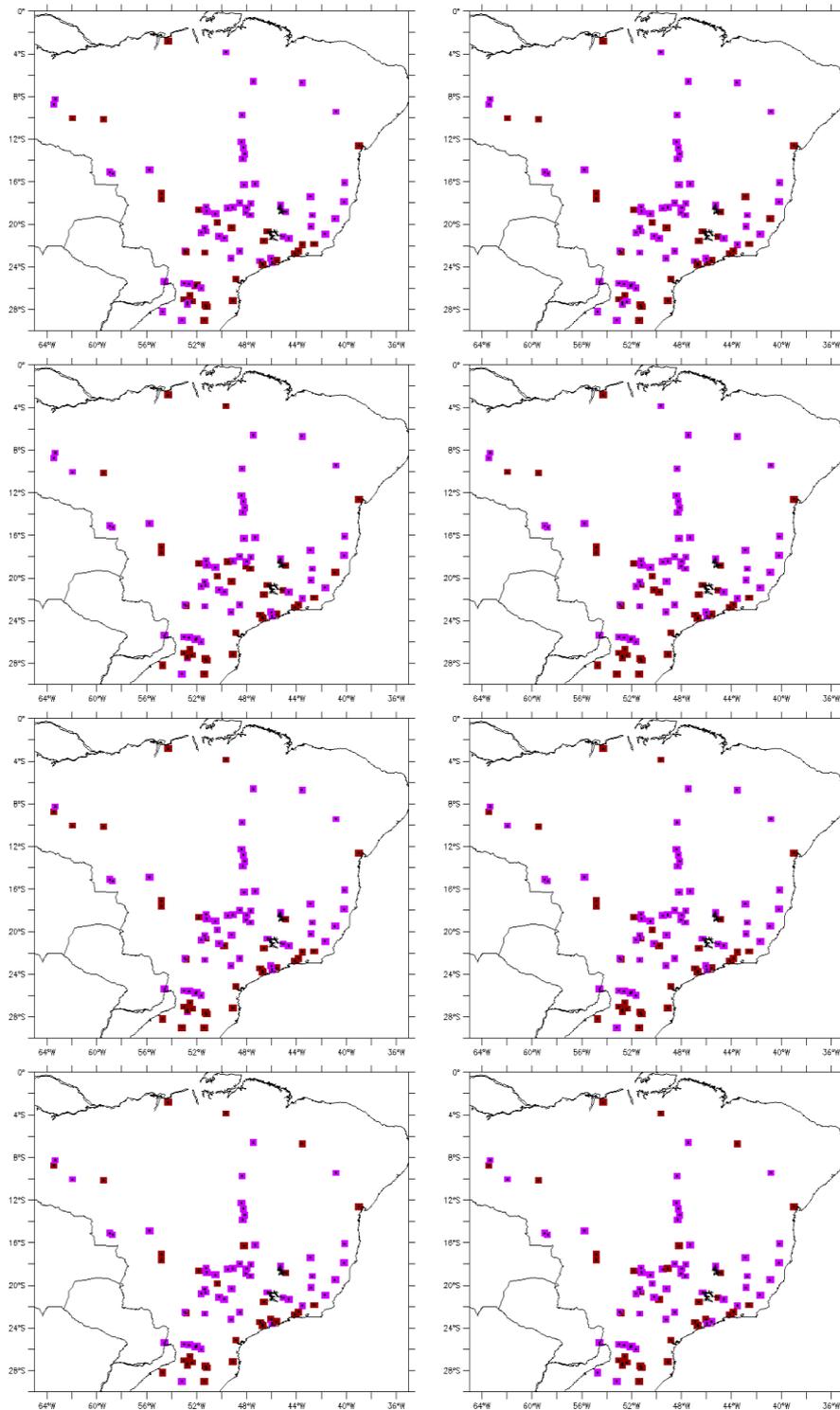
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 77-Bandas de variação da transformada em ondeletas e projeção do modelo WARs para o período de 1999 a 2008. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: banda de 2 a 8 anos, banda 9 a 39 anos, resíduo e projeção para Furnas e Sobradinho.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 78-Razão de verossimilhança obtida entre o modelo WARs e climatologia para os postos bases do SIN. Em azul razão de verossimilhança maior do que 1 e em vermelho menor do que 1.

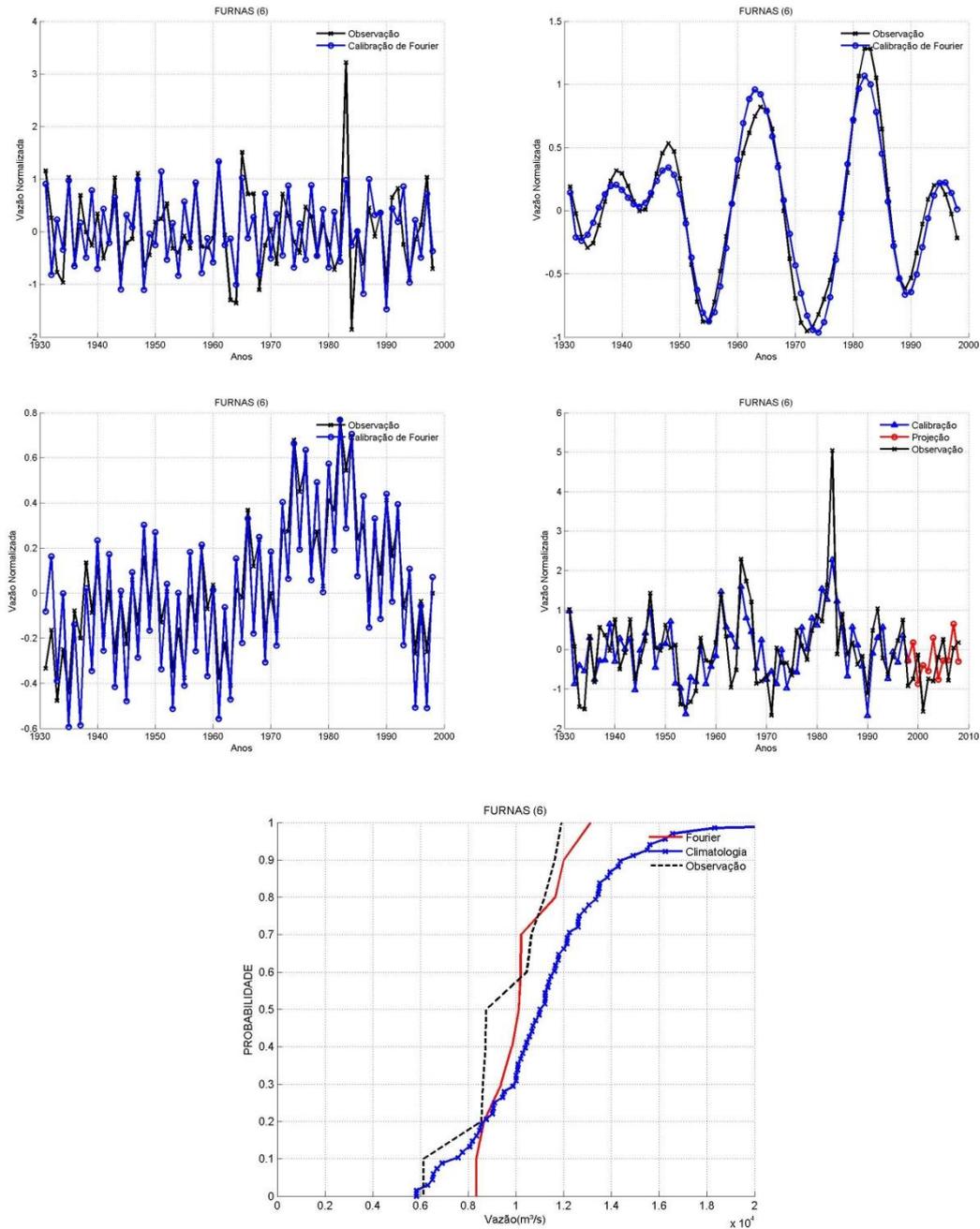


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

10.4. Fourier-ondeletas (FW)

Na Figura 79 é mostrada a calibração do modelo FW para as diferentes bandas de variação selecionadas para Furnas. O modelo representa bem todas as bandas com um viés muito próximo de zero em todas elas. Além disso, capta a ordem de grandeza das projeções, com a CDF indicando vazões abaixo da média no período selecionado.

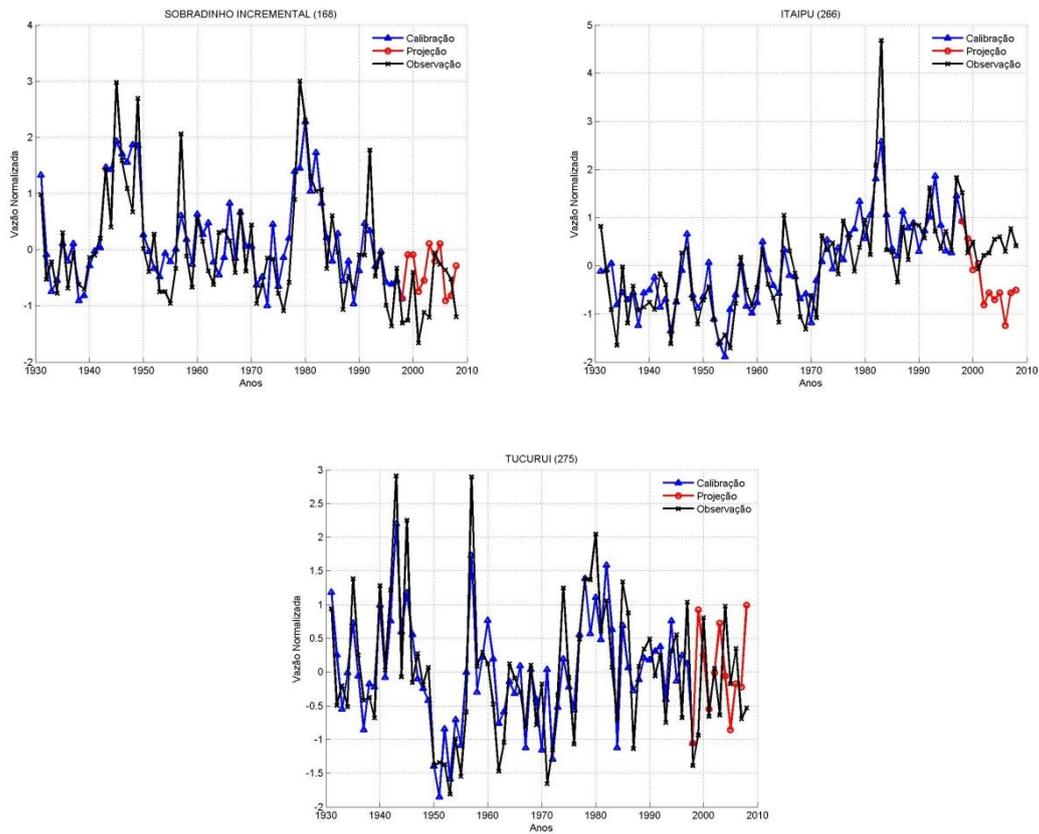
Figura 79- Calibração para cada uma das bandas de ondeletas para o modelo FW e CDF para o período de 10 anos.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 80 é mostrada a projeção do modelo FW para o período de 1998 a 2008 para Sobradinho, Itaipu e Tucuruí. O modelo identifica a magnitude das vazões em Sobradinho e em Tucuruí, porém subestima em Itaipu.

Figura 80- Projeções do modelo FW para Furnas, Sobradinho e Itaipu.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

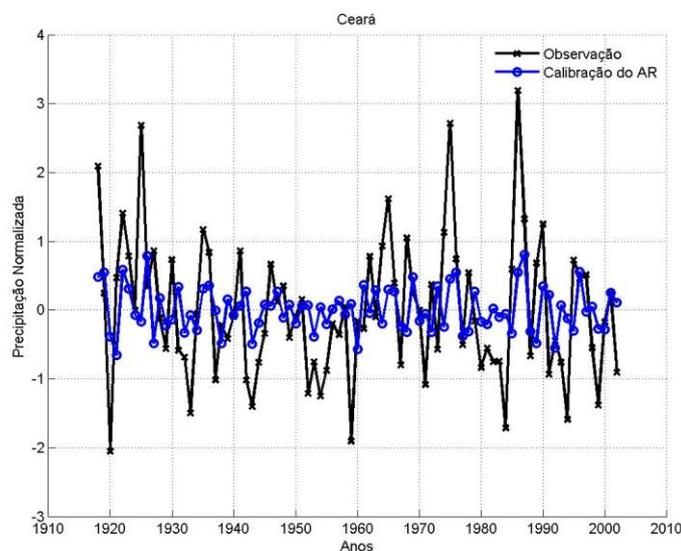
11. RESULTADOS E DISCUSSÕES: ESCALA DE MÉDIO PRAZO- CEARÁ

Este capítulo apresenta as técnicas usadas para projetar cenários de médio prazo (de 2 a 10 anos), aplicadas a precipitações no Ceará. Foram usados modelos auto regressivos, modelos baseados em Fourier e modelos baseados em ondeletas.

11.1. Modelo auto regressivo (ARs)

Na Figura 81 é mostrada a série observada de precipitação e a tentativa de calibração do modelo ARs para o período 1912 a 2002. O modelo tem dificuldade de representar a variabilidade interanual e decadal da série, apresentando valores sempre muito próximo a média, subestimando os máximos e superestimando os mínimos de precipitação. Por essa razão, esse modelo não será utilizado e as demais análises não serão realizadas.

Figura 81 - Calibração do modelo ARs para o período de 1912 a 2002.



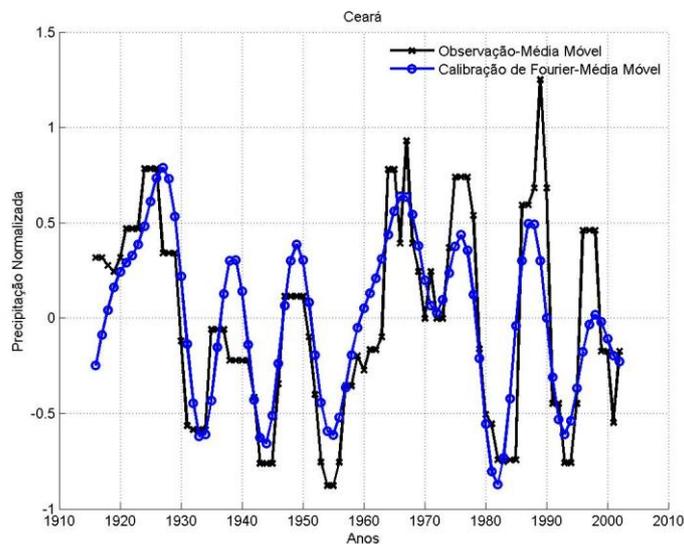
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

11.2. Modelo auto regressivo da mediana móvel de 5 anos (ARsMediana)

Na Figura 82 é mostrada a série observada de precipitação e a calibração do modelo ARsMediana para o período 1912 a 2002. O modelo representa adequadamente a variabilidade interanual e decadal da série no período calibrado. Porém, no período previsto (2003 a 2011) a mediana do modelo subestima em mais de 100 mm, conforme

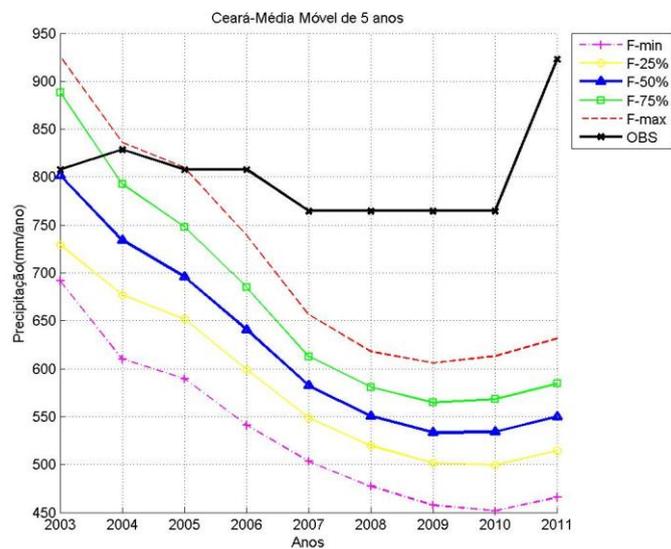
Figura 83. Por essa razão, esse modelo não será utilizado e as demais análises não serão realizadas.

Figura 82 - Calibração do modelo ARsMediana para o período de 1912 a 2002.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 83 - Previsão do modelo ARsMediana para o período de 2003 a 2011.

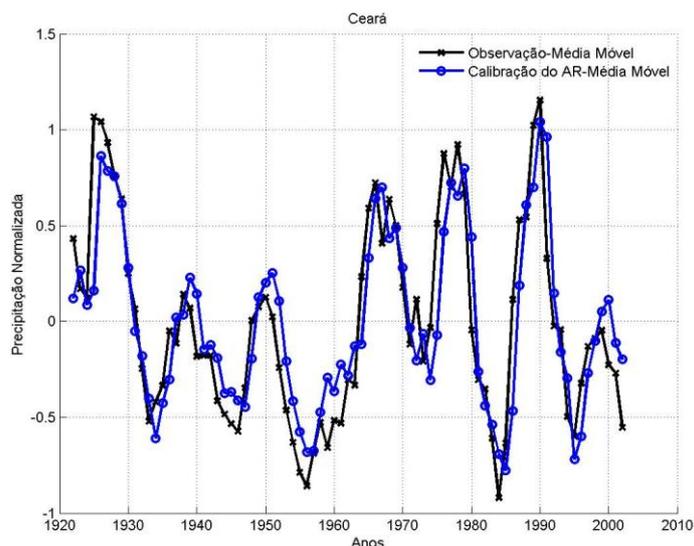


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

11.3. Modelo auto regressivo da média móvel de 5 anos (AR_{Média})

Na Figura 84 é mostrada a série observada de precipitação e a calibração do modelo AR_{Média} para o período 1912 a 2002. Assim como o modelo AR_{Mediana}, este representa os padrões de variação interanual.

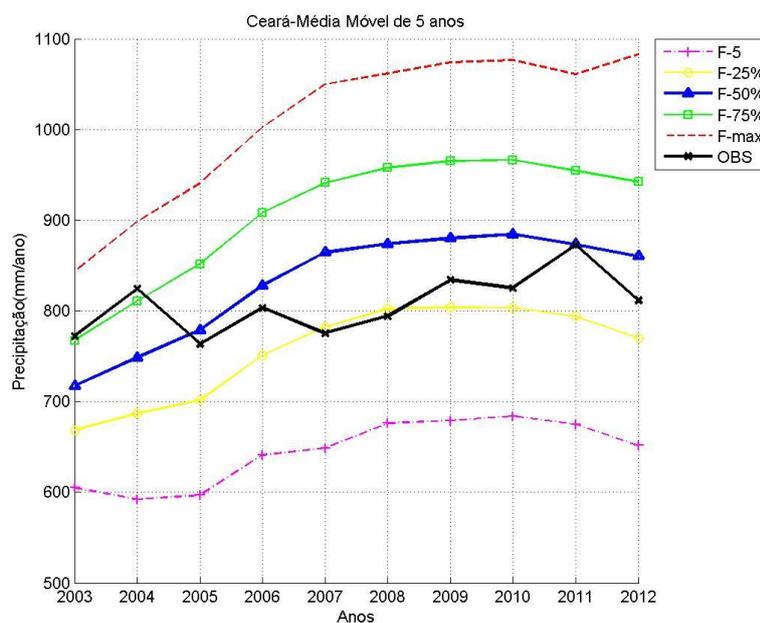
Figura 84 - Calibração do modelo AR_{Média} para o período de 1912 a 2002.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 85 é mostrado a projeção do modelo AR_{Média} para período de 2003 a 2012 em comparação a média móvel observada de 5 anos. O ruído da previsão cresce com horizonte da previsão, o que parece consistente com a representação da incerteza associado a processos climáticos. Ao comparar com série histórica do clima no Ceará o modelo, apesar de simples, demonstra ganho em relação à climatologia até oito anos projetados, conforme indica a razão de verossimilhança da Tabela 18.

Figura 85 - Previsão do modelo ARsMédia para o período de 2003 a 2012.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Tabela 18 - Razão entre a verossimilhança observada e modelada (ARsMédia).

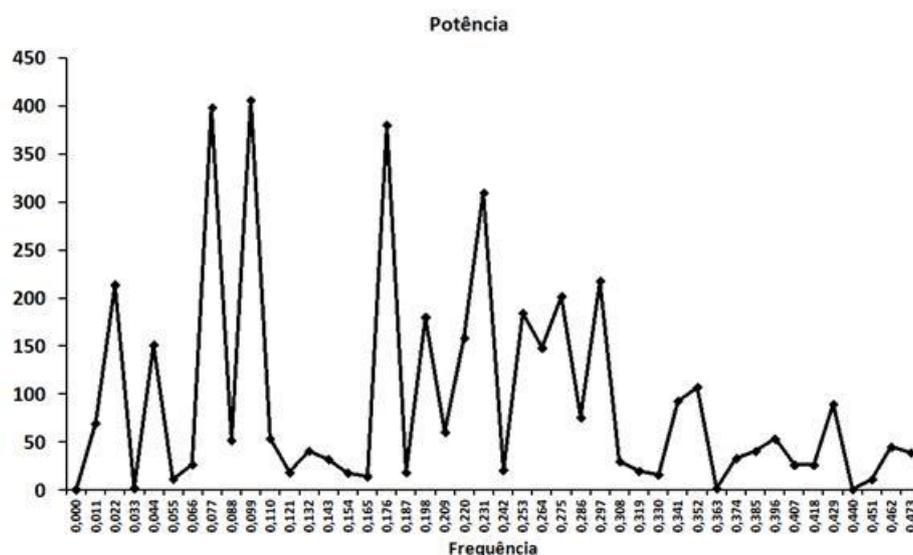
	L
3 anos	1,0246
4 anos	1,0239
5 anos	1,0195
6 anos	1,0131
7 anos	1,0071
8 anos	1,0006
9 anos	0,9971
10 anos	0,9932

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

11.4. Modelo baseado na transformada de *Fourier* (FA)

Na Figura 86 é mostrado o espectro global de potência da série observada de precipitação anual usando a transformada de *Fourier* em função da frequência. O espectro mostra oscilações em diversas escalas de frequência, porém há quatro harmônicos que apresentam maior potência, dois deles na escala de baixa frequência ($0,0989$ e $0,0769 \text{ anos}^{-1}$) e dois na escala de média a baixa frequência ($0,1758$ e $0,2308 \text{ anos}^{-1}$). Esses harmônicos foram utilizados para a geração do modelo, os mesmos são mostrados na Tabela 19, juntamente com os seus respectivos coeficientes da série de *Fourier*.

Figura 86 - Espectro de potência da precipitação anual padronizada para o estado do Ceará usando transformada de Fourier.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

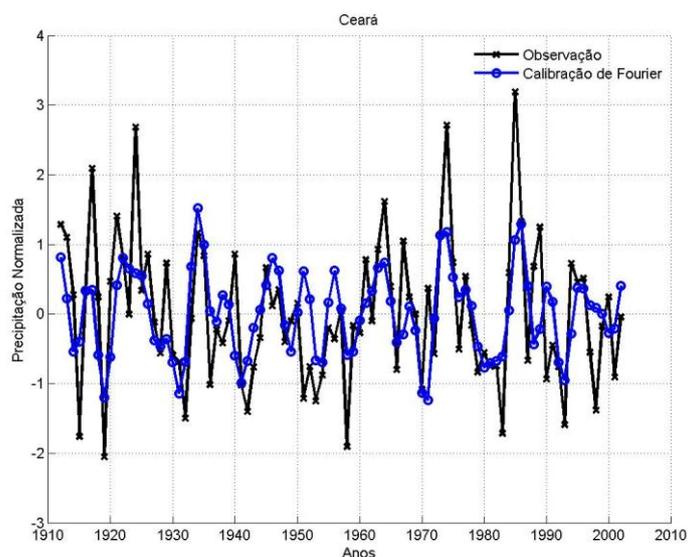
Tabela 19 - Coeficientes de Fourier para os harmônicos selecionados para construção do modelo baseado em Fourier.

A	B	Frequência do Harmônico
0,0159	0,4424	0,0989
0,1770	-0,4013	0,0769
0,2277	-0,3630	0,1758
0,3520	0,1605	0,2308

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 87 é mostrada a série observada de precipitação e a série de *Fourier* com os quatro principais harmônicos para o período de calibração (1912 a 2002). O modelo consegue capturar a variabilidade da precipitação no Estado do Ceará, porém subestima alguns dos principais máximos de precipitação em mais de um desvio padrão.

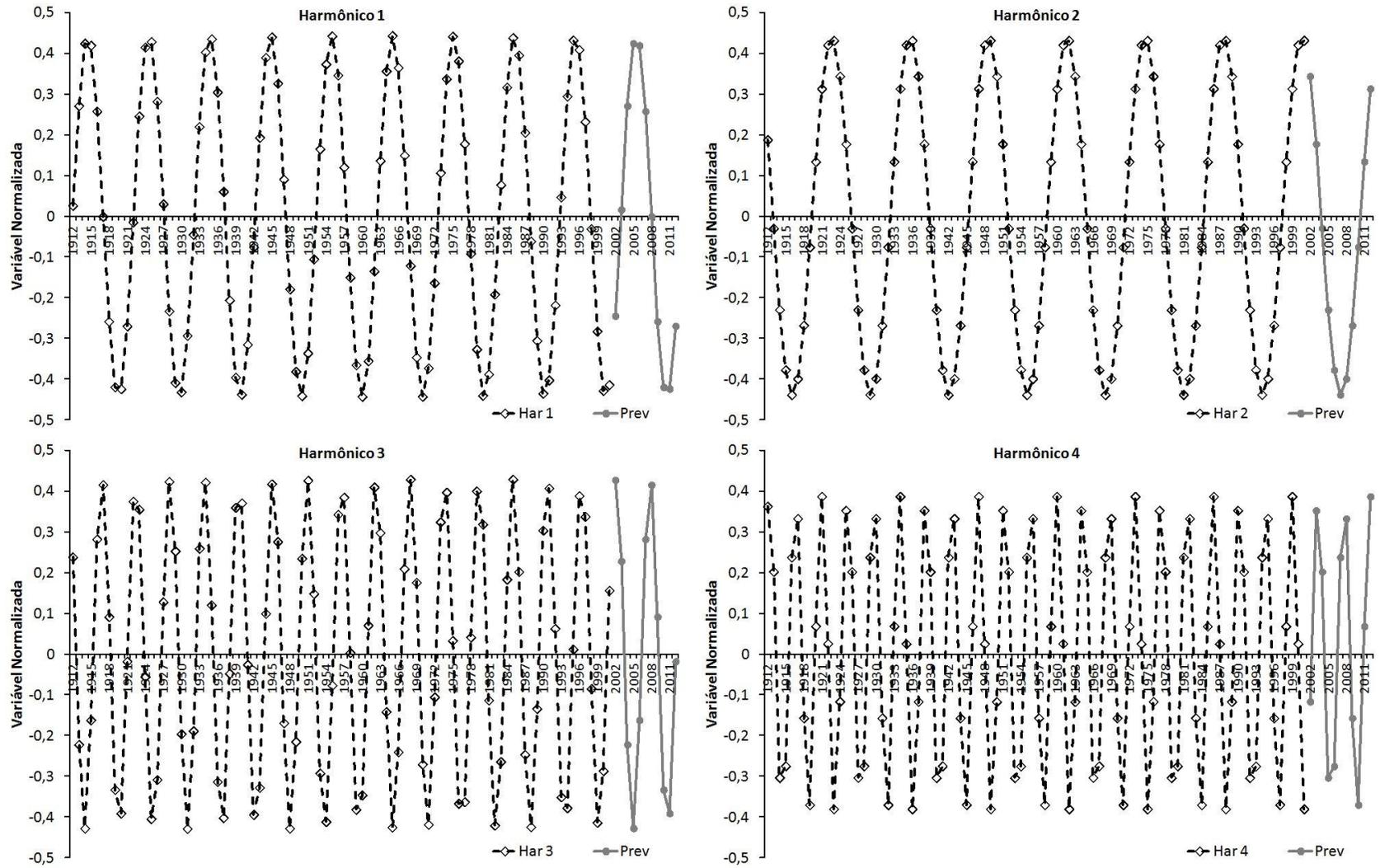
Figura 87 - Calibração do modelo FA para o período de 1912 a 2002.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

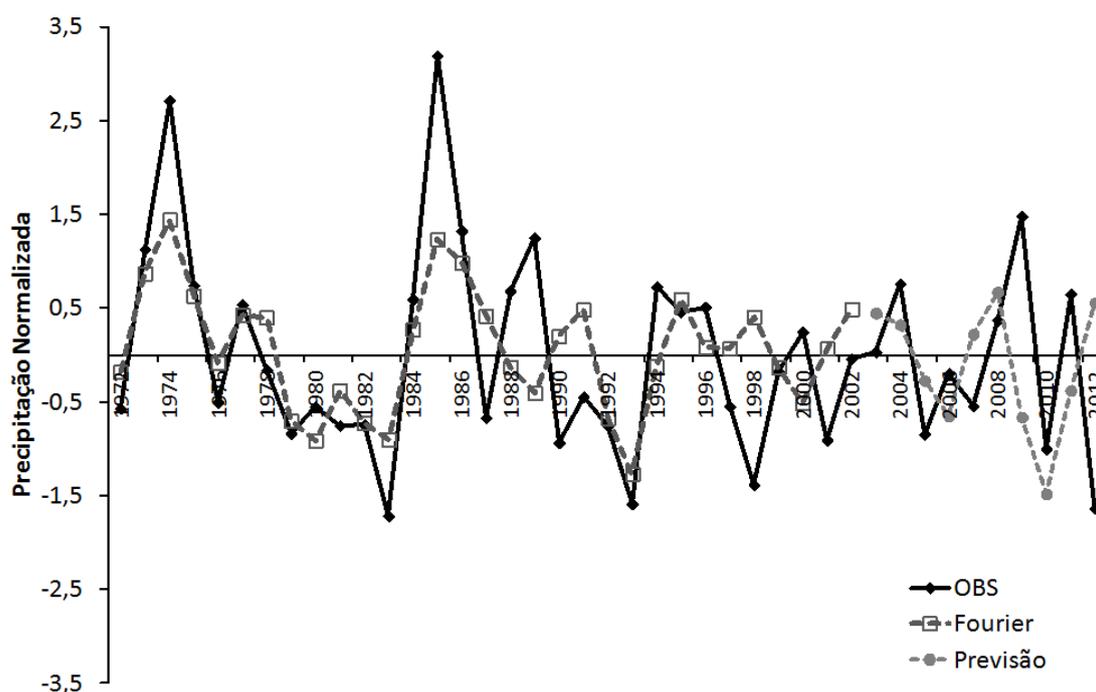
Na Figura 88 são mostrados os harmônicos utilizados para a construção do modelo baseado na série de Fourier e suas respectivas projeções. O harmônico 1 (de maior potência) possui período de aproximadamente 10,33 anos, enquanto o harmônico 2 possui período em torno 13 anos, ambos apresentaram inversões de fase ao longo do período previsto. Enquanto na Figura 89 é mostrada a composição da projeção com base nos harmônicos selecionados, o modelo consegue capturar a fase do período previsto, com patamares semelhantes aos valores de precipitação observada.

Figura 88 - Harmônicos utilizados para a construção do modelo baseado na série de Fourier e suas respectivas projeções.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

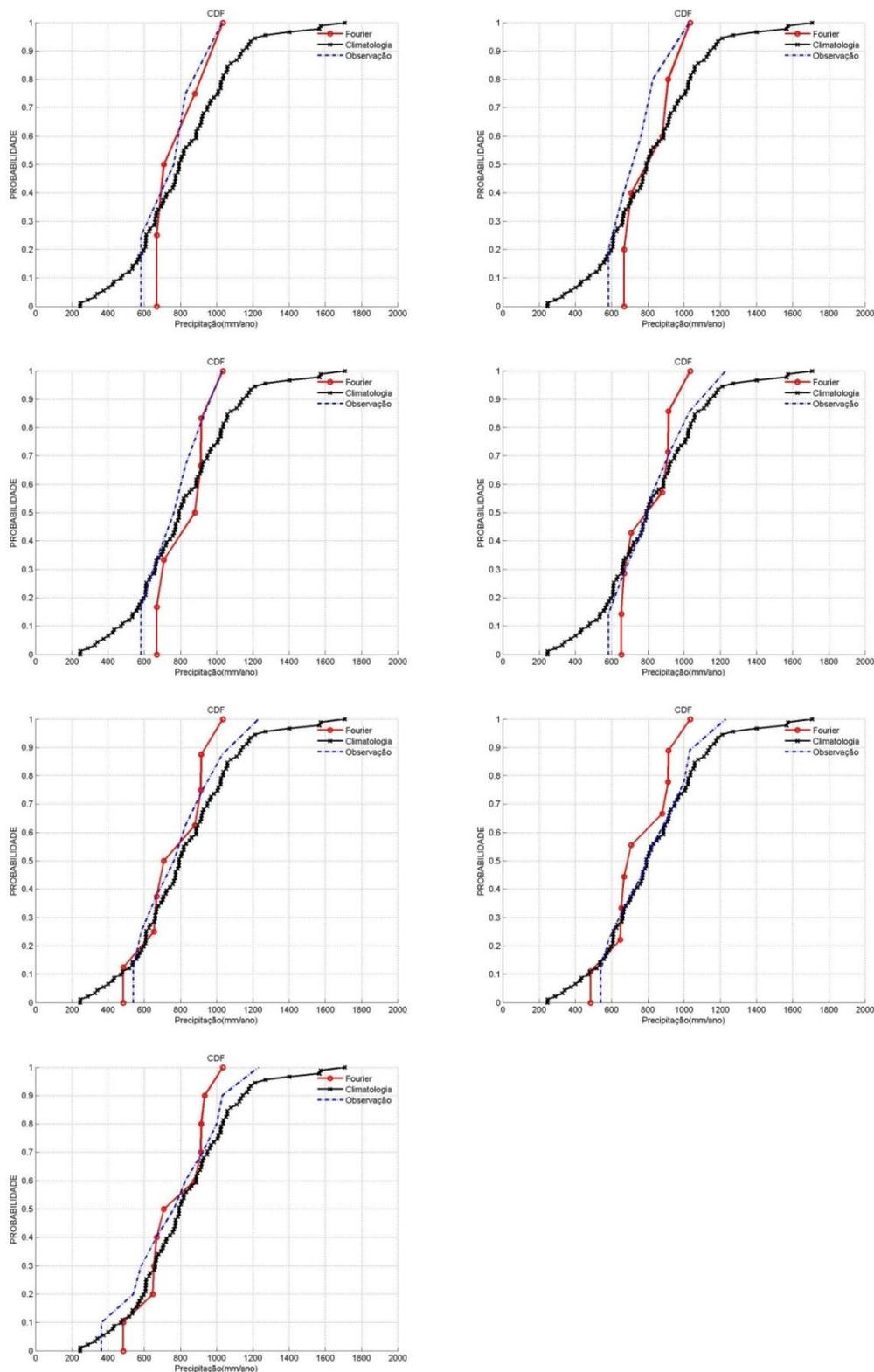
Figura 89 - Previsão composta pelos quatro harmônicos selecionados.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 90 são mostradas comparações entre as funções de distribuição de probabilidade acumulada (CDF) previstas pelo modelo baseado na série de *Fourier* (FA), a climatologia e a observação para diferentes horizontes de previsão. Em todos os horizontes mostrados há uma clara redução da variância em relação à climatologia, para os horizontes de 4, 5 e 6 anos o modelo apresenta-se muito próximo a CDF observada, indicando que essa informação pode ser utilizada no planejamento de médio prazo. Nos demais horizontes analisados o modelo subestima os eventos de precipitação mais elevadas, principalmente para os horizontes de 9 e 10 anos.

Figura 90 - Comparação entre as funções de distribuição de probabilidade acumulada previstas pelo modelo FA, a climatologia e a observação para diferentes horizontes de previsão. Da esquerda para a direita e de cima para baixo os seguintes horizontes de previsões

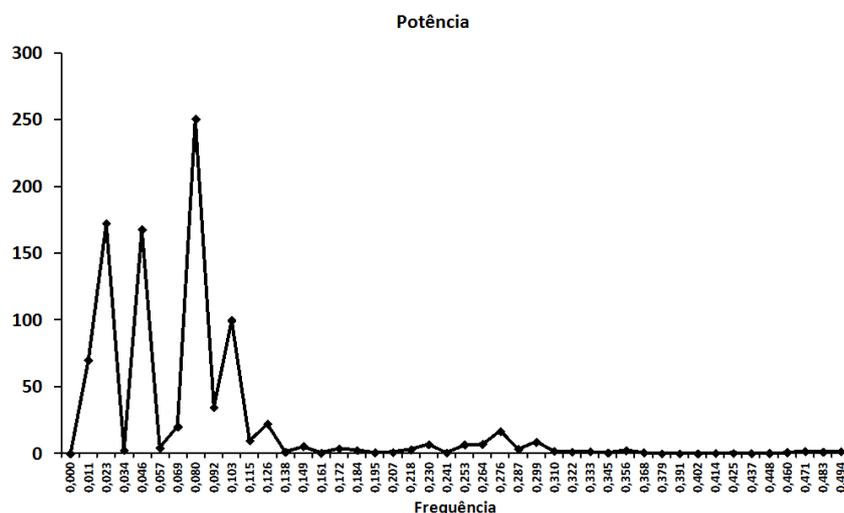


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

11.5. Modelo baseado na série de Fourier das médias móveis (FMédia)

Na Figura 91 é mostrado o espectro global de potência da série observada da média móvel de 5 anos da precipitação anual usando a transformada de *Fourier* em função da frequência. O espectro destaca quatro harmônicos que apresentam maior potência, esses harmônicos foram utilizados para a geração do modelo.

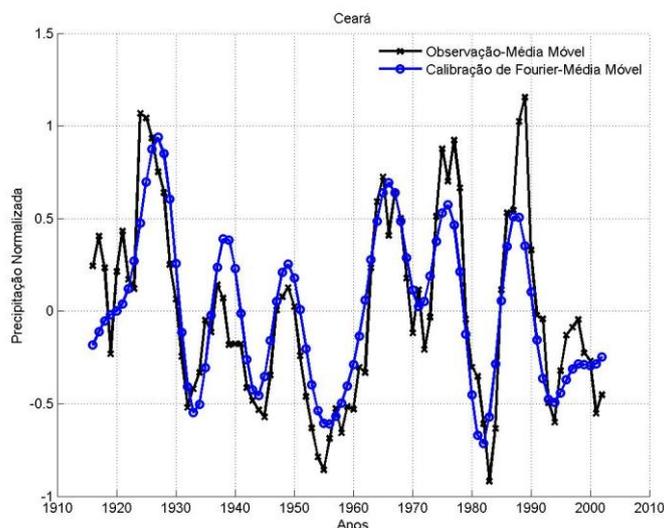
Figura 91 - Espectro de potência da média móvel da precipitação de 5 anos da precipitação anual para o estado do Ceara usando transformada de Fourier.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 92 é mostrada a série observada da média móvel de 5 anos da precipitação e a série de Fourier da média móvel de 5 anos dos quatro principais harmônicos para o período de calibração (1912 a 2002). O modelo consegue capturar a variabilidade da precipitação no Estado do Ceará, apesar de subestimar o pico da média móvel entre 1997 e 2002.

Figura 92 - Calibração do modelo FMédia para o período de 2003 a 2012.

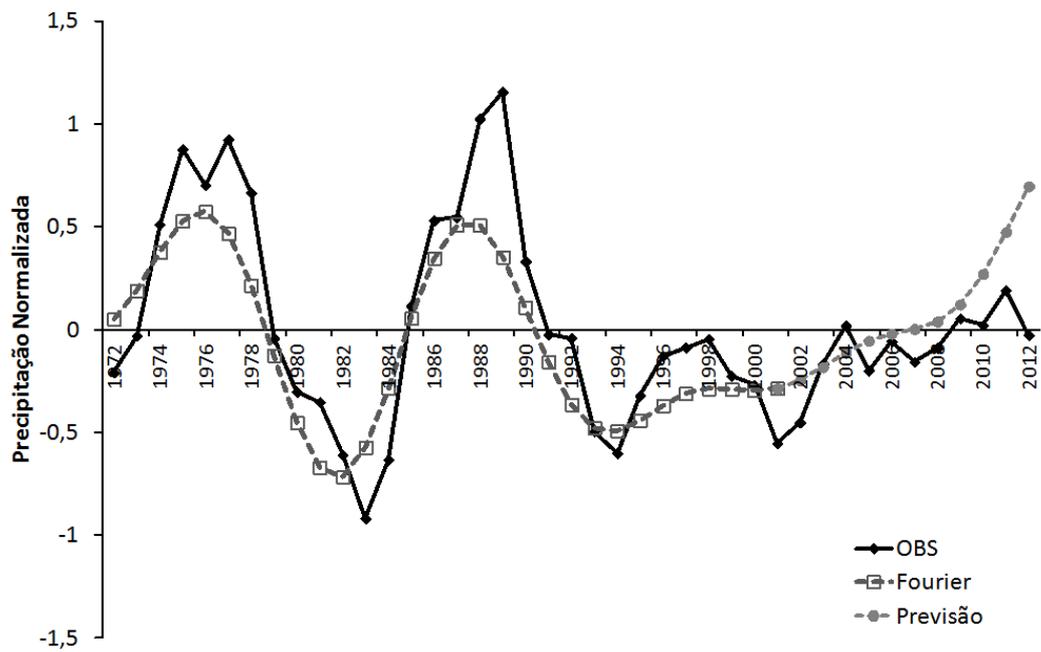


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 94 são mostrados os harmônicos utilizados para a construção do modelo baseado na reconstrução da média móvel de 5 anos usando série de *Fourier*, e suas respectivas projeções. Os harmônicos 2 e 3 são de baixa frequência, enquanto os harmônicos 1 e 4 são de média frequência.

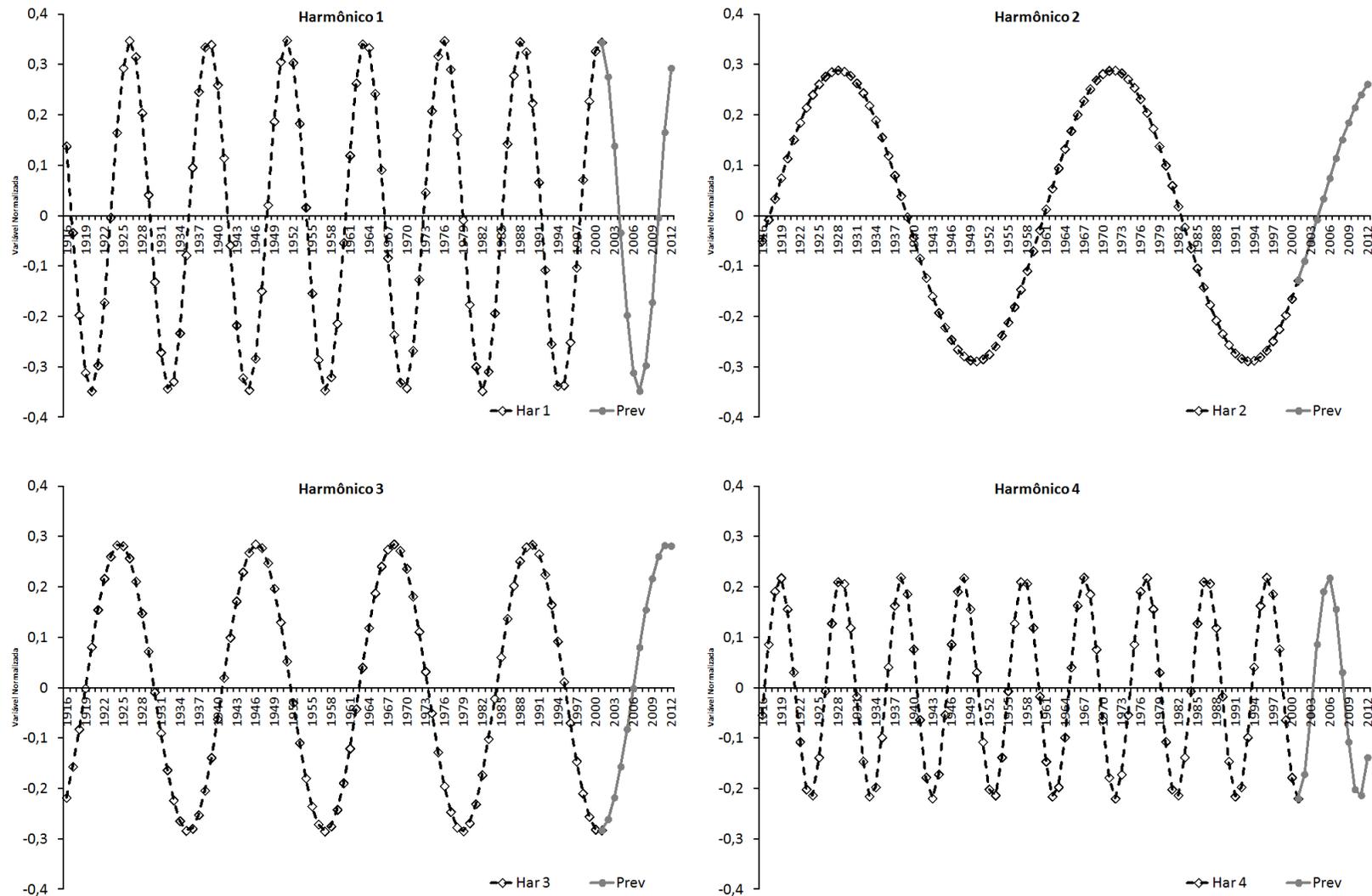
Na Figura 93 é mostrada a composição da projeção com base nos harmônicos selecionados, o modelo apresenta patamares semelhantes aos valores da média móvel da precipitação observada, porém diverge nos últimos anos ao sugerir que a precipitação deve tender a valores acima da média histórica. Esse comportamento fica evidente na Figura 95, onde são mostradas comparações entre as funções de distribuição de probabilidade acumulada (CDF) previstas pelo modelo FMédia, a climatologia e a observação para diferentes horizontes de previsão. Em todos os horizontes mostrados há uma clara redução da variância em relação à climatologia, para os horizontes de 4, 5 e 6 anos o modelo apresenta-se muito próximo a CDF observada, indicando que essa informação pode ser utilizada no planejamento de médio prazo. Nos demais horizontes analisados o modelo subestima os eventos de precipitação mais elevadas e superestima os de menor intensidade, principalmente para os horizontes de 9 e 10 anos.

Figura 93 - Previsão composta pelos quatro harmônicos selecionados.



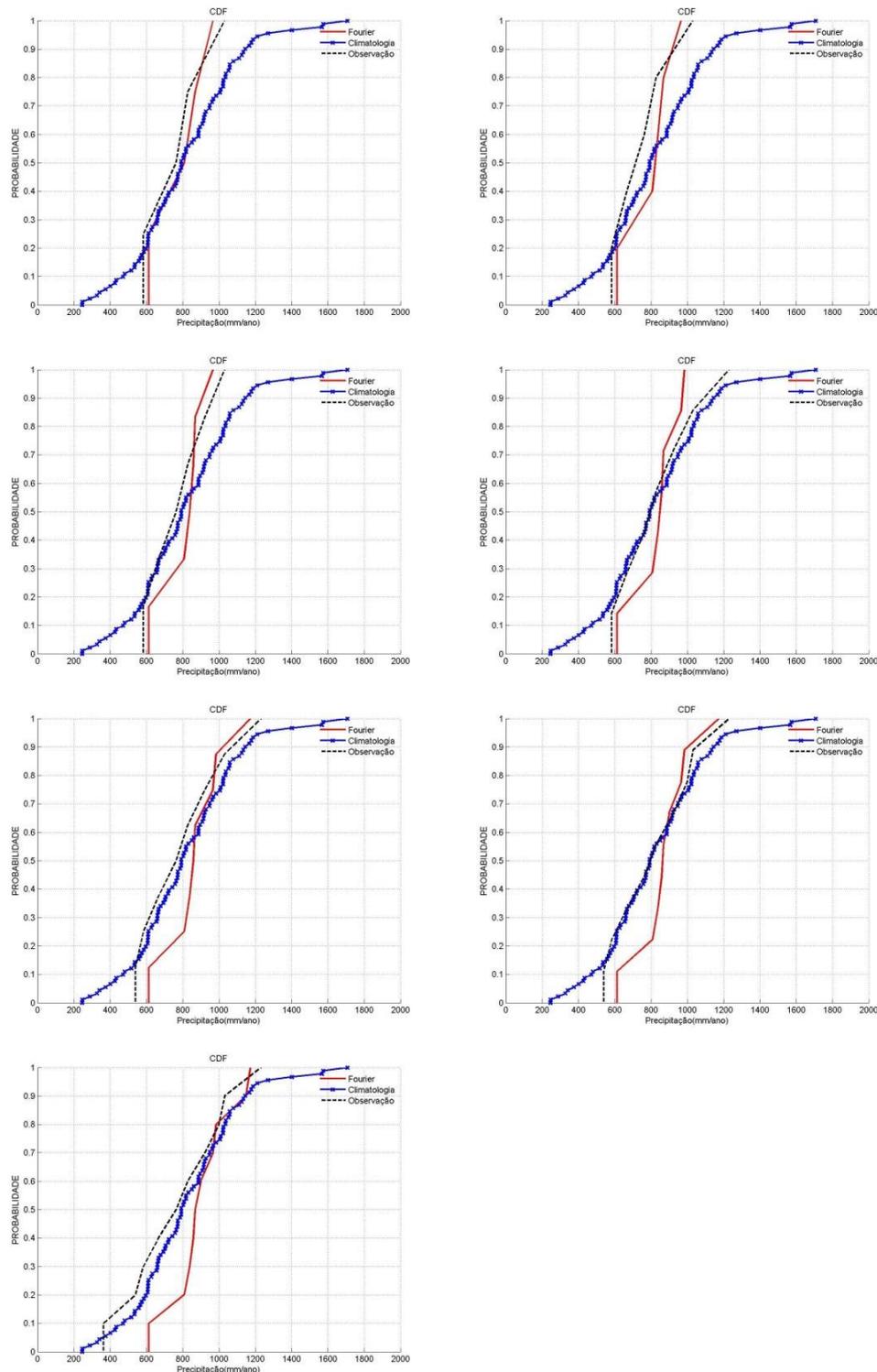
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 94 - Harmônicos utilizados para a construção do modelo baseado na série de Fourier e suas respectivas projeções.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 95 - Comparação entre as funções de distribuição de probabilidade acumulada previstas pelo modelo FMédia, a climatologia e a observação para diferentes horizontes de previsão. Da esquerda para a direita e de cima para baixo os seguintes horizontes de previsões: 4 anos, 5 anos, 6 anos, 7 anos, 8 anos, 9 anos e 10 anos.

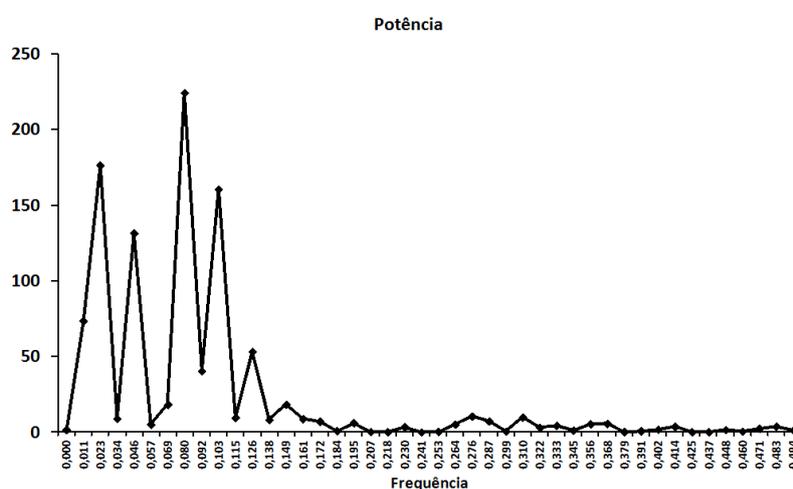


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

11.6. FMediana

Na Figura 96 é mostrado o espectro global de potência da série observada da mediana móvel de 5 anos da precipitação anual usando a transformada de *Fourier* em função da frequência. O espectro destaca quatro harmônicos que apresentam maior potência, esses harmônicos foram utilizados para a geração do modelo. A calibração mostrada na Figura 97, indica uma boa aderência do modelo a série observada, exceto no início da série temporal.

Figura 96 - Espectro de potência da média móvel da precipitação de 5 anos da precipitação anual para o estado do Ceara usando transformada de Fourier.

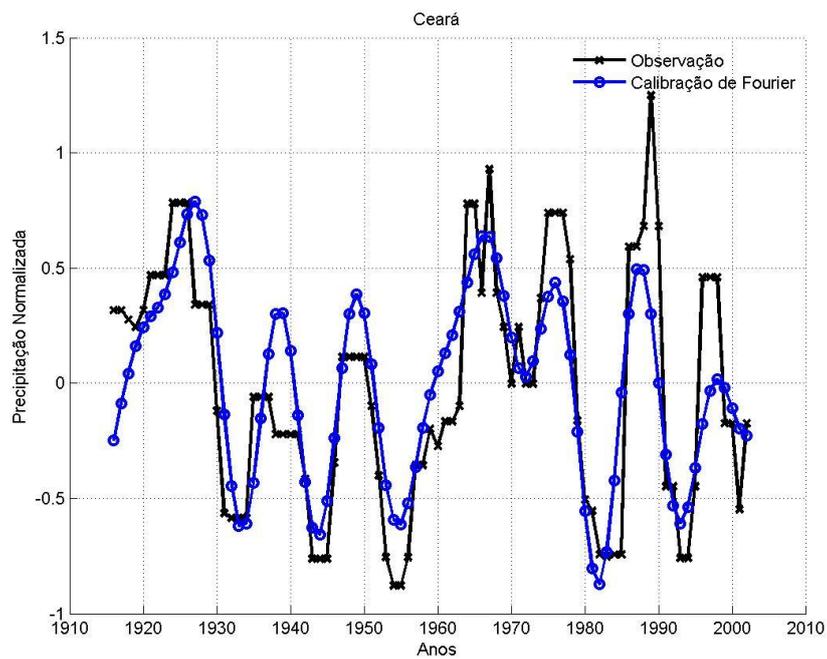


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 99 são mostrados os harmônicos utilizados para a construção do modelo baseado na reconstrução da mediana móvel de 5 anos usando série de *Fourier*, e suas respectivas projeções. Os harmônicos 2 e 4 são de baixa frequência, enquanto os harmônicos 1 e 3 são de média frequência.

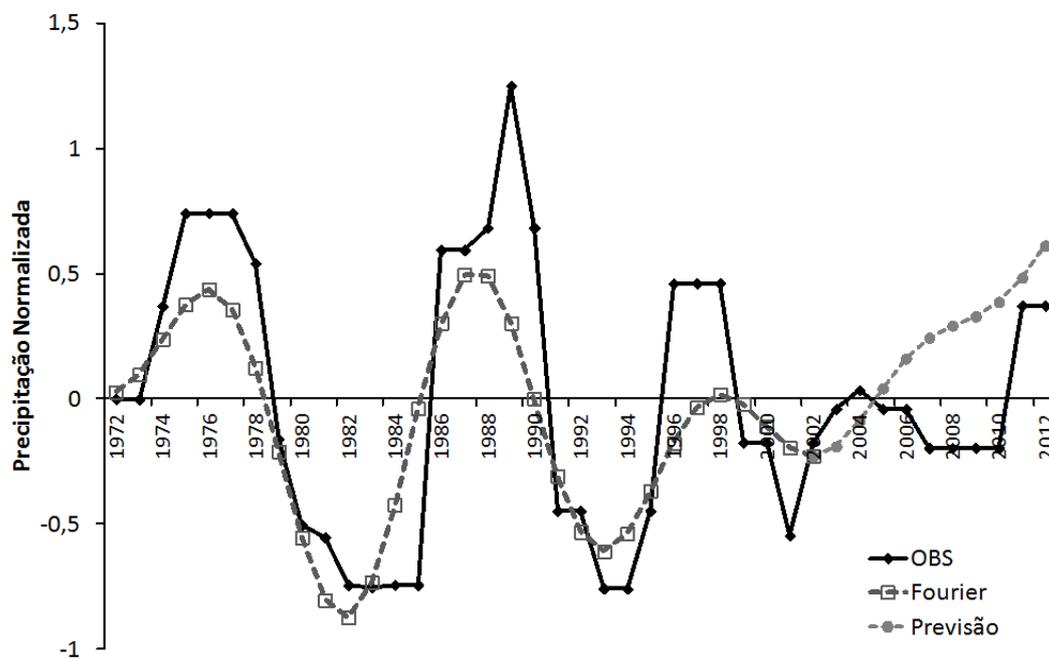
Na Figura 98 é mostrada a composição da projeção com base nos harmônicos selecionados, o modelo apresenta patamares semelhantes aos valores da mediana móvel da precipitação observada, porém diverge nos últimos anos ao sugerir que a precipitação deve tender a valores acima da média histórica.

Figura 97 - Calibração do modelo FMédia para o período de 1912 a 2002.



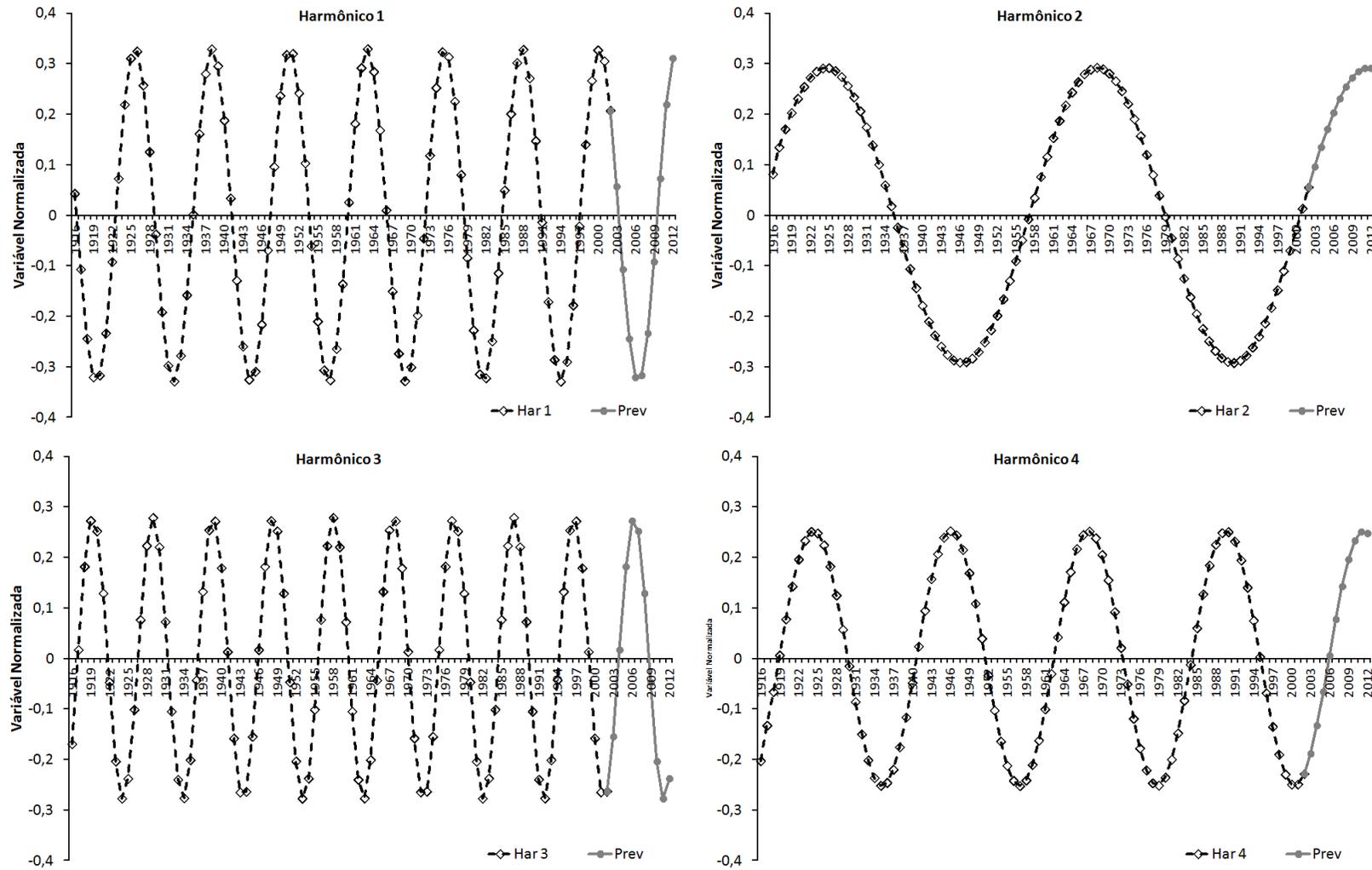
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 98 - Previsão composta pelos quatro harmônicos selecionados.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 99 - Harmônicos utilizados para a construção do modelo baseado na série de Fourier e suas respectivas projeções.



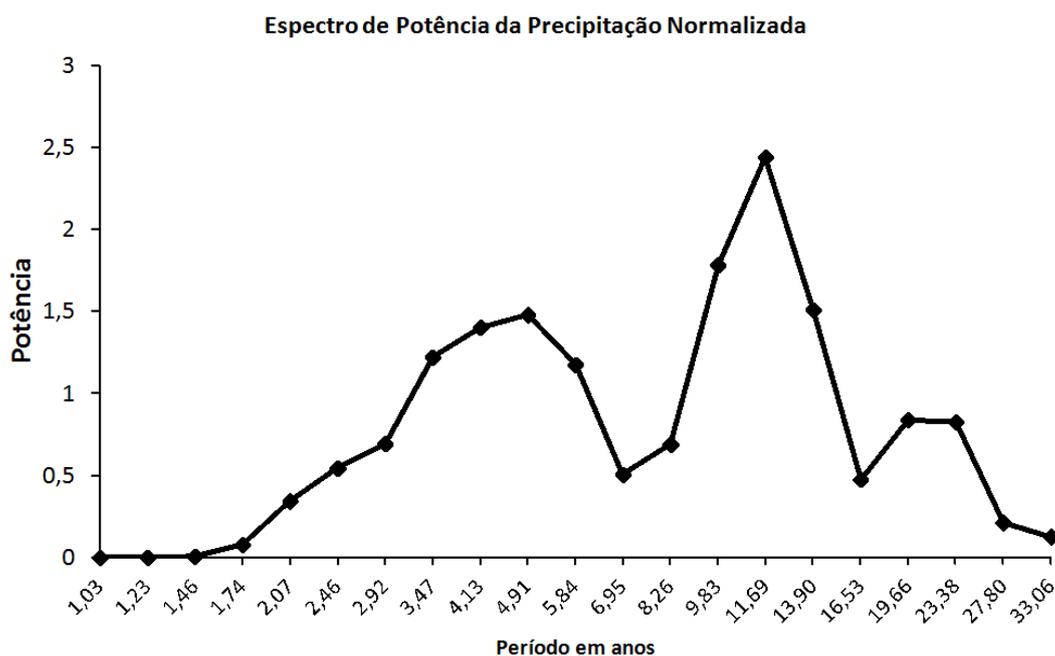
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

11.7. Modelo auto regressivo baseado na transformada de ondeletas (WARs)

Na Figura 100 o espectro global da série de dados observados de precipitação pluviométrica sobre o estado do Ceará mostra bandas na escala interanual (3,5 e 4,9 anos) e picos para as escalas decadal (9,8 e 11,7), e mostra que ao longo de 1912 a 2002 há três bandas características de 2 a 7 anos(banda 1) , 8,2 a 16,6 anos (banda 2) e 17-27,8 anos(banda 3) mais resíduo(banda 4) , ou seja, ela apresenta oscilações em várias escalas de tempo.

Na Figura 101 é mostrada a calibração do modelo WARs para as diferentes bandas de variação selecionadas e resíduo. O modelo representa bem todas as bandas com um viés muito próximo de zero em todas elas, porém a alta frequência superestima a maioria dos mínimos e subestima os máximos, indicando grande incerteza e aleatoriedade nessa banda.

Figura 100 - Espectro global de ondeletas para a precipitação no Estado do Ceará.



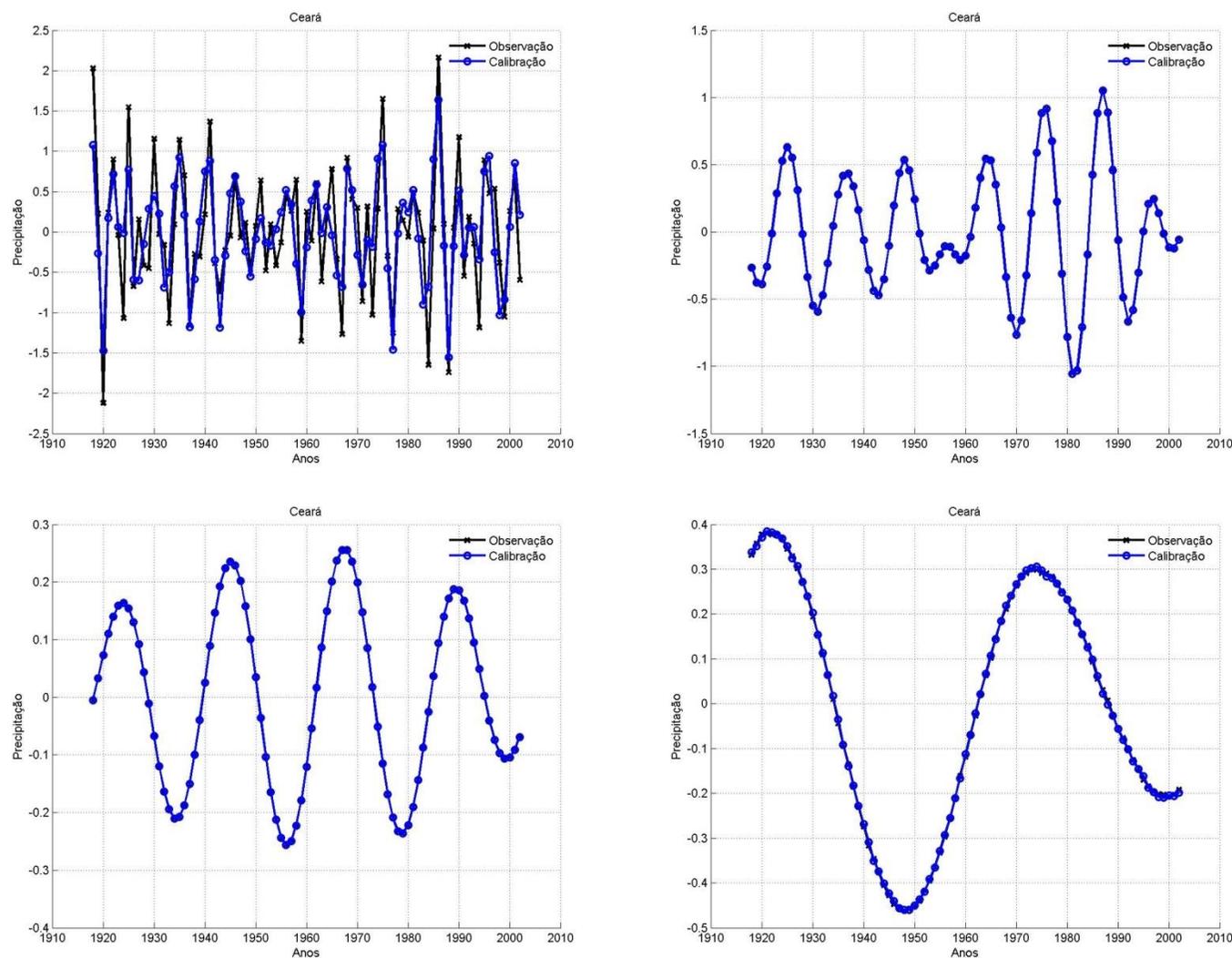
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 102 é mostrada a projeção do modelo WARs para as diferentes bandas de variação selecionadas e resíduo para o período de 2003 a 2012. O ruído da previsão cresce com horizonte da previsão, o que parece consistente com a representação da incerteza associado a processos climáticos. A banda de alta frequência

apresenta ruído de amplitude elevada, de aproximadamente 1,5 desvios padrões, o que caracteriza bastante incerteza nesse padrão de variação. O modelo identifica os padrões das bandas 3 e 4, sinalizando mudanças de fase da banda 3 e transição de fase da banda 4. Porém, sugere um padrão de variabilidade para banda 2 distinto do observado.

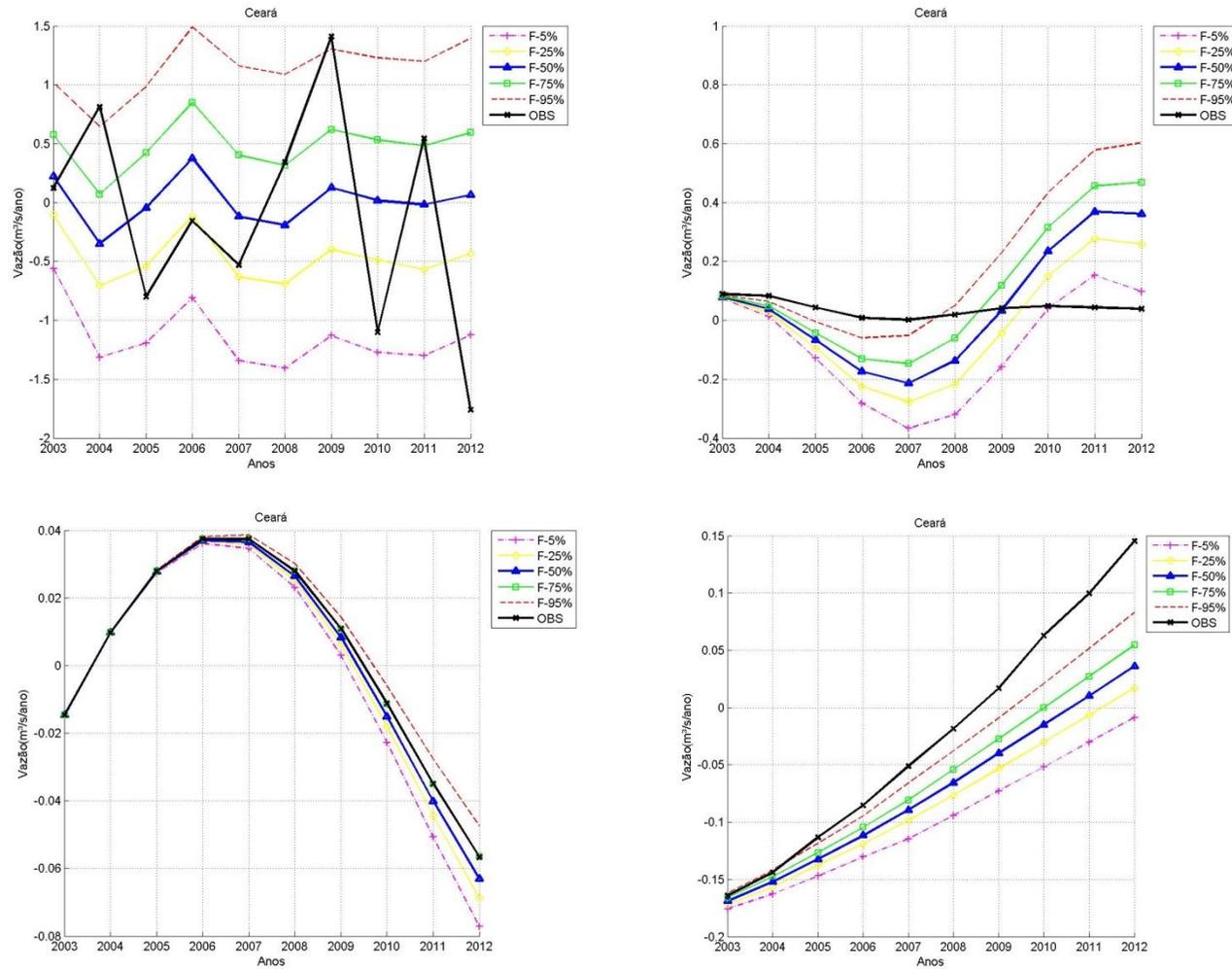
Ao comparar com série histórica do clima no Ceará o modelo demonstra ganho em relação à climatologia em todos os 10 anos previstos, conforme indica a razão de verossimilhança da Tabela 20 e a Figura 103.

Figura 101 - Bandas de variação da transformada em ondas e calibração do modelo WARs. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: banda de 2 a 7 anos, banda de banda 8,2 a 16,6 anos, banda 17 a 27,8 anos e resíduo.



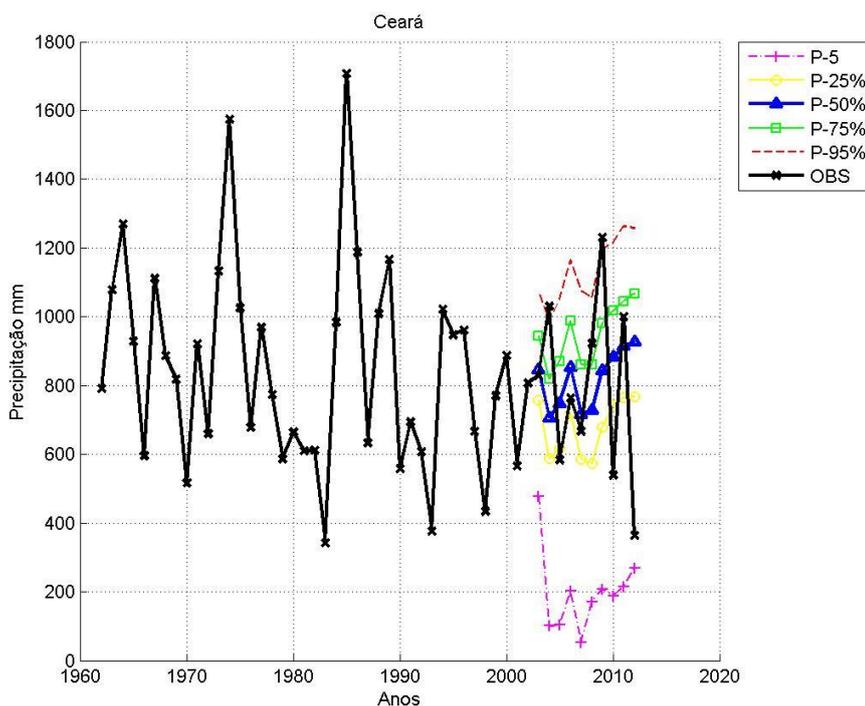
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 102 - Bandas de variação da transformada em ondeletas e projeção do modelo WARs para o período de 2003 a 2012. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: banda de 2 a 7 anos, banda de banda 8,2 a 16,6 anos, banda 17 a 27,8 anos e resíduo.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 103 - Previsão do modelo WARs para o período de 2003 a 2012.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Tabela 20 - Razão entre a verossimilhança observada e modelada (WARs).

	L
3 anos	1,0321
4 anos	1,0292
5 anos	1,0332
6 anos	1,0439
7 anos	1,0525
8 anos	1,0384
9 anos	1,0530
10 anos	1,0054

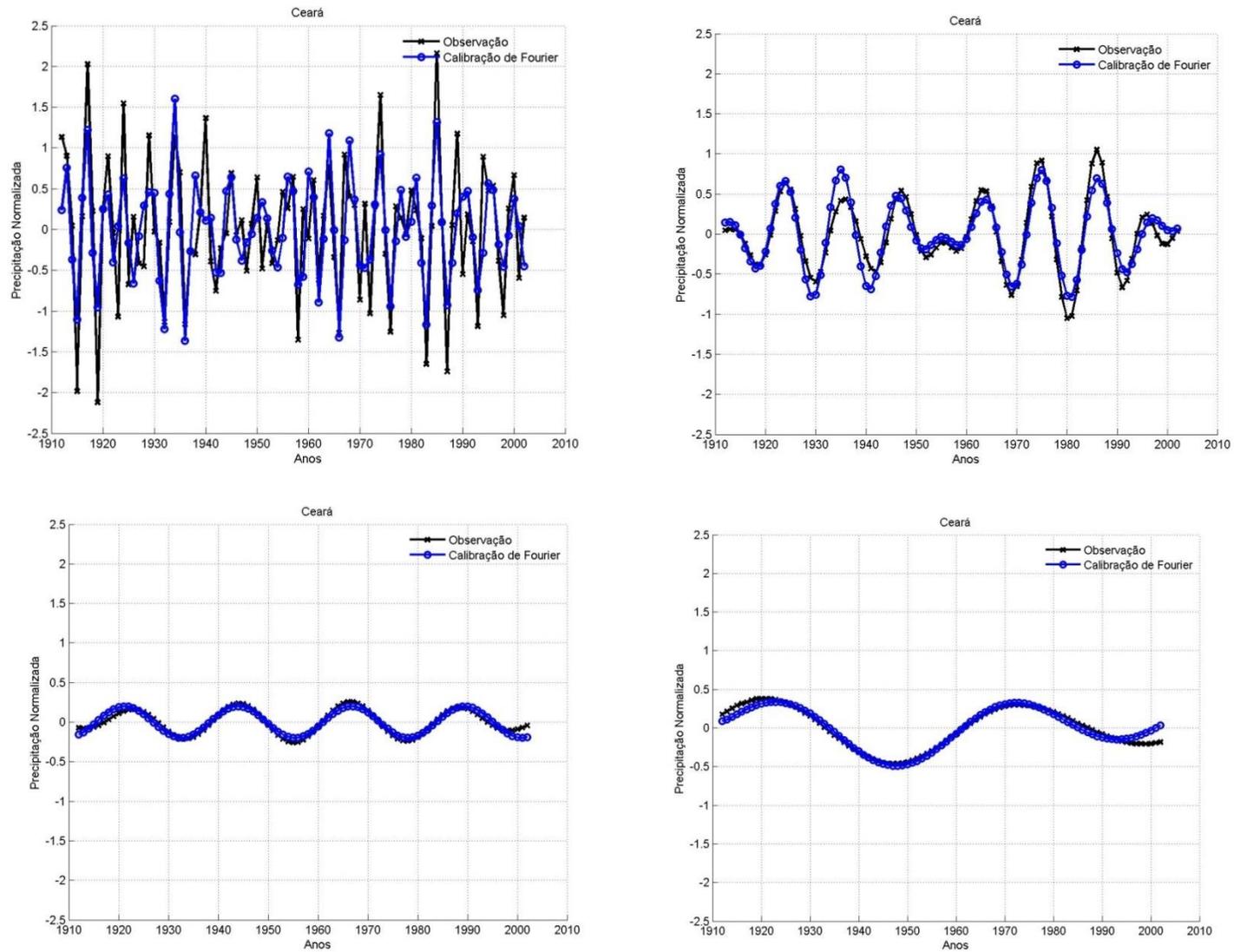
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

11.8. Modelo baseado nas transformadas de Fourier e ondeletas (FW)

Na Figura 104 é mostrada a calibração do modelo FW para as diferentes bandas de variação selecionadas e resíduo para precipitação pluviométrica sobre o Ceará. Foram selecionados 6 harmônicos para primeira banda, 2 para a segunda, 1 para terceira e 2 para quarta banda. O modelo representa os padrões de variação das bandas e

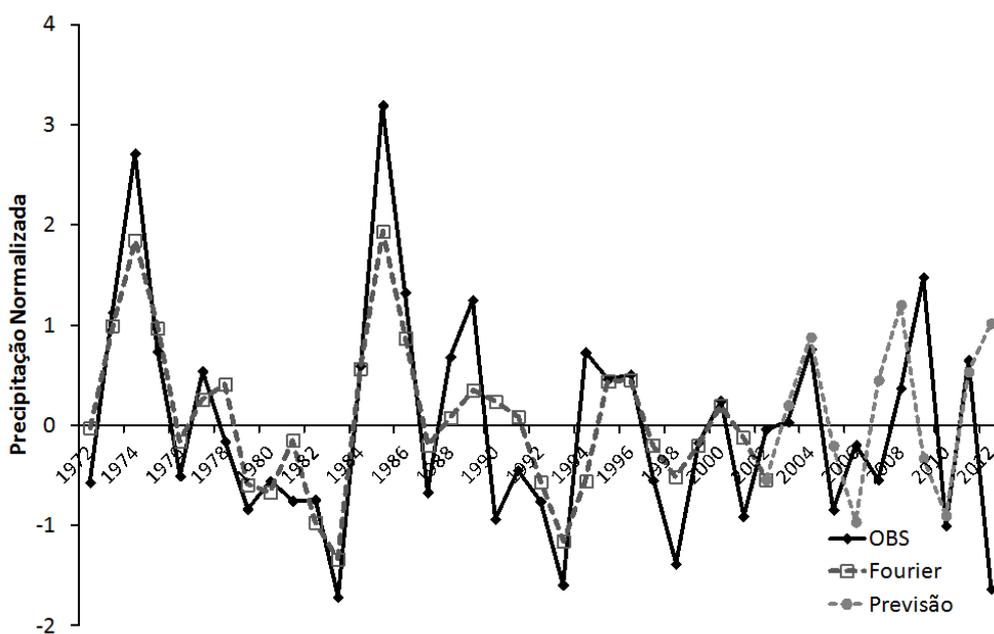
projeção mostrada para período de 2003 a 2012 apresenta patamares semelhantes ao observado, conforme Figura 105.

Figura 104 - Bandas de frequência de ondeletas e a reconstrução segundo os harmônicos de Fourier.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

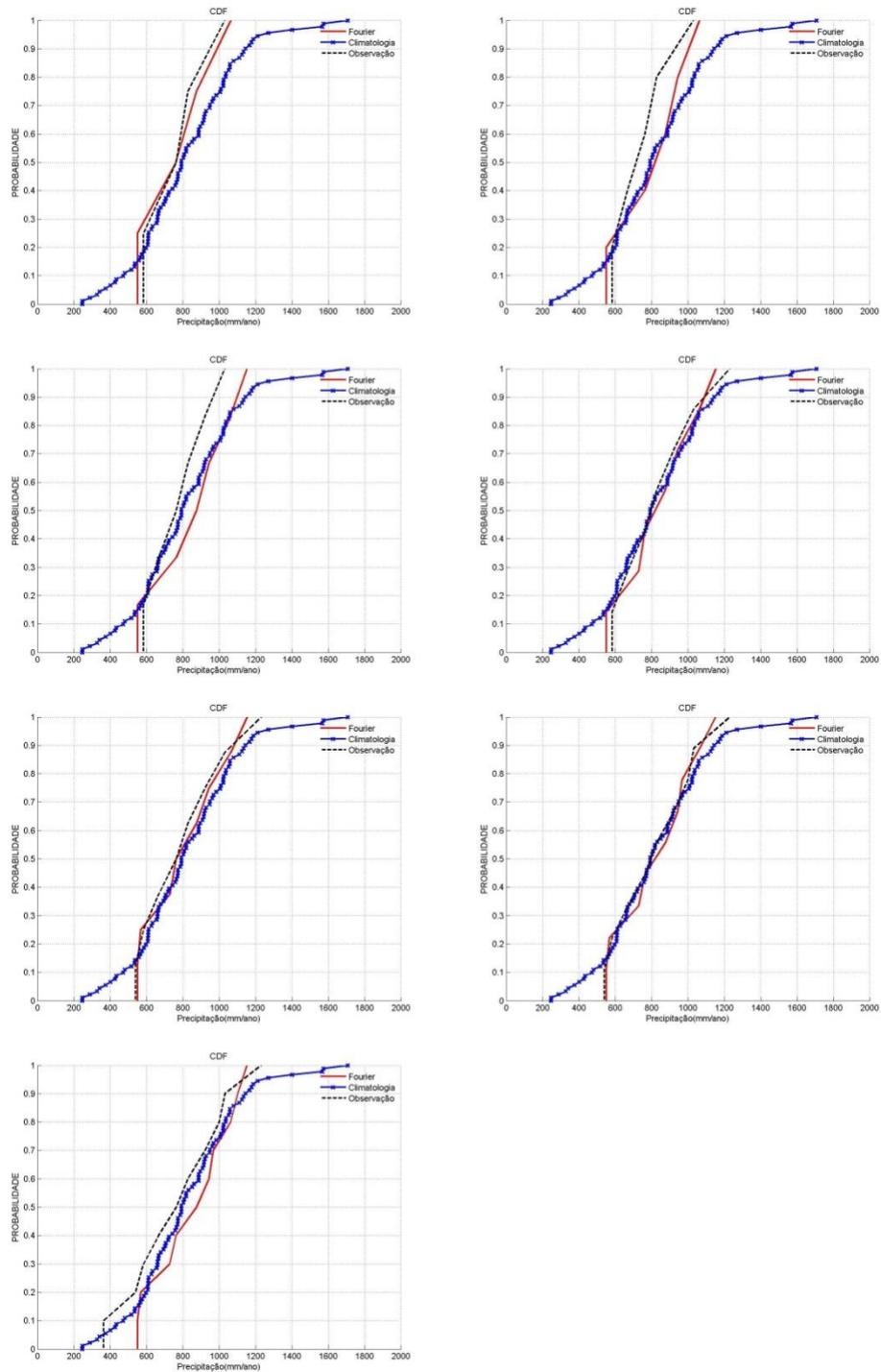
Figura 105 - Previsão composta pelos quatro harmônicos selecionados.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 106 são mostradas comparações entre as funções de distribuição de probabilidade acumulada (CDF) previstas pelo modelo FW, a climatologia e a observação para diferentes horizontes de previsão. Em todos os horizontes mostrados há uma clara redução da variância em relação à climatologia, para os horizontes de até 9 anos o modelo apresenta-se muito próximo a CDF observada, indicando que essa informação pode ser utilizada no planejamento de médio prazo.

Figura 106 - Comparação entre as funções de distribuição de probabilidade acumulada previstas pelo modelo FW, a climatologia e a observação para diferentes horizontes de previsão. Da esquerda para a direita e de cima para baixo os seguintes horizontes de previsões.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

12. METODOLOGIA: ESCALA DE CURTO PRAZO

Neste capítulo são mostradas as metodologias utilizadas para previsão sazonal no setor elétrico e Ceará.

12.1. Métodos Estocásticos de Previsão de Vazões Mensais

Um processo estocástico é totalmente descrito pelo conjunto de todas as séries temporais que o compõe ou pela distribuição de probabilidades conjunta de todas as variáveis aleatórias envolvidas. Na prática hidrológica, só há a disponibilidade de um processo estocástico que corresponde à série histórica observada. Portanto, a modelagem de séries sintéticas tem por objetivo ajustar um modelo pelo qual se acredita que a série histórica tenha sido produzida e a partir dele gerar séries sintéticas diferentes da série observada, mas com a mesma probabilidade de acontecer.

Em geral, os processos de modelagem de vazões mensais apresentam um comportamento periódico descrito pelos ciclos sazonais interanuais. Cada período apresenta um conjunto de características estatísticas próprias descritas pela média, desvio-padrão e estrutura de correlações sazonais. Segundo Maceira *et al.* (2005), a modelagem desse tipo de séries pode ser feita pelo uso de formulações autorregressivas cujos parâmetros apresentam um comportamento periódico. A estas classes de modelos costuma-se denominar modelos Periódicos Autorregressivos (PAR) que é uma generalização dos modelos Autorregressivos (AR) (SALAS, *et al.*, 1997).

A modelagem das vazões afluentes utilizada atualmente pelo ONS no SIN são descritos passo a passo em Maceira *et al.* (2005) e CEPEL (2006), tais modelos PAR(p) é realizado para cada local de forma independente e depois correlaciona-se espacialmente os postos através dos ruídos. A metodologia mencionada será resumida abaixo.

12.1.1 Modelo periódico autorregressivos

Os modelos PAR(p) são referenciados pelo índice “ p ” o denomina a ordem ou termos Autorregressivos do modelo. Em geral, “ p ” é um vetor onde cada elemento fornece a ordem de cada período PAR(p_1, p_2, \dots, p_{12}). A formulação geral para uma variável “ Z ” padronizada pode ser descrita matematicamente da seguinte forma:

$$\frac{(Z_t - \mu_m)}{\sigma_m} = \phi_1^m \left(\frac{(Z_{(t-1)} - \mu_{(m-1)})}{\sigma_{(m-1)}} \right) + \dots + \phi_{p_m}^m \left(\frac{(Z_{(t-p_m)} - \mu_{(m-p_m)})}{\sigma_{(m-p_m)}} \right) + a_t \quad (52)$$

Z_t – uma série sazonal de período “ s ”

s – número de períodos ($s=12$ para séries mensais)

N – número de anos

t – o índice do tempo, $t=1,2,\dots,sN$, função do ano $T(T=1,2,\dots,N)$ e do período

$m(m=1,2,\dots,s)$

μ_m – média sazonal de período “ s ”

σ_m – desvio-padrão sazonal de período “ s ”

ϕ – operador Período Autorregressivo

P_m – ordem do operador Período Autorregressivo “ m ”

a_t – série de ruídos independentes com média zero e variância $\sigma_a^{2(m)}$

O $\rho_{(k)}^m$ é a correlação entre Z_t e $Z_{(t-k)}$, de tal forma que “ t ” correspondam aos períodos $m=1,2,\dots,s$. O conjunto de funções de auto-correlação de $\rho_{(k)}^m$ deste período descrevem a estrutura de dependência temporal da série. Estas funções são dadas por Maceira (1989):

$$\rho_{(k)}^m = E \left[\frac{(Z_t - \mu_m)}{\sigma_m} \times \frac{(Z_{(t-k)} - \mu_{(m-k)})}{\sigma_{(m-k)}} \right] = \phi_1^m E \left[\left(\frac{(Z_{(t-1)} - \mu_{(m-1)})}{\sigma_{(m-1)}} \right) \times \left(\frac{(Z_{(t-k)} - \mu_{(m-k)})}{\sigma_{(m-k)}} \right) \right] + \dots + \phi_{p_m}^m E \left[\left(\frac{(Z_{(t-p_m)} - \mu_{(m-p_m)})}{\sigma_{(m-p_m)}} \right) \times \right. \quad (53)$$

$$\left. \frac{(Z_{(t-k)} - \mu_{(m-k)})}{\sigma_{(m-k)}} \right]$$

Fixando-se “ m ” e variando “ k ” de 1 a “ p_m ” obtêm-se para cada período um sistema matricial chamada de equações de Yule-Walker para um período “ m ” qualquer. Se considerarmos ϕ_{kj} o j -ésimo parâmetro Autorregressivo de um processo de ordem “ k ”, ϕ_{kk} é o último parâmetro deste processo. Assim as equações de Yule-Walker para cada período “ m ” podem ser descrita da seguinte maneira na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} 1 & \rho_{(1)}^{(m-1)} & \rho_{(2)}^{(m-1)} & \dots & \rho_{(p_m-1)}^{(m-1)} \\ \rho_{(1)}^{(m-1)} & 1 & \rho_{(1)}^{(m-2)} & \dots & \rho_{(p_m-2)}^{(m-2)} \\ \rho_{(2)}^{(m-1)} & \rho_{(1)}^{(m-2)} & 1 & \dots & \rho_{(p_m-3)}^{(m-3)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{(k-1)}^{(m-1)} & \rho_{(k-2)}^{(m-2)} & \rho_{(k-3)}^{(m-3)} & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{k1}^m \\ \phi_{k2}^m \\ \phi_{k3}^m \\ \vdots \\ \phi_{kk}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{(1)}^m \\ \rho_{(2)}^m \\ \rho_{(3)}^m \\ \vdots \\ \rho_{(k)}^m \end{bmatrix} \quad (54)$$

O conjunto de valores ϕ_{kk} , $k=1,2,\dots,m$, chamamos de função de autocorrelação parcial do período “ m ”. O conjunto de funções ϕ_{kk} , $m=1,2,\dots,s$, é uma forma de

representar a estrutura de dependência do processo estocástico ao longo do tempo. Em um processo Autorregressivo de ordem “ p_m ”, a função de autocorrelação parcial $\rho_{m_{kk}}$ será diferente de zero para “ k ” menor ou igual a “ p_m ” e zero para “ k ” maior “ p_m ”.

Assim para um $k=0$ e multiplicando a equação (52) por “ a_t ” tem-se:

$$E \left[a_t \left(\frac{(Z_t - \mu_m)}{\sigma_m} \right) \right] = \sigma_a^{2m} \quad (55)$$

Para o ajuste dos modelos o ONS utiliza-se a metodologia proposta por Box e Jenkins, (1970) nesta, a estratégia de seleção do modelo é feita em três etapas: i) Identificação do modelo, escolher por tentativa a ordem do modelo baseando-se em estimativas das funções $\rho_{(k)}^m$ e $\rho_{m_{kk}}$ obtidas a partir da série amostral. ii) Estimação do modelo e seus parâmetros recomendando o método de máxima verossimilhança. No entanto, de acordo com CEPEL (2006) a ONS utiliza o método dos momentos com resultados bastante eficientes. iii) Verificação do modelo, verificar através de testes estatísticos se as hipóteses assumidas durante as etapas anteriores são atendidas.

Muitos pesquisadores assumem que os resíduos “ a_t ” apresentam distribuição Normal e uma possível não-normalidade pode ser corrigida pela transformação do tipo Box-Cox. De acordo com objetivo definido pelo ONS e as características multireservatórios do SIN, o modelo de geração de séries sintéticas é aplicado diretamente à série temporal original, evitando assim o uso de transformações especiais, devendo assim ser capaz de lidar com resíduos que apresentam um forte coeficiente de assimetria.

Neste caso, a solução sugerida por Maceira e Mercio (1997) foi ajustar uma distribuição Lognormal de 3 parâmetros aos resíduos mensais “ a_t ”. Desta forma, a variável ξ_t tem distribuição Normal com média zero e desvio-padrão igual a σ_ξ^{2m} . Utiliza-se $\xi_t = \ln(a_t - \Delta)$, como forma de preservar os momentos dos resíduos define-se: $\sigma_\xi^{2m} = (\ln(\theta))^{\frac{1}{2}}$ e $\Delta = -\sigma_a^m / (\theta - 1)^{\frac{1}{2}}$, logo temos: $\theta = 1 + \sigma_a^{2m} / (-\Delta)^2$. Assim σ_ξ^{2m} pode ser diretamente obtido a partir da resolução de tais equações.

Com objetivo de gerar vazões mensais multivariadas assume-se que os resíduos espacialmente não correlacionados, ξ_t , podem ser transformados em resíduos espacialmente correlacionados, W_t , onde $W_t = D\xi_t$. O “ D ” é uma matriz quadrada de dimensão igual ao número de usinas hidroelétricas, tal matriz pode ser estimada por $DD^T = \hat{U}$, onde \hat{U} pode ser definido como a estimativa da matriz de covariâncias $[E(\xi_t, \xi_t^T)]$.

De acordo com CEPEL (2006), na prática, o comportamento dos resíduos não segue o comportamento das vazões, pois os resíduos não são espacialmente correlacionados. No entanto, a fim de se preservarem as dependências espaciais entre as usinas utilizou-se a correlação espacial entre as vazões em substituição à correlação espacial entre resíduos. A matriz “ D ” pode ser estimada adotando-se esta como uma matriz triangular inferior ou por decomposição espectral.

12.1.2. Uso de Índices Climáticos em Modelos Estatísticos de Previsão de Vazões Mensais - PARX

Modelos estatísticos de previsão de vazão mensal vêm sendo propostos em diversos trabalhos comprovando que o uso de índices climatológicos como variáveis explanatórias em modelos matemáticos possuem grande habilidade em explicar regimes de vazões intranuais. Entre tais estudos destacamos os realizados por Uvo e Graham (1998), Uvo *et al.* (2000), Souza Filho & Lall (2003, 2004), Da Silva e Molion (2004), Rohn (2003), Piccilli (2007), Rocha *et al.* (2007).

A estratégia de geração do modelo PARx é semelhante ao PAR, no sentido de considerar os meses anteriores como preditores do mês que se deseja prever. Porém, acrescenta variáveis climáticas como possíveis preditoras, semelhante à equação 52. A lista dos 27 índices utilizados nesse estudo pode ser observada na Tabela 21.

Tabela 21-Postos Bases utilizados na análise de previsão de vazões no estudo em desenvolvimento. Os valores entre parênteses representam os indicadores de postos fictícios do ONS.

SIGLA	DESCRIÇÃO
AMO	Oscilação Atlântica Multidecadal
ASBM	Confluência Atlântico Sul das Correntes Brasil-Malvinas – Anomalia TSM
BEST	Série Temporal ENSO Bivariada
CAR	Índice TSM Caribenha
MEI	Índice ENSO Multivariada
NAO	Oscilação Atlântica Norte
Nino₁₊₂	TSM do Extremo Leste do Pacífico Tropical (0-10S, 90W-80W)
Nino₃	TSM LESTE do Pacífico Tropical (5N-5S;150W-90W)
Nino_{3,4}	TSM Centro-Leste do Pacífico Tropical (5N-5S;170W-120W)
Nino₄	TSM Centro do Pacífico Tropical (5N-5S;160E-150W)
NOI	Índice de Oscilação do Norte
NP	Padrão Pacífico Norte - Pressão ao Nível do Mar (30N-65N;160E-140W)
NTA	Índice de Anom. TSM Atlântico Tropical Norte (6N-18N;60W-20W)(6N-10N;20W-10W)
ONI	Índice NINO Oceânico
PDO	Oscilação Decadal do Pacífico – Anomalia TSM Oceano Pacífico Norte
PNA	Índice do Pacífico – America do Norte
PW	Aquecimento do Pacífico 1º EOF da TSM (15S-15N; 60E-170E)
QBO	Oscilação Quasi-Bienal – Ventos Zonais Equatorial (30mb)
SOI	Índice de Oscilação do Sul
TNA	Índice Atlântico Norte Tropical – Anomalia da TSM (5.5N-23.5N;15W-57.5W)
TNI	Índice Trans-NINO
TP	Pacífico Tropical 1º EOF da TSM (20N-20S;120E-60W)
TSA	Índice Atlântico Sul Tropical – Anomalia da TSM (0-20S;10E-30W)
ZW1	ZW1 ventos zonais a 925mb (10S-20S,30W-45W),
ZW2	ZW2 ventos zonais a 925mb (5S-15S,100W-130W)
ZW3	ZW3 ventos zonais a 925mb (15N-5N,150W-180W)
SST1	TSM na região (5S-20S,90W-130W)

Fonte: NOAA, IRI, Alexandre(2012) adaptado de Cataldi (2008)

12.1.3. K-vizinhos

Uma abordagem semiparamétrica para previsão de vazões em vários locais de calibração, em uma rede de rios condicionadas a preditores climáticos, foi desenvolvida por Souza Filho e Lall (2003) para a região Nordeste do Brasil. A estratégia considera previsões estatísticas de vazões anuais ou sazonais em todos os locais e sua desagregação mensal ou de fluxos de resolução superior, usando um K-vizinho mais próximo para reamostragem da aproximação que mantém a consistência de espaço e tempo em diferentes locais e subperíodos.

A metodologia de reamostragem pelo método K-vizinhos mais próximos, pela qual um indivíduo é classificado pela similaridade encontrada com K indivíduos previamente agrupados por coincidência de características, similaridade esta baseada no

cálculo da distância Euclidiana (d_i) entre o valor do vetor dos preditores atuais x^* e o valor dos preditores em sua série histórica x_i , é descrita na seguinte forma:

$$d_i^2 = \sum_{j=1}^p \{(x_j^* - x_{i,j})\gamma_j\}^2 \quad (53)$$

onde x^* é um vetor $1 \times p$, x_i é um vetor $1 \times p$ de preditores durante o ano i -ésimo usado no modelo ajustado e γ , que vem como r que vem como resultado da regressão linear, é um vetor $p \times 1$ dos coeficientes.

Primeiramente, os dados de vazões do Orós foram organizados de maneira que pudessem ser analisados e correlacionados com os preditores climáticos obtidos do site da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), que é a Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos. Para o Ceará foram considerados os preditores selecionados por Ribeiro (2011).

Em seguida é calculado o γ através do uso da regressão *stepwise* com variável padronizada.

$$Z = \sum Pred_i \times \beta_i + \varepsilon \quad (54)$$

onde Z é a variável padronizada $Pred$ são os preditores selecionados, β são os coeficientes calculados de cada preditor e ε é o viés/ruído/resíduo. Na equação 48, tem-se $\beta = \gamma$.

12.2. Método de Previsão Acoplada

Tradicionalmente, os processos superficiais e atmosféricos do ciclo hidrológico são representados e simulados por modelos independentes. Nos últimos anos, estas simulações têm sido acopladas através da concatenação dos modelos hidrológicos e atmosféricos. Este acoplamento pode ser feito de dois modos, unidirecional e bidirecional.

No acoplamento unidirecional o modelo hidrológico recebe as informações meteorológicas das previsões do modelo atmosférico, não ocorrendo interação entre os mesmos. Enquanto no modo bidirecional, existe uma troca de informações entre os modelos, isto geralmente é feito, através de interfaces que utilizam esquemas de transferência solo-vegetação-atmosfera.

A metodologia de previsão de vazão utilizando a previsão de chuva do modelo atmosférico baseia-se na utilização de um modelo hidrológico concentrado que representa os processos de geração de escoamento na bacia a partir da chuva observada e prevista, e de propagação deste escoamento ao longo da rede de drenagem da bacia. Os parâmetros do modelo hidrológico são calibrados utilizando as chuvas observadas nos postos pluviométricos, bem como os valores dos postos fluviométricos intermediários e em afluentes.

Neste trabalho foi usado o método unidirecional, o modelo atmosférico utilizado será o ECHAM 4.5 e o modelo hidrológico será o *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP). Além deste modelo global é utilizado o modelo regional RAMS 4.4 para o Ceará.

O ECHAM 4.5 foi desenvolvido pelo Instituto “*Max Planck de Meteorologia*” (MPI), em Hamburgo, a partir do modelo de predição espectral meteorológicas do “*Centre for Medium Range Weather Forecasts*” (ECMWF). O modelo atmosférico possui 19 níveis verticais com topo definido em 10 hPa. Também contém um conjunto de parametrizações para processos dinâmicos e físicos, incluindo radiação, convecção, difusão vertical e fluxos de superfície. Além disso, possui parâmetros de superfície tais como albedo, rugosidade, tipo de vegetação, índice de área foliar e parâmetros de solo tais como, capacidade de armazenamento de água e condutividade térmica.

O IRI (*International Research Institute for Climate and Society*) disponibiliza em seu site (<http://iri.columbia.edu>) a previsão de variáveis atmosféricas do modelo de circulação global ECHAM 4.5.

12.3. Modelo Estocástico GERVAZP e integração entre modelos hidrológicos e estocásticos

O GERVAZP é um modelo estocástico do tipo auto-regressivo periódico, no qual as vazões geradas são dependentes de vazões passadas e obedecem a um comportamento periódico ao longo do ano (CEPEL, 2002).

O GERVAZP constrói os cenários de afluências para o segundo mês do planejamento. É através destes cenários, que a estocasticidade das vazões é inserida no planejamento do curto prazo por meio do modelo DECOMP.

O GERVAZP constrói os cenários mensais de energia afluyente até cinco anos à frente, que serão utilizados para calcular a Função de Custo Futuro do médio prazo. São geradas 1000 séries sintéticas para cada aproveitamento hidroelétrico, maiores detalhes sobre este modelo podem ser encontrados em CEPEL (2002).

O modelo acoplado é formada pelos condicionantes do modelo atmosférico ECHAM4.5-SMAP, a partir dessa modelagem são gerados 600 cenários de vazões. Porém, para um numero reduzido de bacias, não contemplando todo o setor elétrico.

Com isso surge a necessidade ou dá ampliação de bacias com o modelo SMAP calibrado ou da integração dos resultados do modelo hidrológico com o estocástico.

12.3.1. Estratégia de Pós-Processamento com vistas a Integração da Previsão Estocástica (GERVAZp) e Modelo Acoplado Clima-Hidrologia(ECHAM 4.5-SMAP)

O pós-processamento visa viabilizar a integração dos resultados do modelo acoplado e estocástico GERVAZp, assim como, incorporar a informação climática nos cenários de previsão. Para tanto, foram utilizadas duas estratégias: uma com substituição direta das previsões do modelo estocástico pelo modelo acoplado e outra sem substituição direta, através da reamostragem dos cenários do modelo estocástico.

Os métodos utilizados neste trabalho possuem algumas limitações atuais, tais como: (i) pequena quantidade de locais com informação de previsão climática; (ii) as previsões estão localizadas em uma única região etc. Porém, é necessário destacar que intuito deste trabalho é testar os procedimentos, sendo importante destacar as potencialidades e fragilidades dos métodos para possíveis trabalhos futuros.

Além disso, destaca-se a possibilidade de estudos que mostrem a integração mais íntima entre os modelos, esta estratégia é comentada nas conclusões e recomendações.

12.3.2. Reamostragem do GERVAZp

Uma das maneiras de inserir as condições climáticas no sistema de previsão é a reamostragem dos cenários de vazões do modelo estocástico GERVAZp. Esta reamostragem é condicional ao modelo acoplado, portanto os cenários do modelo estocástico são ponderados em função da proximidade com a previsão do modelo acoplado.

A hipótese é que este método pode melhorar a eficiência do setor elétrico brasileiro através do aprimoramento das previsões e cenarizações de vazões médias e extremas afluentes aos reservatórios do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Para esta reamostragem foram utilizados dois procedimentos: (i) métodos dos vizinhos e (ii) funções de Kernel (HASTIE et al.,2009).

12.3.2.1. Método dos Vizinhos

Este método é uma estratégia que visa calcular a distância entre o conjunto dos cenários gerados pelo GERVAZP e ECHAM-SMAP e em seguida atribuir pesos maiores no conjunto do GERVAZP aqueles mais próximos do conjunto do ECHAM-SMAP.

12.3.2.1.1. Método dos Vizinhos usando a mediana

Nesta metodologia são definidos pesos para os 1000 cenários do modelo estocástico GERVAZP baseado na distância em relação à mediana do modelo acoplado ECHAM-SMAP, conforme equação 55.

$$d^2_i = \left(X_{gervaz_i} - Mediana(X_{smap}) \right)^2 \quad (55)$$

Onde X_{gervaz_i} representa a vazão obtida por cada cenário i do GERVAZP e $Mediana(X_{smap})$ representa a mediana dos membros do modelo ECHAM-SMAP.

Para mais de uma localidade, tem-se:

$$DIST_i = \sum_{k=1}^{k=m} (ENA_k * d^2_{i_k}) \quad (56)$$

Onde k representa as localidades e m representa o total de localidades. Sendo, ENA_k a energia natural afluyente do posto k . Para este experimento serão considerados os postos de Furnas, Canoas I e Capivara.

Os cenários do GEVAZP são reamostrados condicionalmente a distância(D_i) ao valor da vazão do modelo acoplado, sendo o peso de cada cenário dado pela equação 57.

$$peso_i = \frac{\frac{1}{DIST_i^2}}{\sum_{j=1}^{j=n} \left(\frac{1}{DIST_j^2} \right)} \quad (57)$$

Onde n é o número de cenários do GERVAZP.

12.3.2.1.2. Método dos Vizinhos usando todos os membros do conjunto

Nesta metodologia são definidos pesos para os 1000 cenários do modelo estocástico GERVAZP baseado na distância em relação à cada membro do SMAP, conforme equação 58.

$$d^2_{i,j} = \left(X_{gervaz_i} - X_{smap_j} \right)^2 \quad (58)$$

Onde X_{gervaz_i} representa a vazão obtida por cada cenário i do GERVAZP e $Mediana(X_{smap_j})$ representa a vazão obtida por cada cenário j do SMAP.

Para mais de uma localidade, tem-se:

$$DIST_{i,j} = \sum_{k=1}^{k=m} \left(ENA_k * d^2_{i,j_k} \right) \quad (59)$$

Onde k representa as localidades e m representa o total de localidades. Sendo, $ENAK$ a energia natural afluente do posto k . Para este experimento serão considerados os postos de Furnas, Canoas I e Capivara.

Os cenários do GERVAZP são reamostrados condicionalmente a distância ao valor da vazão do modelo acoplado, sendo o peso de cada cenário dado pelas equações 60 e 61.

$$peso_{i,j} = \frac{\frac{1}{DIST_{i,j}^2}}{\sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{1}{DIST_{i,j}^2} \right)} \quad (60)$$

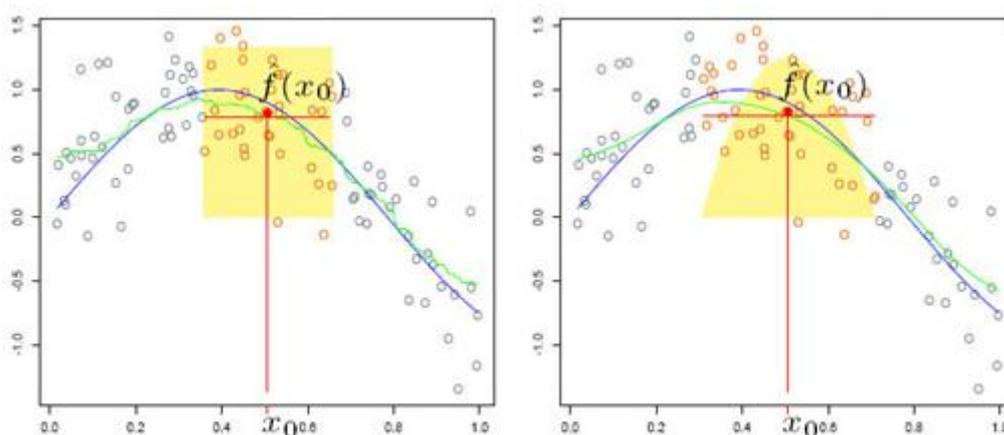
$$peso_{final_i} = \overline{peso_{i,j}} \quad (61)$$

12.3.2.2.. Função Kernel

A função Kernel é uma função de ponderação padronizada, visa estimar uma relação entre duas variáveis. Ela é essencialmente uma regressão local, que utiliza somente os pontos de um dado conjunto localizados perto do ponto de consulta para o cálculo de regressão. Para esse método, o peso do ponto usado na regressão diminui à medida que a sua distância em relação ponto de consulta aos aumenta.

A função de regressão resultante é suave e tem como grande vantagem depender de uma pequena quantidade de parâmetros. A técnica pode ser visualizada na Figura 107.

Figura 107-Exemplo do uso da Função Kernel.



Fonte: Hastie et al.(2009)

Esta estimação baseia-se em um método não paramétrico. Para a estimação de uma densidade *kernel*, além da escolha de um λ , é necessário escolher o K, conforme equação 62.

A escolha de K pode ser baseada na minimização do erro quadrático médio da estimação. As funções *kernel* conhecidas como *Epanechnikov* minimizam o erro quadrático médio entre duas variáveis, sendo conhecidas como funções *kernel* ótimas de segunda ordem. Estas funções possuem a seguinte representação:

$$K_{\lambda} = D\left(\frac{|x-x_0|}{\lambda}\right) \quad (62)$$

Onde x_0 é mediana do SMAP no método 1 e λ é o desvio padrão da série do GERVAZP para o mês em avaliação.

Para o método 2 usando a função Kernel x_0 é igual a cada membro do SMAP.

12.3.2.2.1. *Kernel Epanechnikov*

A função Kernel Epanechnikov é dada pela equação:

$$D(t) = \begin{cases} \frac{3}{4} \cdot (1 - t^2) & \text{se } |t| \leq 1 \\ 0 & \text{se } |t| > 1 \end{cases} \quad (63)$$

Para o método 1 tem-se:

$$DIST_i = \sum_{k=1}^{k=m} (ENA_k * D(t)_{i_k}) \quad (64)$$

Onde k representa as localidades e m representa o total de localidades. Sendo, ENA_k a energia natural afluyente do posto k. Para este experimento serão considerados os postos de Furnas, Canoas I e Capivara.

Para o método 2 :

$$D(t)_i = \frac{D(t)_{i,j}}{\sum_{i=1}^{i=n} (D(t)_{i,j})} \quad (65)$$

Para o método 2 tem-se:

$$DIST_i = \sum_{k=1}^{k=m} (ENA_k * D(t)_{i_k}) \quad (66)$$

12.3.2.2.2. *Função Epanechnikov - Tri-cúbica*

A função Kernel Epanechnikov Tri-cúbica é dada pela equação:

$$D(t) = \begin{cases} (1 - |t|^3)^3 & \text{se } |t| \leq 1 \\ 0 & \text{se } |t| > 1 \end{cases} \quad (67)$$

Para o método 1 tem-se:

$$D_{i,j} = \sum_{k=1}^{k=m} (ENA_k * D(t)_{i,j_k}) \quad (68)$$

Onde k representa as localidades e m representa o total de localidades. Sendo, ENA_k a energia natural afluyente do posto k. Para este experimento serão considerados os postos de Furnas, Canoas I e Capivara.

Para o método 2 :

$$D(t)_i = \frac{D(t)_{i,j}}{\sum_{i=1}^{i=n} (D(t)_{i,j})} \quad (69)$$

Para o método 2 tem-se:

$$DIST_i = \sum_{k=1}^{k=m} (ENA_k * D(t)_{i_k}) \quad (70)$$

12.3.4. Reamostragem dos cenários do GERVAZp pelos cenários do SMAP

Para reamostragem dos cenários do GERVAZP pelos cenários do SMAP é calculada a distância euclidiana entre cada um dos membros dos conjuntos, conforme equações 55 e 56.

Em seguida, são selecionados os três membros do conjunto do GERVAZP que possuem a menor distância $D_{i,j}$ em relação a cada cenário i do SMAP, totalizando 1800 membros por localidade avaliada.

13. RESULTADOS E DISCUSSÕES: ESCALA DE CURTO PRAZO - SIN

Este capítulo apresenta os resultados das técnicas utilizadas para previsão sazonal no setor elétrico, a princípio apresenta-se o modelo global ECHAM 4.5, em seguida as técnicas de integração e depois os modelos PAR e PARx.

13.1. Avaliação do modelo ECHAM 4.5 para precipitação

Na Figura 108 é mostrada a correlação entre a precipitação acumulada mensal dos membros do ECHAM 4.5 em relação a precipitação mensal do CRU para o trimestre DJF no período de 1950 a 1999. A maioria dos membros praticamente não apresenta correlação significativa na região centro-oeste e sudeste do Brasil.

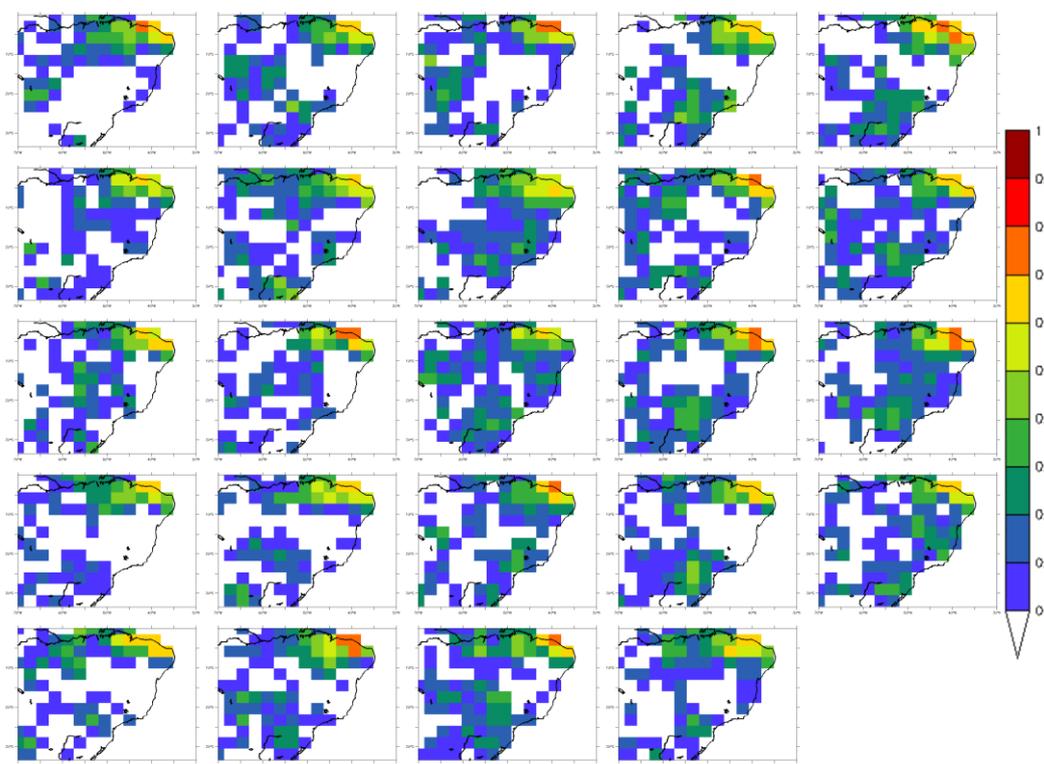
Figura 108-CORREL espacial dos membros do modelo ECHAM em comparação ao CRU para o trimestre DJF. Membros do 11 ao 34 na sequência numérica da esquerda para direita e de cima para baixo.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

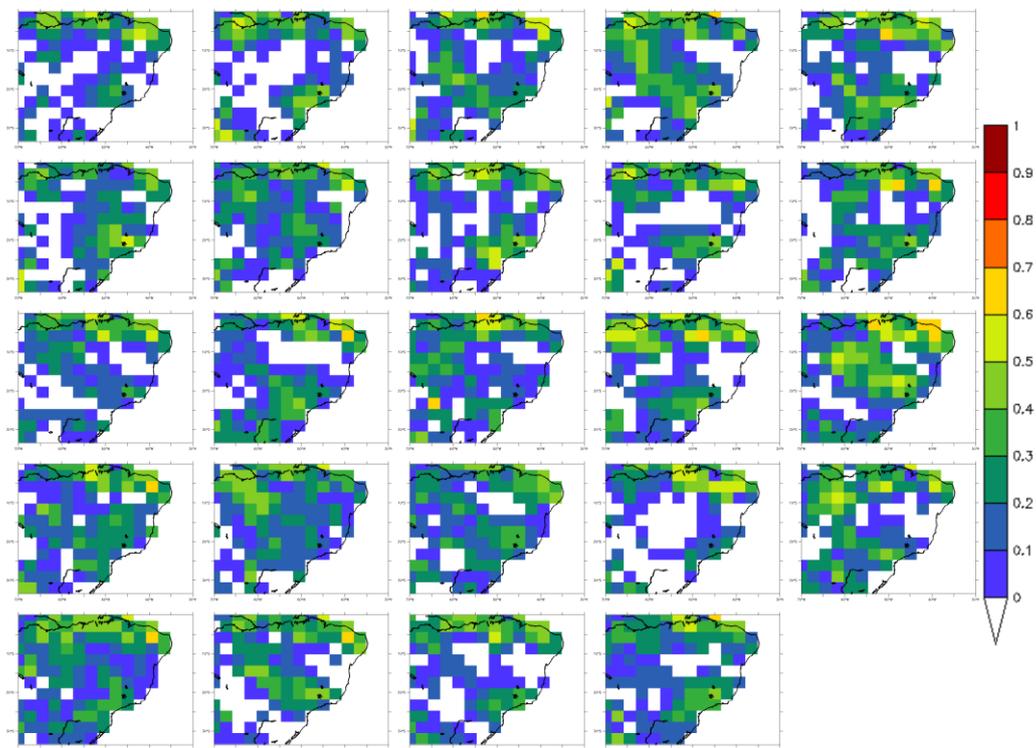
Na Figura 109 é mostrada a correlação entre a precipitação acumulada mensal dos membros do ECHAM 4.5 em relação a precipitação mensal do CRU para o trimestre MAM(período de maiores precipitações na região) no período de 1950 a 1999. O modelo apresenta correlações superiores a 0,6 em várias regiões do Nordeste Setentrional, indicando que a informação deste modelo pode ser utilizada nessa região com razoável confiabilidade.

Figura 109-CORREL espacial dos membros do modelo ECHAM em comparação ao CRU para o trimestre MAM. Membros do 11 ao 34 na sequência numérica da esquerda para direita e de cima para baixo.



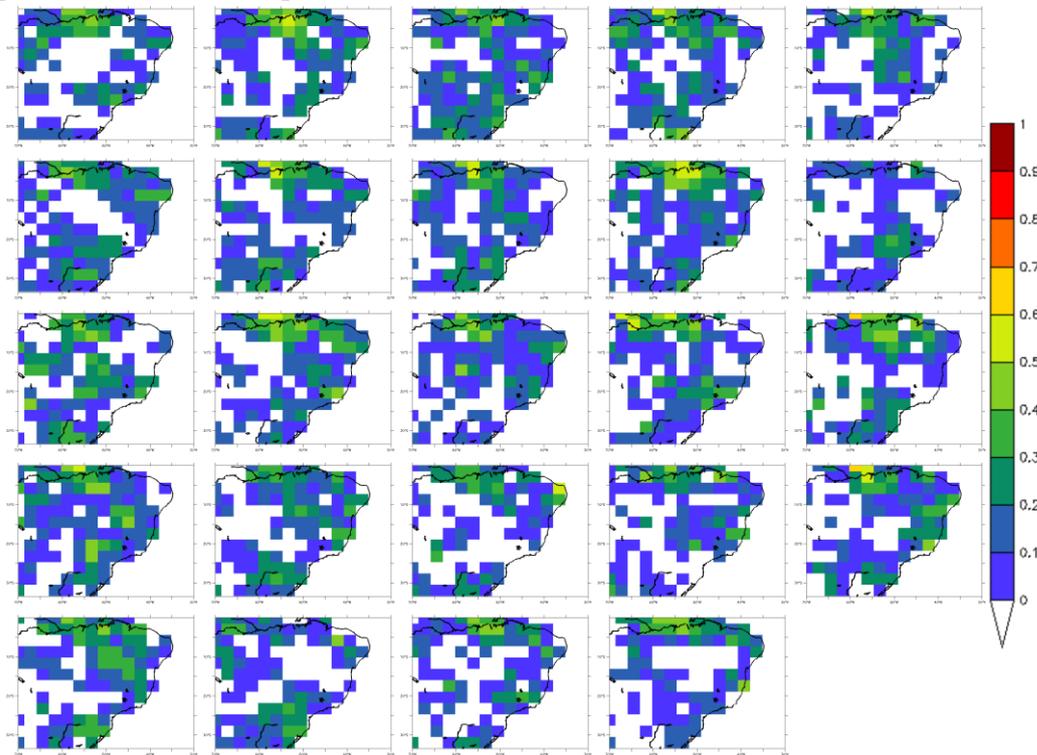
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 110– CORREL espacial dos membros do modelo ECHAM em comparação ao CRU para o trimestre JJA. Membros do 11 ao 34 na sequência numérica da esquerda para direita e de cima para baixo.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 111-CORREL espacial dos membros do modelo ECHAM em comparação ao CRU para o trimestre JJA. Membros do 11 ao 34 na sequência numérica da esquerda para direita e de cima para baixo



Fonte:

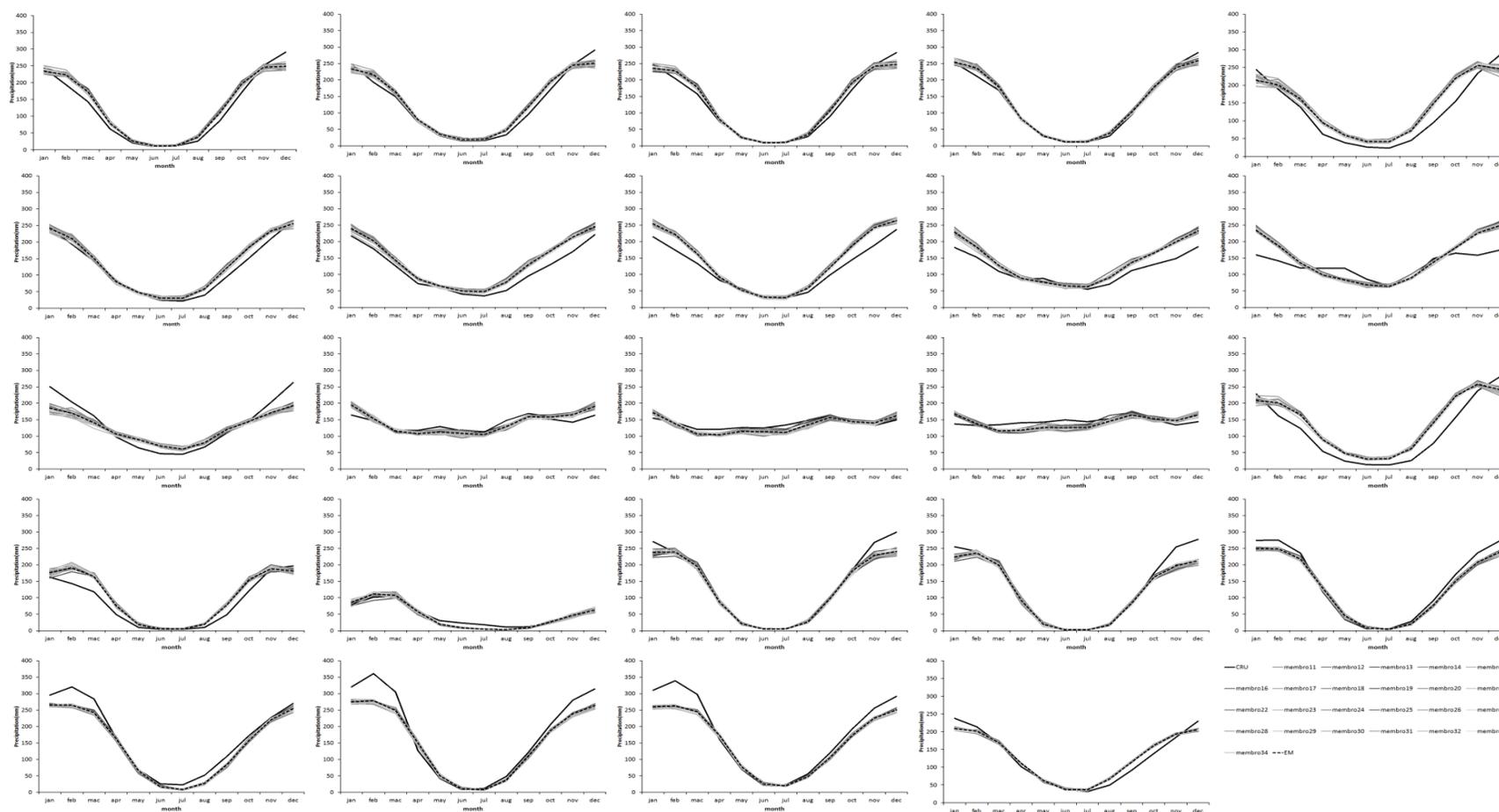
Elaborada pelo próprio autor.

Tabela 22-Índices estatísticos do Ensemble médio dos membros do ECHAM em relação a série históricas das estações do ano do CRU.

Bacias	DJF			MAM			JJA			SON		
	CORREL	BIAS	RMSE	CORREL	BIAS	RMSE	CORREL	BIAS	RMSE	CORREL	BIAS	RMSE
Emborcação	-0,044	-60,821	146,627	-0,001	28,190	79,297	0,426	12,427	33,402	0,118	24,644	113,044
Nova Ponte	-0,013	-89,295	203,791	0,156	-9,729	100,845	0,472	18,491	44,719	-0,013	18,532	137,345
Itumbiana	0,112	-49,700	111,181	-0,018	6,720	77,873	0,417	4,099	30,507	0,212	20,543	96,964
São Simão	0,191	-22,187	89,731	0,045	-9,794	80,679	0,407	8,085	33,348	0,1	-16,002	97,933
Furnas	0,243	-100,277	165,689	0,32	48,703	88,167	0,561	55,876	73,434	0,127	118,475	156,384
Água Vermelha	0,031	-51,282	150,797	0,354	-20,200	81,315	0,53	29,299	51,975	0,217	54,062	113,314
Nova Avanhandava	0,043	9,796	117,442	0,386	-4,978	75,913	0,545	38,493	62,513	0,358	87,600	116,724
Porto Primavera	0,140	84,509	127,589	0,305	9,881	79,436	0,446	9,086	50,528	0,276	104,973	129,478
Rosana	-0,144	95,338	136,357	0,38	-20,952	91,315	0,562	13,888	68,361	0,309	83,547	119,369
Itaipú	0,131	163,373	180,654	0,484	-68,630	133,527	0,532	-36,375	84,670	0,242	43,765	124,144
Santa Cecília	0,387	-229,035	263,395	0,2	-27,376	114,632	0,439	44,606	78,656	0,103	-51,130	106,541
Salto Caxias	-0,046	27,796	105,531	0,342	-55,659	128,106	0,473	-24,108	121,551	0,233	-0,431	117,698
Itá	-0,070	-8,719	100,023	0,319	-60,896	117,908	0,412	-67,966	135,626	0,295	-33,350	121,894
Dona Francisca	0,210	27,305	109,247	0,257	-59,889	152,818	0,027	-73,487	161,645	0,307	-23,051	139,891
Três Marias	0,223	-47,229	133,276	0,201	81,527	102,811	0,51	70,844	78,768	0,165	128,508	162,472
Sobradinho	0,028	30,091	122,097	-0,159	72,872	97,709	0,12	9,982	22,287	0,058	54,804	106,377
Xingó	0,408	3,150	80,336	0,599	-25,349	80,596	0,457	-39,611	45,550	0,241	-2,578	38,538
Serra da Mesa	0,195	-87,538	139,093	-0,117	2,683	90,757	0,296	-0,629	25,071	0,104	-45,399	122,400
Lageado	0,091	-90,111	150,704	0,07	13,139	73,413	0,137	-0,861	16,220	0,217	-63,910	119,805
Tucuruí	0,077	-101,561	140,498	0,362	-12,317	67,373	0,417	-6,493	21,280	0,172	-76,725	108,552
Belo Monte	-0,001	-131,381	153,842	0,284	-67,036	86,885	0,507	-51,768	55,155	0,447	-66,454	81,747
Teles Pires	0,046	-203,915	216,728	0,274	-37,676	64,244	0,353	-16,294	26,285	-0,021	-94,810	115,066
São Luiz do Tapajós	0,208	-204,053	212,123	0,352	-51,625	65,711	0,386	-12,580	24,646	0,071	-86,607	102,070
Santo Antônio	0,048	-89,966	118,894	0,103	4,317	54,001	0,329	22,217	45,133	0,069	38,929	73,036

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 112-Climatologia da precipitação média mensal por bacia do Ensemble Médio dos membros do modelo ECHAM em comparação aos dados fornecido pelo CRU no período de 1950 a 1999. Da esquerda para a direita e de cima para baixo as bacias são: Emborcação, Nova Ponte, Itumbiana, São Simão, Furnas, Água Vermelha, Nova Avanhandava, Porto Primavera, Rosana, Itaipú, Santa Cecília, Salto Caxias, Itá, Dona Francisca, Três Marias, Sobradinho, Xingó, Serra da Mesa, Lageado, Tucuruí, Belo Monte, Teles Pires, São Luiz do Tapajós e Santo Antônio.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

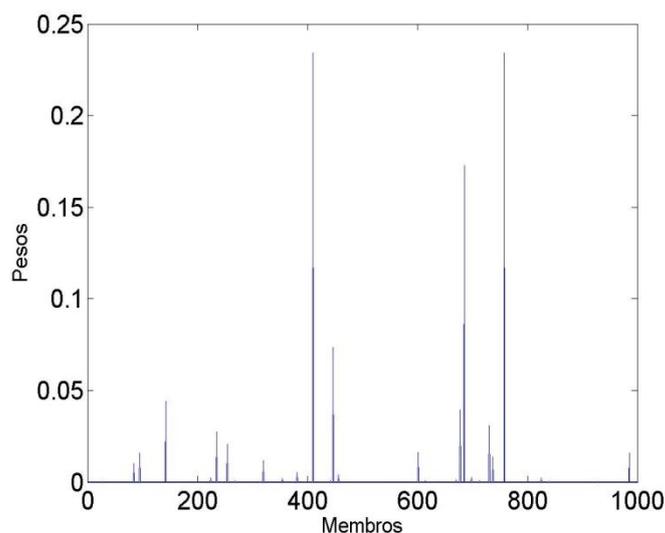
13.2. Reamostragem dos membros do GERVAZP

Nesta seção serão mostradas diversas metodologias para reamostragem dos dados do GERVAZP.

13.2.1. Método dos vizinhos da mediana do SMAP

Na Figura 113 são mostrados o peso dos membros do GERVAZp para Furnas para fevereiro de 2005 para o método dos vizinhos da mediana do SMAP. O método atribui peso bastante elevado para alguns dos membros do GERVAZP, o que dificulta a sua utilização, visto que ao considerar uma pequena quantidade de membros mais prováveis perde-se a informação da incerteza associada ao evento.

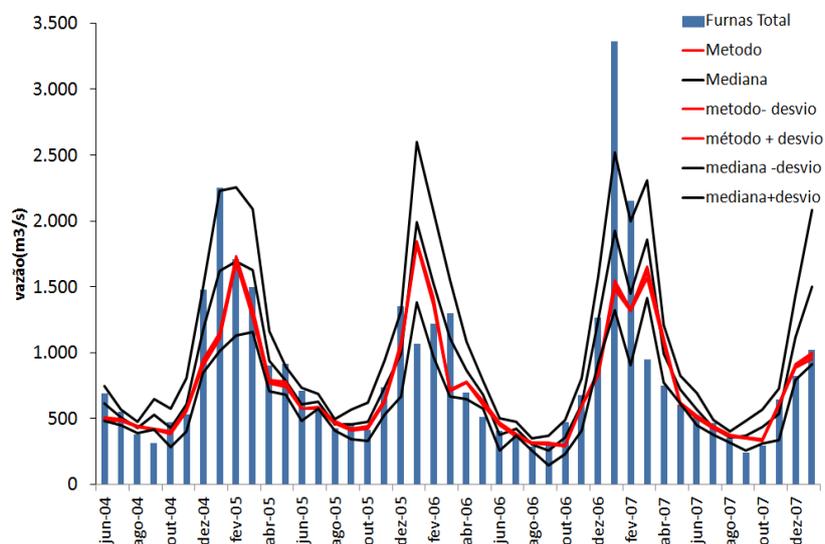
Figura 113-Pesos dos membros do GERVAZp para Furnas para fevereiro de 2005.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 114 é mostrada a série de vazões do posto Furnas, da mediana do GERVAZP e da mediana do Método dos vizinhos da mediana do SMAP. Acrescidos das séries da mediana do GERVAZP somada e subtraída de um desvio padrão, e ainda, as séries da mediana do método em questão somado e subtraído de um desvio padrão. O método dos vizinhos apresentou espalhamento bastante pequeno ao longo de toda a série de vazões, o que inviabiliza sua utilização, já que nestas configurações os eventos são tratados como praticamente determinísticos. O que considerando a atmosfera um sistema caótico, isto não é razoável. Por esse motivo esse método foi descartado de análises posteriores.

Figura 114-Série de vazões no posto Furnas, da mediana do GERVAZP e da mediana Método dos vizinhos da mediana do SMAP. Acrescidos das séries da mediana do GERVAZP somada e subtraída de um desvio padrão e das séries da mediana do método em questão somado e subtraído de um desvio padrão.

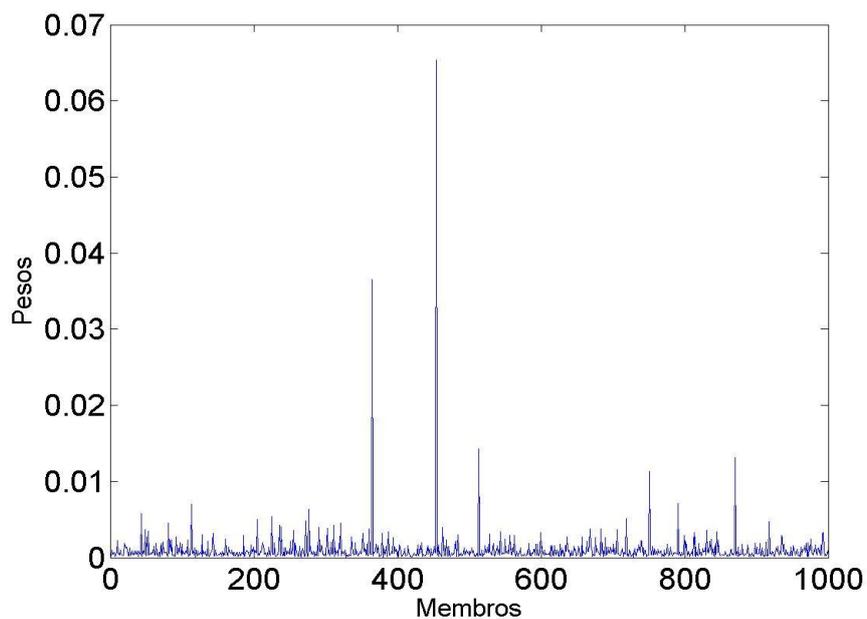


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

13.2.2. Métodos dos vizinhos de todos os membros do SMAP

Na Figura 115 são mostrados o peso dos membros do GERVAZp para Furnas para fevereiro de 2005 para o método dos vizinhos dos membros do SMAP. Este método apesar de reduzir o peso em relação o método anterior, ainda apresenta peso bastante elevado para alguns dos membros do GERVAZP, o que dificulta a sua utilização, visto que ao considerar uma pequena quantidade de membros mais prováveis perde-se a informação da incerteza associada ao evento. Por esse motivo esse método foi descartado de análises posteriores.

Figura 115-Pesos dos membros do GERVAZp para Furnas para fevereiro de 2005.

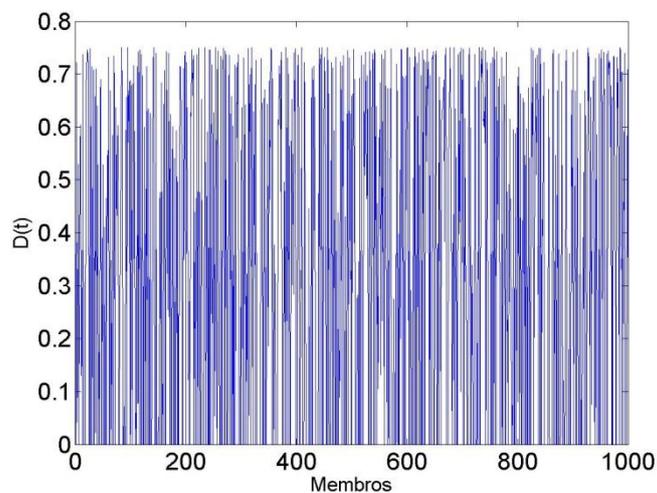


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

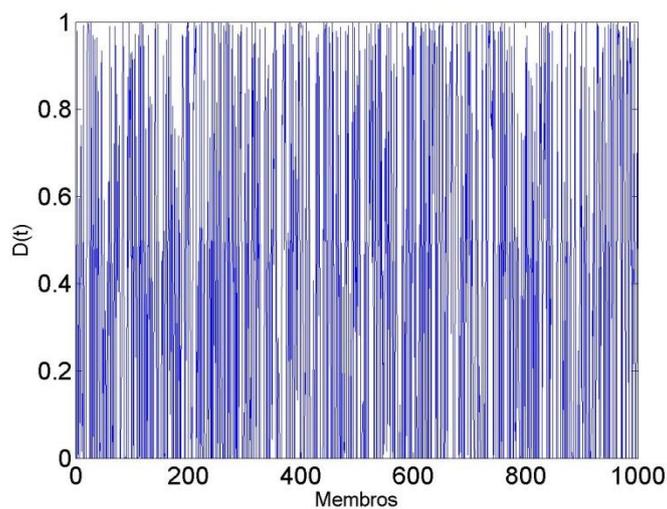
13.2.3. Método de Kernel

Na Figura 116 são mostrados o peso dos membros do GERVAZp para Furnas para fevereiro de 2005 para o método de Kernel 1 para as funções Epanechnikov e Epanechnikov - Tri-cúbica. Quanto ao peso dado aos cenários, este método distribui de forma mais adequada o peso dado aos cenários do GERVAZP, por isso esse método será avaliado em maiores detalhes em seguida.

Figura 116-Pesos dos membros do GERVAZp para Furnas para fevereiro de 2005 usando o método de Kernel.(a) Kernel Epanechnikov e (b) Kernel Epanechnikov- Tri-cúbica.



(a)

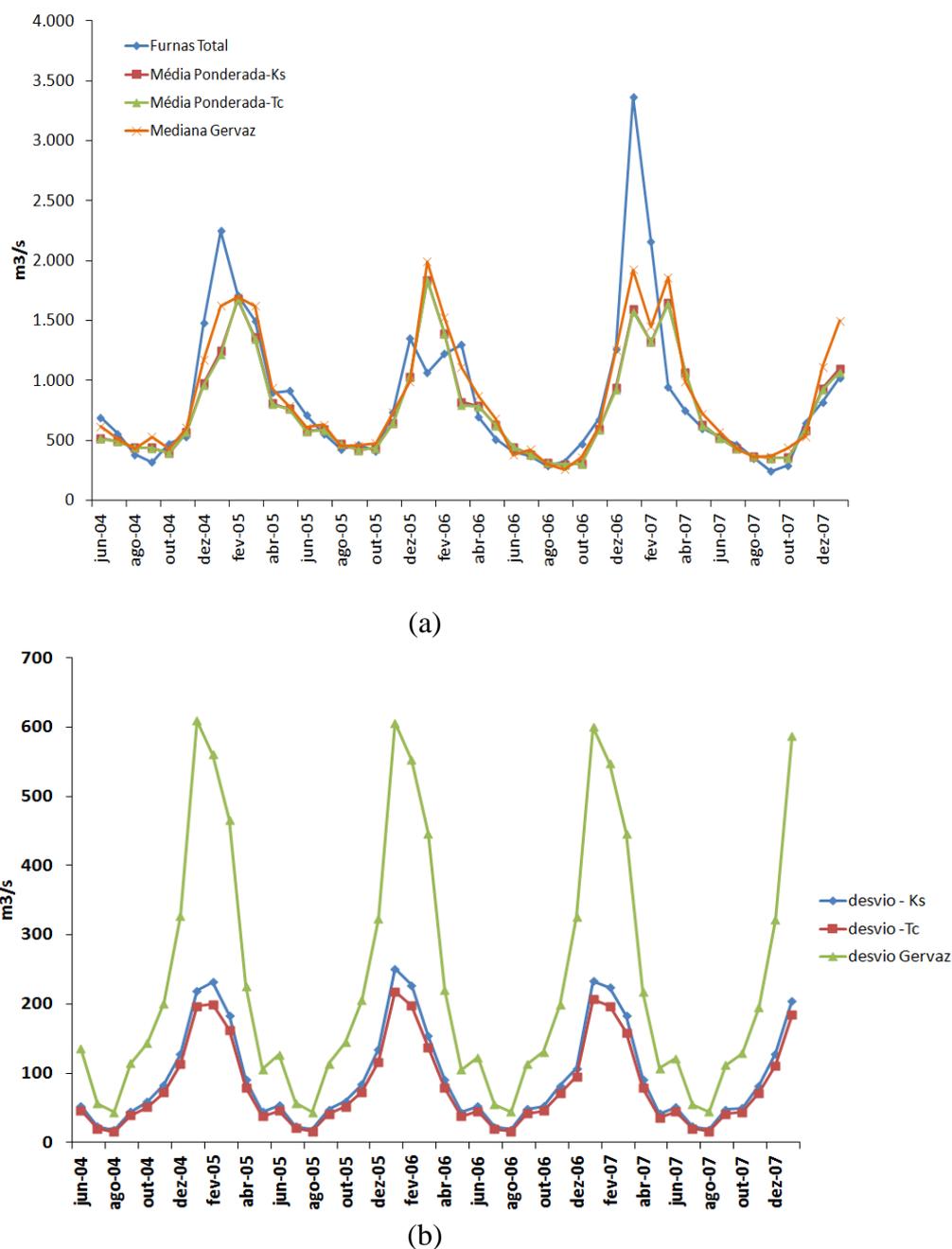


(b)

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 117(a) são mostrados a série observada em FURNAS, mediana dos membros do GERVAZP, mediana dos membros do KERNEL 1 Epanechnikov e Kernel 1 Epanechnikov- Tri-cúbica. Enquanto na Figura 117(b) são mostrados os desvios padrão dos membros do GERVAZP e dos métodos de Kernel 1. Os resultados mostrados pelas medianas dos métodos e Gervazp apresentam valores semelhantes, porém o método de Kernel 1 reduz o desvio padrão dos cenários previstos.

Figura 117-(a) Série observada em FURNAS, mediana dos membros do GERVAZP, mediana dos membros do KERNEL 1 Epanechnikov e Kernel 1 Epanechnikov- Tri-cúbica. (b) Desvio padrão dos membros do GERVAZP e dos métodos de Kernel.

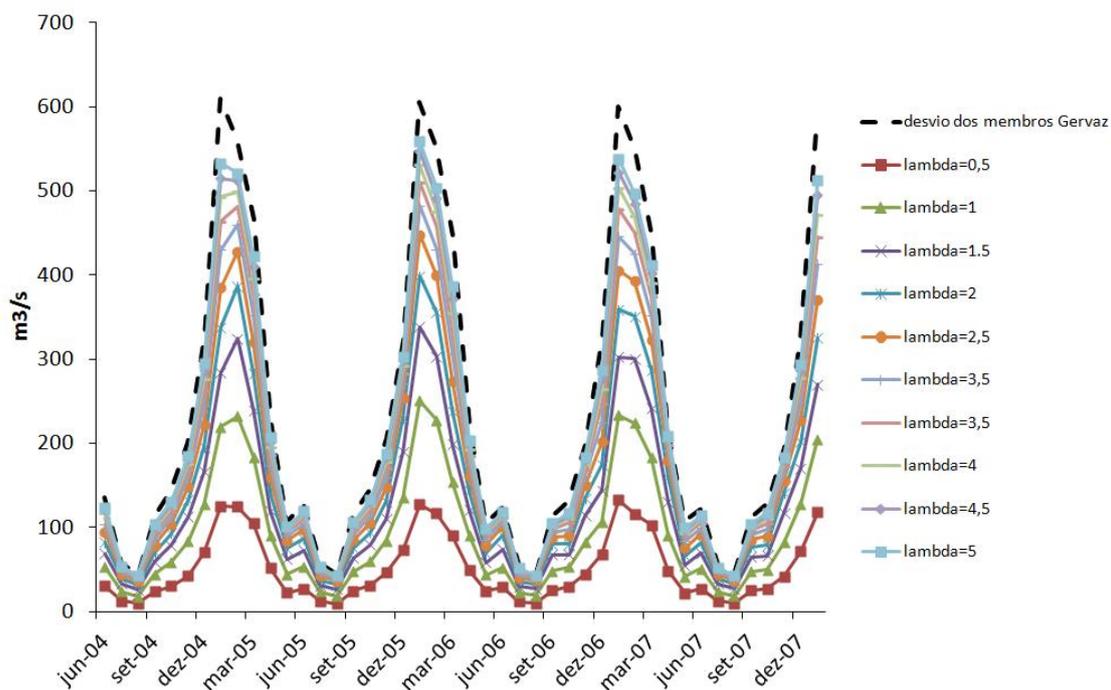


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

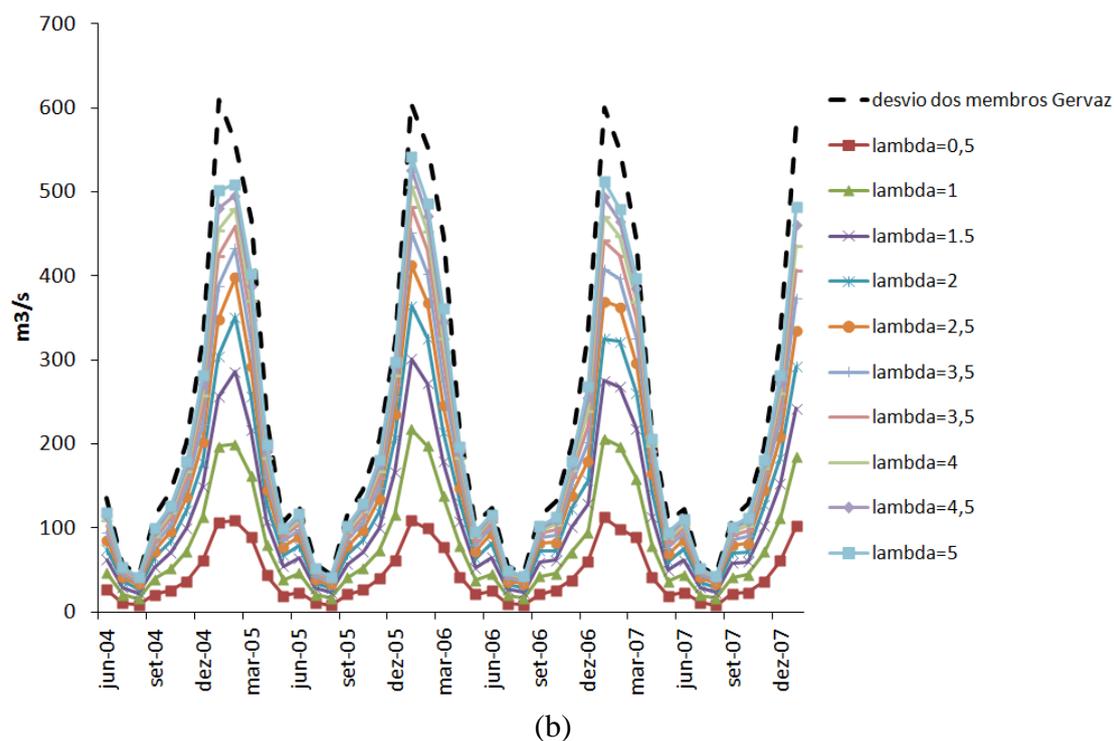
Nas Figura 118(a) e (b) são mostrados a série de desvios padrões em FURNAS para os membros do GERVAZP e para os membros do KERNEL 1 Epanechnikov e Kernel 1 Epanechnikov- Tri-cúbica em função de Lambda. A escolha do Lambda pode impactar diretamente sobre o desvio padrão e reduzi-lo, é razoável supor que uma

significativa melhoria nos processos de planejamento e programação da operação do SIN seria obtido caso houvesse essa redução. Os métodos de KERNEL 1 Epanechnikov e Kernel 1 Epanechnikov- Tri-cúbica apresentam resultados bem semelhantes, por isso só serão mostrados os resultados do métodos de KERNEL Epanechnikov.

Figura 118-(a) Desvios padrões da Função Kernel 1 Epanechnikov e (b) Desvios padrões da Função Kernel 1 Epanechnikov- Tri-cúbica para Furnas em função de Lambda (sendo este parâmetro associado a um escalar multiplicado pelo desvio padrão dos membros do Gervazp naquele mês).



(a)

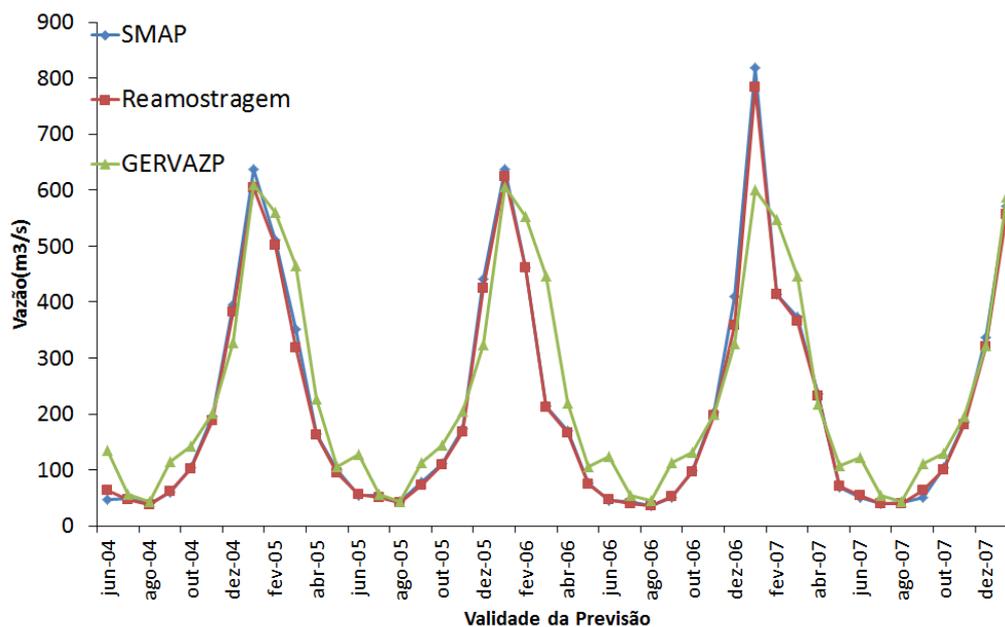


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

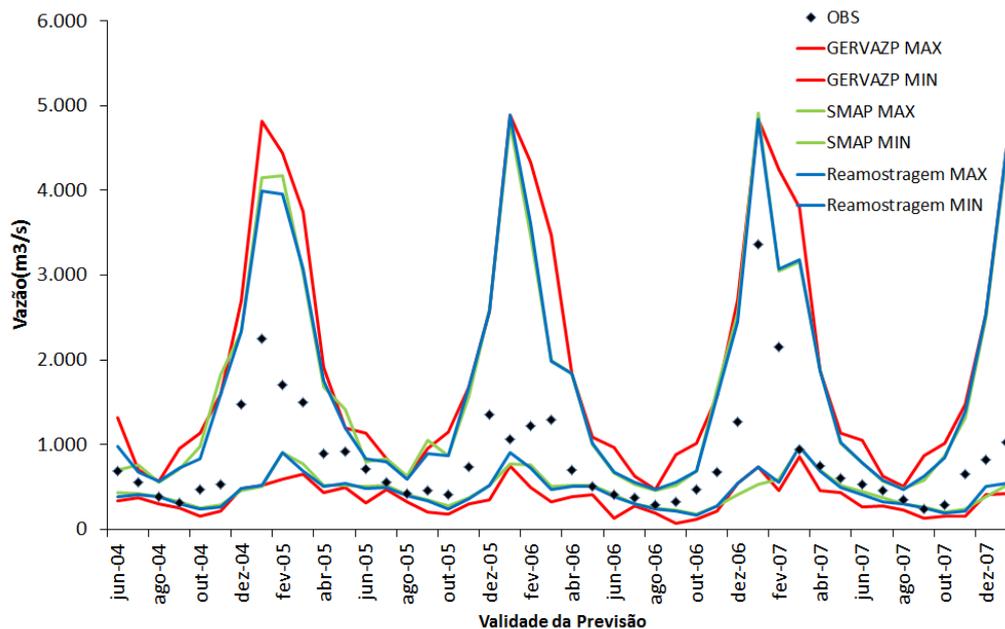
13.2.4. Método de reamostragem do Gervazp pelo SMAP

Nas Figura 119(a) e 119 (b) são mostrados os desvios padrões e os valores máximos e mínimos dos membros SMAP, reamostragem e GERVAZp para Furnas. Os membros do SMAP e reamostragem reduzem sensivelmente o desvio padrão na maior parte da série histórica e mostram impacto significativo no valor mínimo, aumentando o mesmo em alguns m^3/s .

Figura 119-(a) Desvios padrões e (b) Valores máximos e Mínimos do SMAP, reamostragem e GERVAZp para Furnas.



(a)



(b)

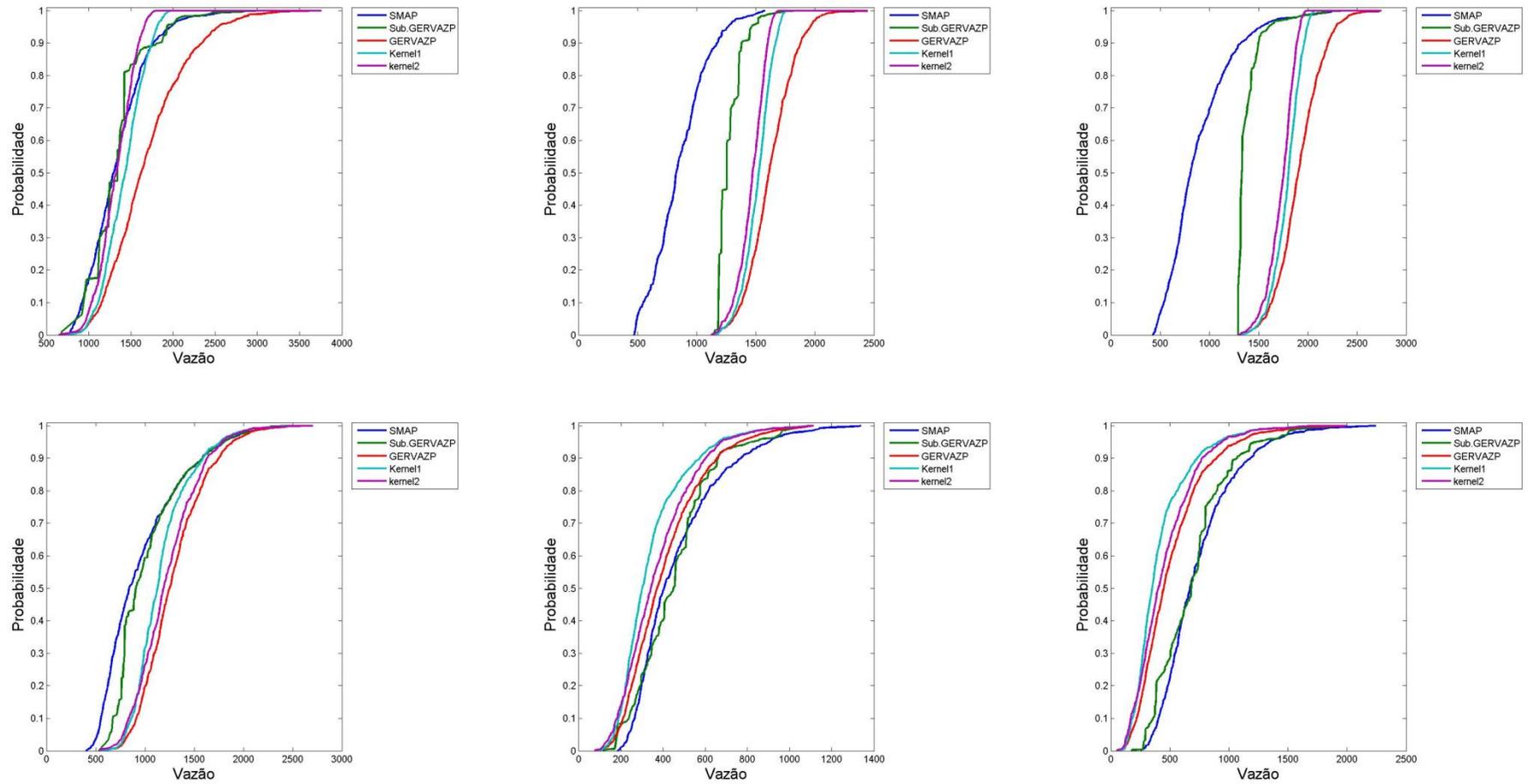
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

13.2.5. CDF dos Métodos de reamostragem

O método de Kernel apesar de aproximar sensivelmente a CDF do GERVAZP para a dos membros do SMAP em FURNAS, apresenta resultados não tão favoráveis em Canoas e Capivara. Isto ocorre porque no cálculo da distância prevalece a ENA de Furnas, que é bem maior que as demais, sendo os termos da equação da distância total pertencente às demais bacias de outra ordem de grandeza, conforme Figura 120 (e), (f) e (g).

O método de reamostragem dos cenários do GERVAZp pelos cenários do SMAP se aproxima razoavelmente a CDF do SMAP. Porém, em alguns casos os cenários do GERVAZP e os cenários do SMAP divergem de tal forma, que mesmo este método não consegue reproduzir adequadamente a CDF do SMAP, conforme Figura 120 (a), (b) e (c).

Figura 120-CDF das vazões para FURNAS, CAPIVARA e CANOAS, respectivamente. Para as previsões geradas em fevereiro de 2005 válidas para março de 2005. (figuras a, b e c) e para as previsões geradas em novembro de 2005 válidas para dezembro de 2005 (figuras d, e e f).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

13.3. Modelo periódico autorregressivo

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos pelo modelo PAR, detalhes da calibração e da previsibilidade do modelo.

13.3.1. Calibração do modelo

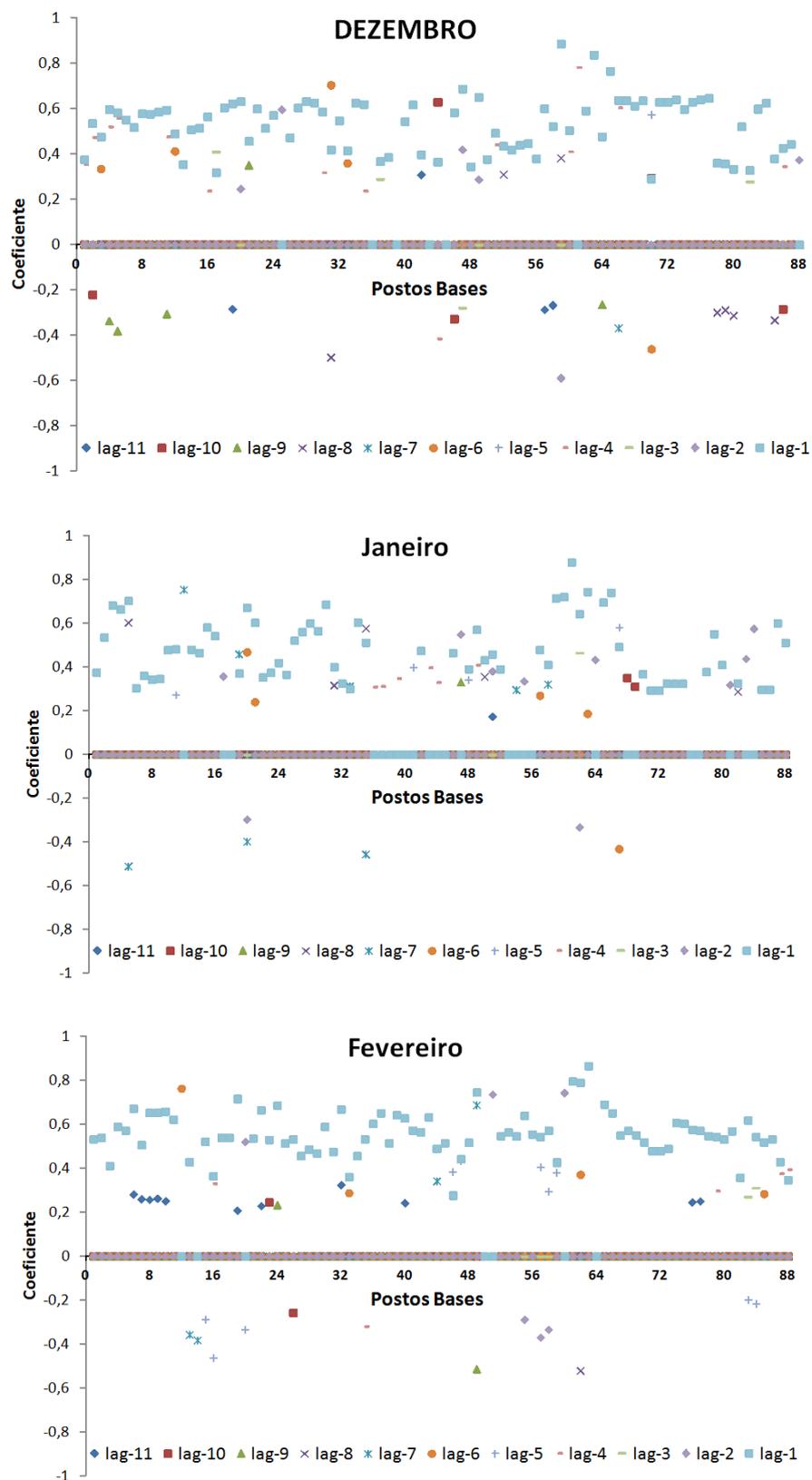
Na determinação das regressões mensais para os 88 Postos Base em estudo, foram testadas como variáveis explanatórias os dados de vazão padronizados entre 1 e 11 meses de antecedência (lag1 a 11). Utilizando a metodologia *stepwise* foram escolhidas as variáveis explanatórias apresentadas, a matriz de cores neste gráfico representa o coeficiente de cada variável da regressão linear múltipla.

Na totalidade dos modelos ($12 \times 88 = 1.056$) existe uma grande influência da variável autorregressiva de lag1, conforme mostra a Figura 121, presente na maioria (87,7%) das regressões dos PB's em todos os meses; a vazão com lag2 só aparece em 17,4% das equações; para a vazão com lag3 a frequência é de 12,9% e para as vazões com lag4 e 5 possuem a frequência de 9,1%.

Na análise mensal das regressões, o predomínio continua sendo da variável formada pelos dados de vazões com um mês de antecedência lag1, quando o objetivo e a explicação da variabilidade dos dados da série de vazão na calibração das regressões. Os meses de janeiro, março, abril, julho, e agosto, possuem como segunda variáveis explanatórias mais utilizadas aquelas formadas por vazões com dois meses de antecedência lag2. No entanto, para os meses de maio, setembro, e outubro, as variáveis com segundo maior nível de explicação são aquelas formadas por vazões com lag3; variáveis com lag4 e lag5 aparecem de forma mais frequente nos meses de dezembro e junho, respectivamente. O mês de fevereiro possui nas vazões com lag11, com 11 meses de antecedência, a segunda variável explicativa mais utilizada nas regressões.

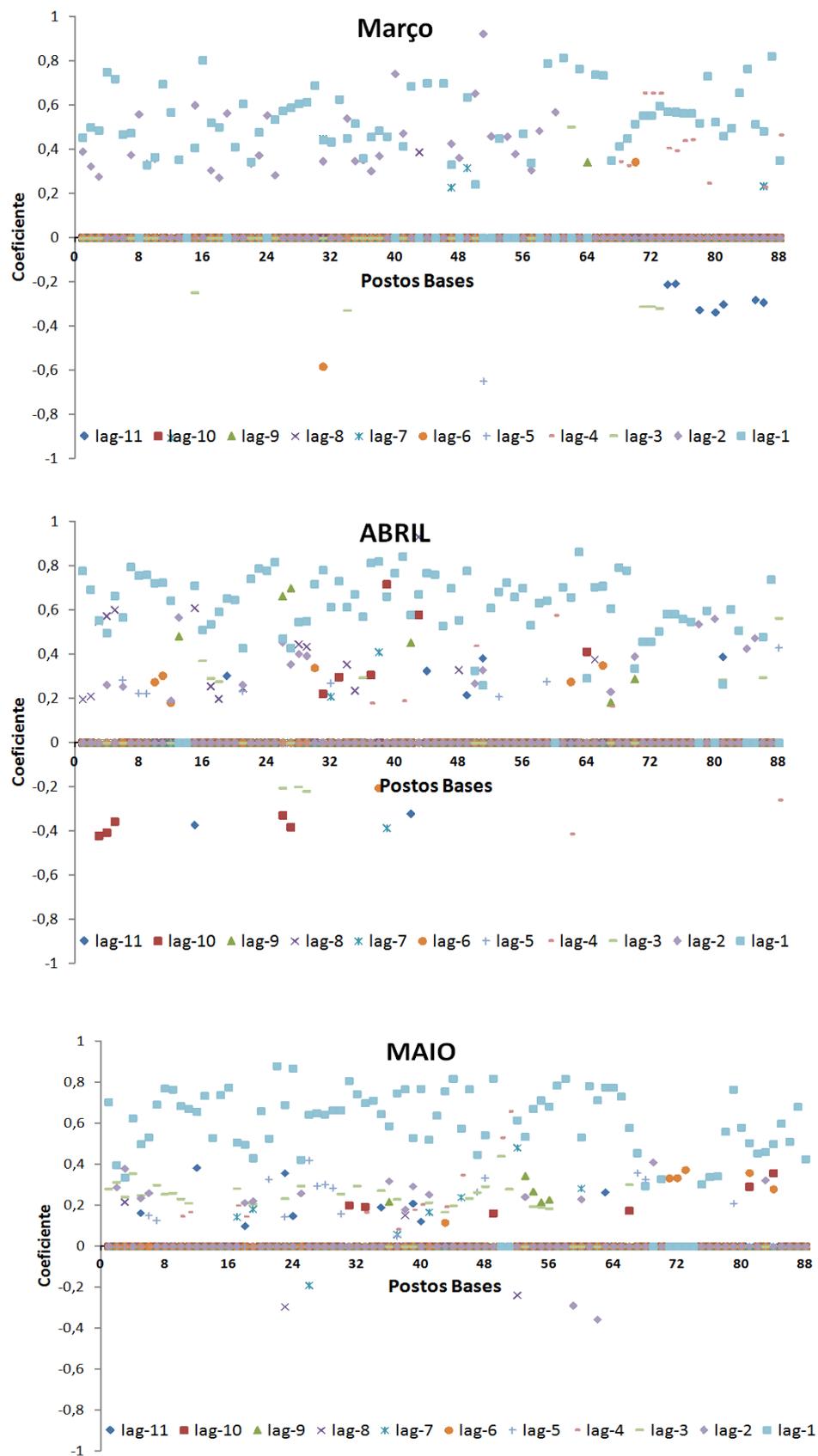
Os meses de janeiro e fevereiro são os meses onde a maior parte das regressões possui apenas uma variável, 69,3% e 58,0%, respectivamente. Verifica-se que para o mês de setembro apenas 14,7% das regressões são definidas com apenas uma variável e 43,2% das regressões necessitam de duas variáveis, mostrando-se assim uma exceção à regra.

Figura 121-Coeficiente do modelo PAR para os postos bases para dezembro, janeiro e fevereiro.



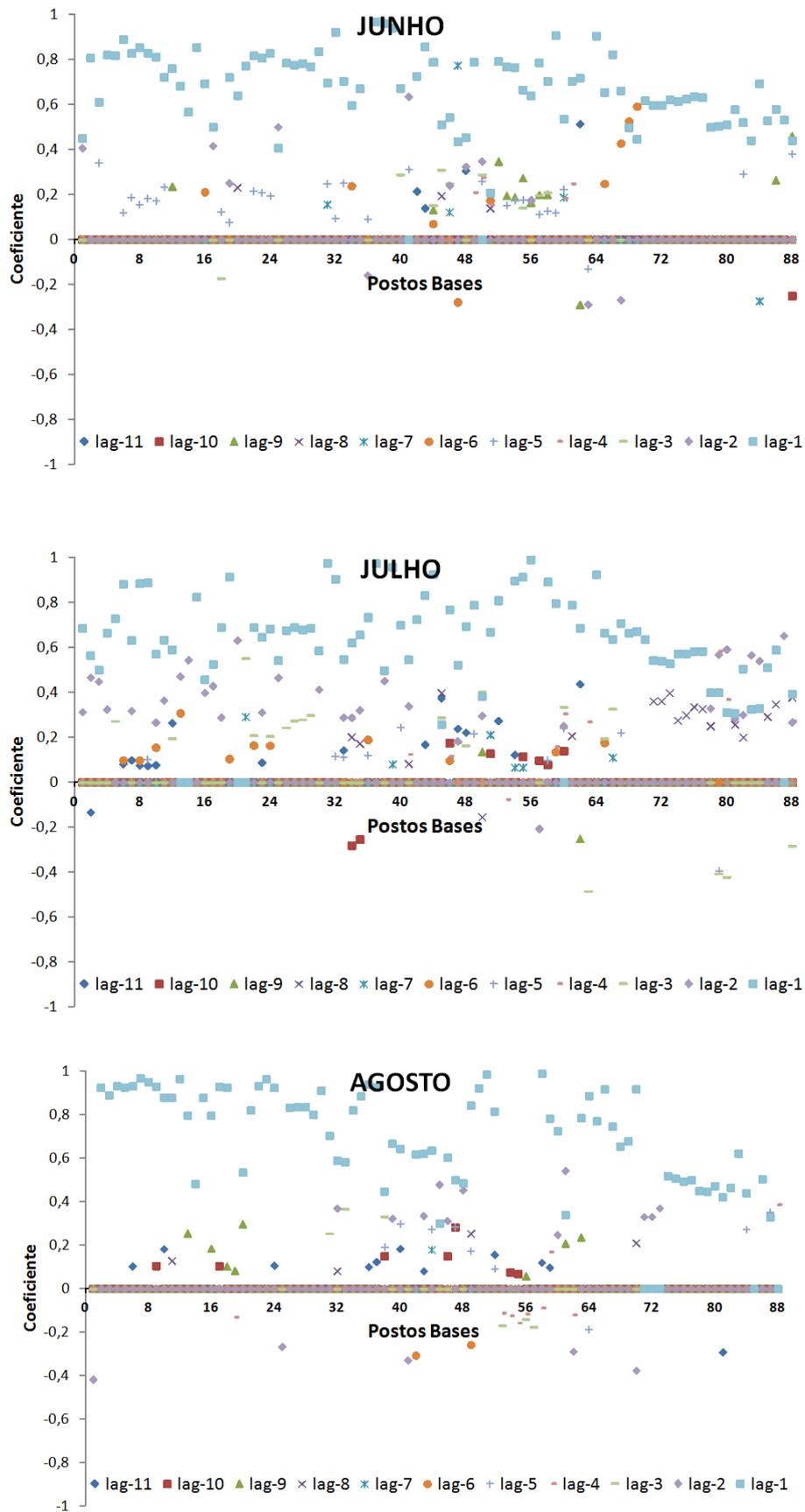
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 122-Coefficiente do modelo PAR para os postos bases para março, abril e maio.



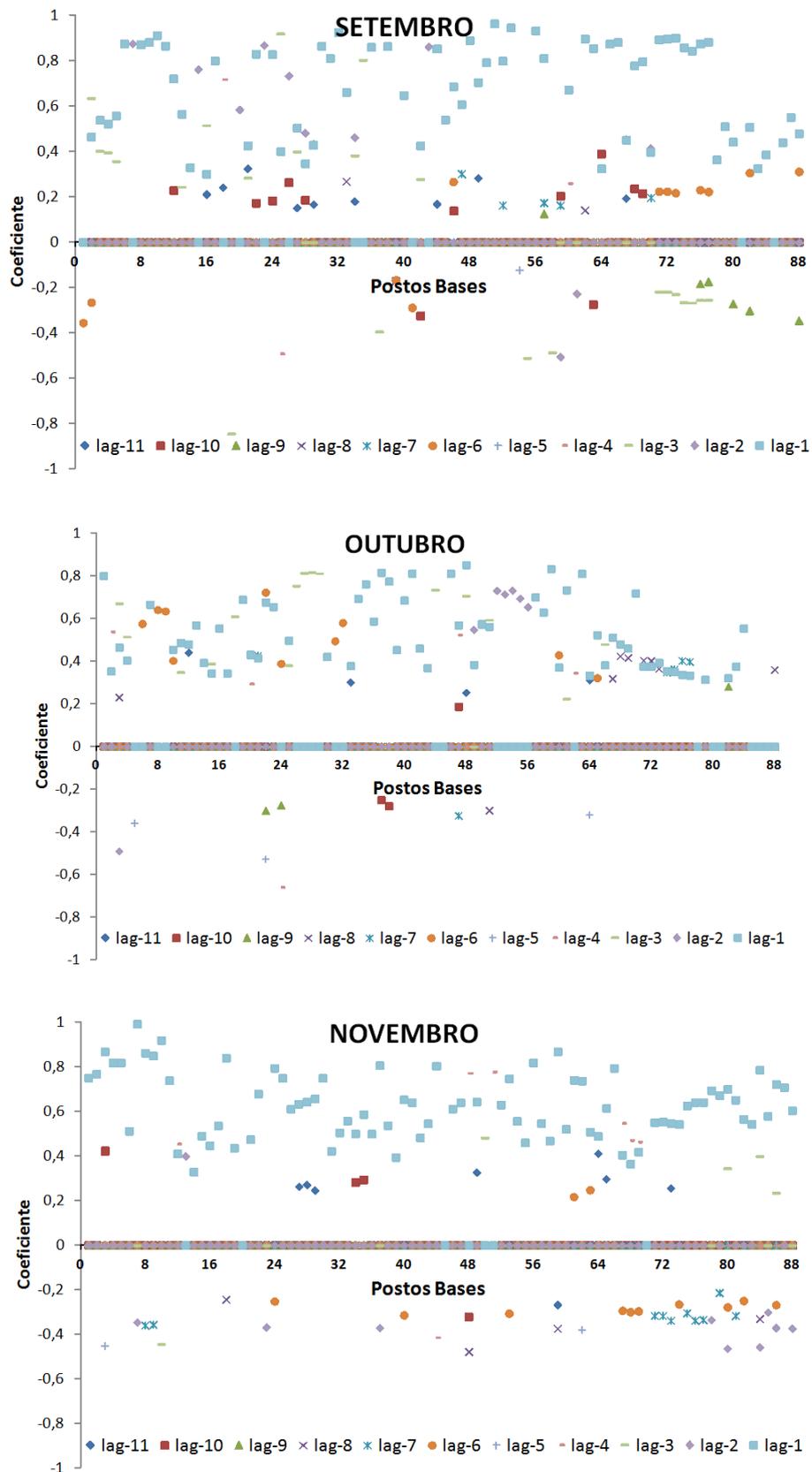
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 123-Coeficiente do modelo PAR para os postos bases para junho,julho e agosto.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 124-Coeficiente do modelo PAR para os postos bases para setembro, outubro e novembro.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

O mês de janeiro possui o maior número de modelos que nenhuma das variáveis disponíveis consegue explicar, de forma estatisticamente significativa, o comportamento da variável que se deseja prever. Em termos de previsão o tipo de modelo descrito consta somente da vazão média somada a componente aleatória do erro. Os postos base em que isso acontece são mostrados na Tabela 23.

Tabela 23- Postos Base onde não foi possível à determinação de regressões estatisticamente significantes ($\alpha=5\%$) a partir do Modelo PAR

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
PB14												
PB18												
PB20												
PB36												
PB38												
PB39												
PB40												
PB43												
PB45												
PB50												
PB53												
PB56												
PB64												
PB70												
PB74												
PB76												
PB77												
PB78												
PB80												
PB81												
PB85												
PB86												
PB87												

Fonte: Adaptado de Alexandre (2012)

Avaliando a calibração dos modelos de regressão em termos de Erro Médio Absoluto – EMA, observa-se que os menores valores EMA se encontram nos modelos dos meses entre maio e setembro com média de 0,38. O período com maiores médias de EMA estão entre os meses de outubro a março com 0,59.

13.3.2. Previsão de vazões

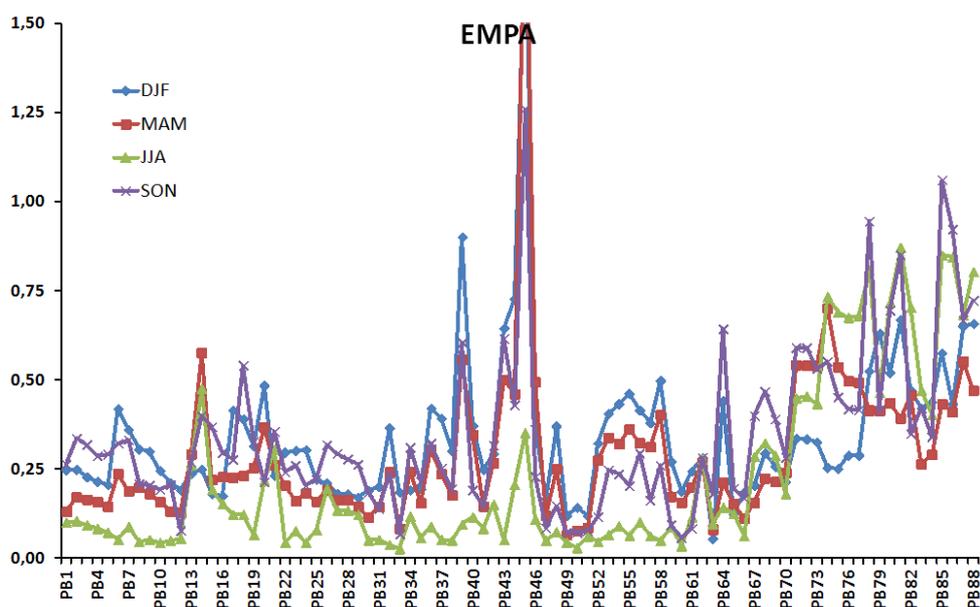
As vazões mensais previstas foram analisadas com as métricas utilizadas pela Operadora Nacional do Sistema – ONS que consta do Erro Médio Percentual Absoluto – EMPA e o coeficiente de NASH.

Os resultados para toda a série de dados será apresentado separadamente para os trimestres de dezembro, janeiro e fevereiro (DJF); março, abril e maio (MAM); junho, julho e agosto (JJA); e setembro, outubro e novembro (SON).

Observa-se, na Figura 125, que o valor médio mensais de EMPA da série de valores estimados varia entre 8 e 80% na maioria dos postos bases. Verifica-se ainda que os valores de EMPA do PB45 – Pedra do Cavalo (localizada na região hidrográfica do Atlântico Leste) são sobremaneira elevados o que para os períodos de DJF representa um valor de 1,82, MAM (1,98) e SON (1,26). Para o período de DJF cabe menção do elevado valor (0,9) para o EMPA do PB39 – Itapebi (localizada na região hidrográfica do Atlântico Leste).

Para todos os períodos em análise há um aumento pronunciado do Erro Médio Percentual Absoluto para os PB's entre 70 e 88, referentes às bacias do rio Iguaçu (bacia do Paraná) e Uruguai.

Figura 125-Valores de EMPA (eixo y) das vazões médias observadas e estimadas (1998-2003) a partir do Modelo PAR definidos para cada Posto Base (eixo x).

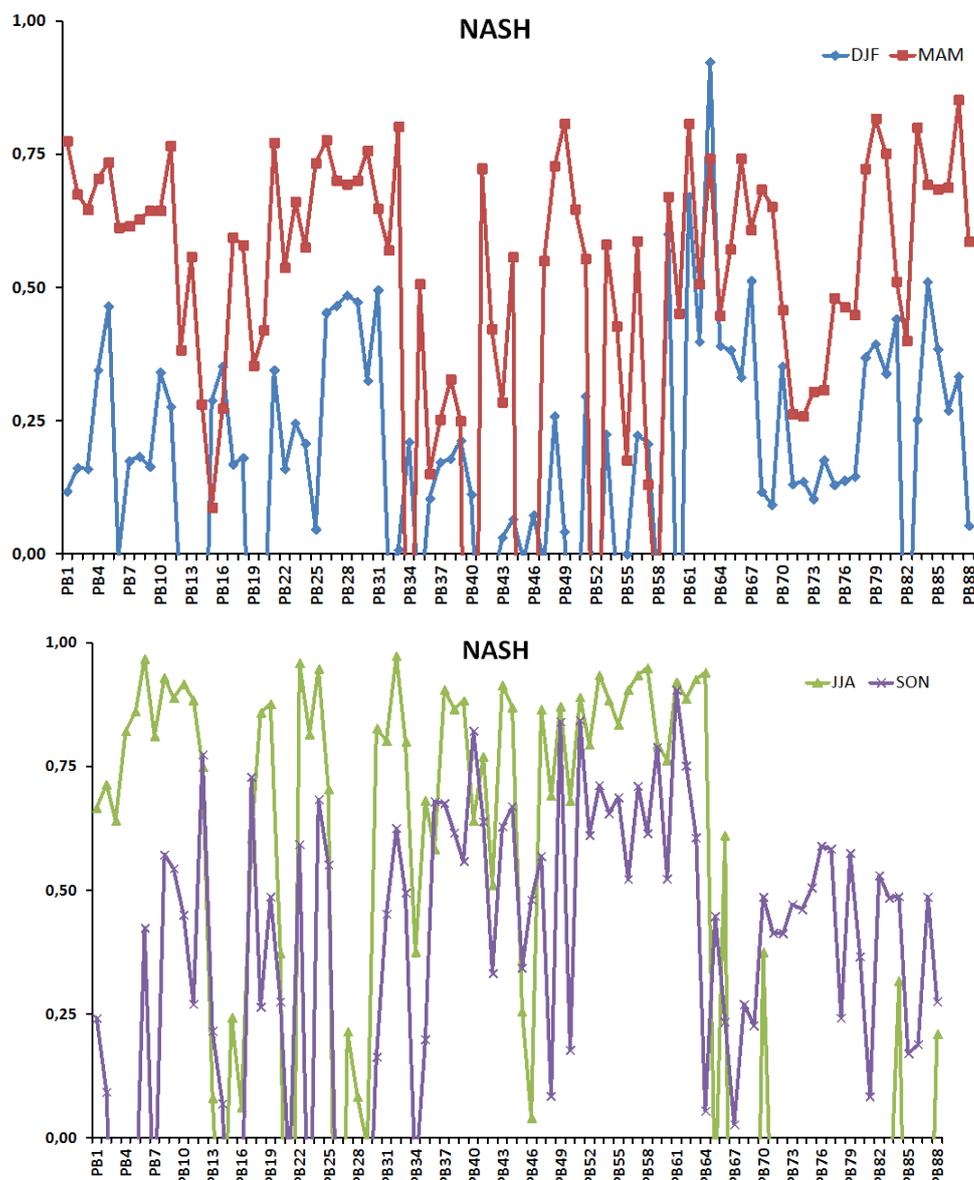


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Coeficientes de NASH negativos significam que a regressão utilizada para determinação de valores de previsão é menos eficiente que o uso da média histórica de longo período, tal situação é apresentada para os quatro períodos em algumas localidades, porém é evidente no trimestre JJA nos postos bases de 70 a 83, conforme Figura 126.

Analisando os coeficientes de NASH apresentados na Figura 126, percebe-se uma variabilidade muito grande nos valores obtidos, sendo o trimestre DJF aquele de mais difícil previsibilidade para a maioria das localidades.

Figura 126-Valores de coeficiente de NASH (eixo y) das vazões médias observadas e estimadas (1998-2003) a partir do Modelo PAR definidos para cada Posto Base (eixo x).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Nota-se, que de uma forma geral, os meses DJF possuem uma baixa previsibilidade de vazões para as regiões do Atlântico Leste e Sudeste, nas bacias do São Francisco e Tocantins-Araguai. Resultados relativamente bons podem ser observados basicamente na bacia do Amazonas, as parcelas centrais e oeste da bacia do Paraná, grande parte da região do Atlântico Sul e rio Uruguai.

Para os meses de MAM o modelo apresenta resultados melhores que nos demais períodos e apenas em alguns postos base observa-se baixa previsibilidade, no Atlântico Sudeste e na importante barragem de Sobradinho.

Já nos meses de JJA, a disparidade entre os coeficientes de NASH nas diferentes regiões é bastante pronunciada, pois enquanto as bacias do Tocantins-Araguai, do Amazonas e as regiões leste e oeste da Bacia do Paraná não apresentam modelos eficientes, em alguns casos sendo mais interessante utilizar a média histórica como variável prevista. O restante da bacia do Paraná, as regiões do Atlântico Sul, Sudeste e Leste, e o sul do rio São Francisco possuem valores de NASH normalmente acima de 0,6.

No período SON a previsibilidade mantém-se alta nas regiões do Atlântico Leste-Sudeste, norte e centro do rio Paraguai, e norte do rio Uruguai; os valores dos coeficientes aumentam na região do Tocantins-Araguaia, no entanto as regressões para o rio Grande não são eficientes.

13.4. Periódico autorregressivo com variáveis exógenas (PARX)

Nesta seção é apresentado detalhes da calibração do modelo PARx e os resultados de índice estatísticos associados de validação do modelo por trimestre e por posto base.

13.4.1. Calibração do modelo

Na determinação das regressões, de acordo com os meses do ano e os 88 Postos Base (PB's) em estudo, foram testados como variáveis explanatórias os índices contidos na matriz descrita na Tabela 21. Utilizando a metodologia *stepwise* foram escolhidas as variáveis explanatórias.

Na maioria dos modelos ($12 \times 88 = 1.056$) existe uma grande influência da variável autorregressiva de lag1 presente na maioria (85,3%) das regressões mensais dos 88 PB's, as vazões mensais com lag2 aparecem em 17,3% da totalidade das equações, para a vazão com lag3 a frequência é de 13,3%. Percebe-se também um predomínio das variáveis autorregressivas entre os meses de abril e julho, a partir de

agosto as variáveis autorregressivas e climáticas passam a ter uma distribuição quantitativa similar.

Entre as variáveis climáticas a mais comum é o $AMO_{(-1)}$ (Oscilação Atlântica Multidecadal) compondo 10,5% das equações com pouca influência entre os meses de janeiro a abril; seguido do índice $TNI_{(-1)}$ (Trans-NINO) com 9,5% apresentando uma distribuição temporal menos clara. O terceiro índice climático mais representativo foi o $ZW3_{(-1)}$ presente em 8,0% das regressões, tal índice foi definido por Alexandre (2012) como a media espacial dos valores registrados de ventos zonais a 925mb (15N-5N,150W-180W).

Nota-se que 14 equações, 1,3% do total, não possuem variáveis, logo não possuem regressões definidas. Apenas uma regressão fez uso de nove variáveis, assim com apenas cinco regressões fizeram uso de oito variáveis. Portanto, mesmo com um grande número de variáveis disponíveis (um total de 38) pode-se considerar que a parcimônia das equações foi mantida.

O mês de janeiro possui o maior número de modelos que nenhuma das variáveis disponíveis consegue explicar, de forma estatisticamente significativa, o comportamento da variável que se deseja prever. Em termos de previsão o tipo de modelo descrito consta somente da vazão média somada a componente aleatória do erro. Os postos base em que isso acontece são mostrados na Tabela 24.

Tabela 24- Postos Base onde não foi possível à determinação de regressões estatisticamente significantes ($\alpha=5\%$) a partir do Modelo PARx.

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
PB14												
PB39												
PB45												
PB50												
PB53												
PB56												
PB64												
PB70												
PB76												
PB77												
PB81												
PB85												

Fonte: Adaptado de Alexandre (2012)

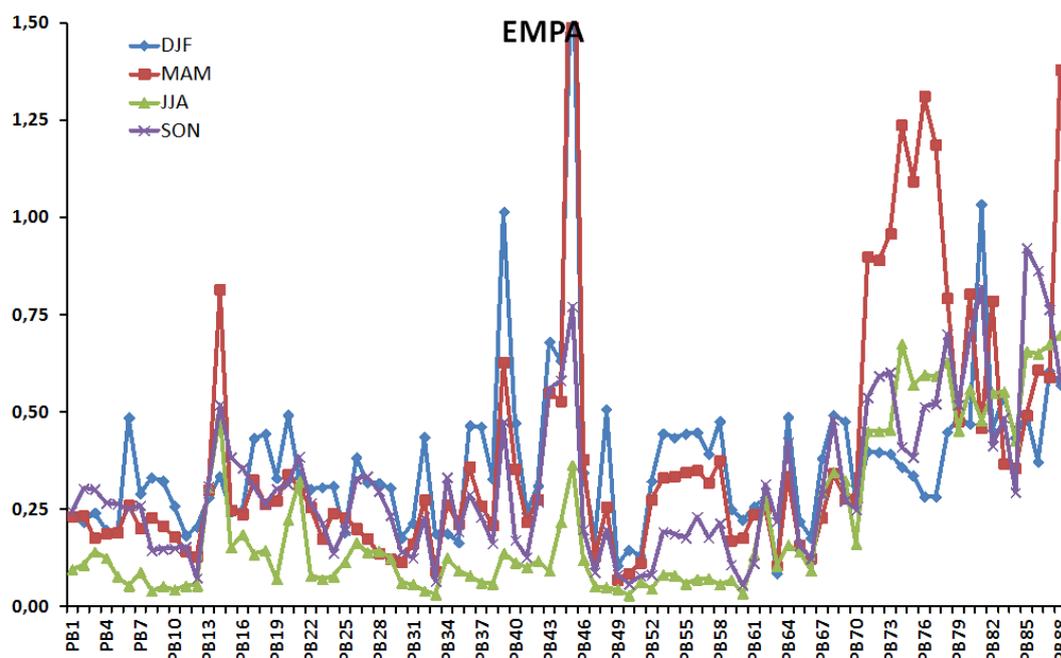
13.4.2. Previsão de vazões

Observa-se na Figura 127 que o valor médio de EMPA da série de valores estimados é de 0,53 variando entre 0,06 e 0,94. Para os valores dos períodos de DJF, MAM, JJA e SON as médias são de 0,37, 0,39, 0,21 e 0,32, respectivamente. Verifica-se ainda que os valores de EMPA do PB45 – Pedra do Cavalo (localizada na região hidrográfica do Atlântico Leste) são sobremaneira elevados para série de vazões (1,26), para os períodos de DJF (1,78) e MAM (2,13).

Para o período de DJF cabe menção do elevado valor de 101% para o EMPA do PB39 – Itapebi (localizada na região hidrográfica do Atlântico Leste) e 103% do PB81 – Castro Alves (localizada na região hidrográfica do Atlântico Sul).

O período MAM é o que possui maiores valores acima da unidade de EMPA como os PB's 74 a 77 e 88. Os PB's 74 a 77 representam os aproveitamentos hidroelétricos de Foz da Areia (124%), Segredo (109%), Salto Santiago (131%) e Salto Osório (119%), todos localizados na bacia do rio Iguaçu (Bacia do rio Paraná). O PB88 – Quebra Queixo localizado na bacia do rio Uruguai possui um EMPA de 138%.

Figura 127-Valores de EMPA (eixo y) das vazões médias observadas e estimadas (1998-2003) a partir do Modelo PARx definidos para cada Posto Base (eixo x).

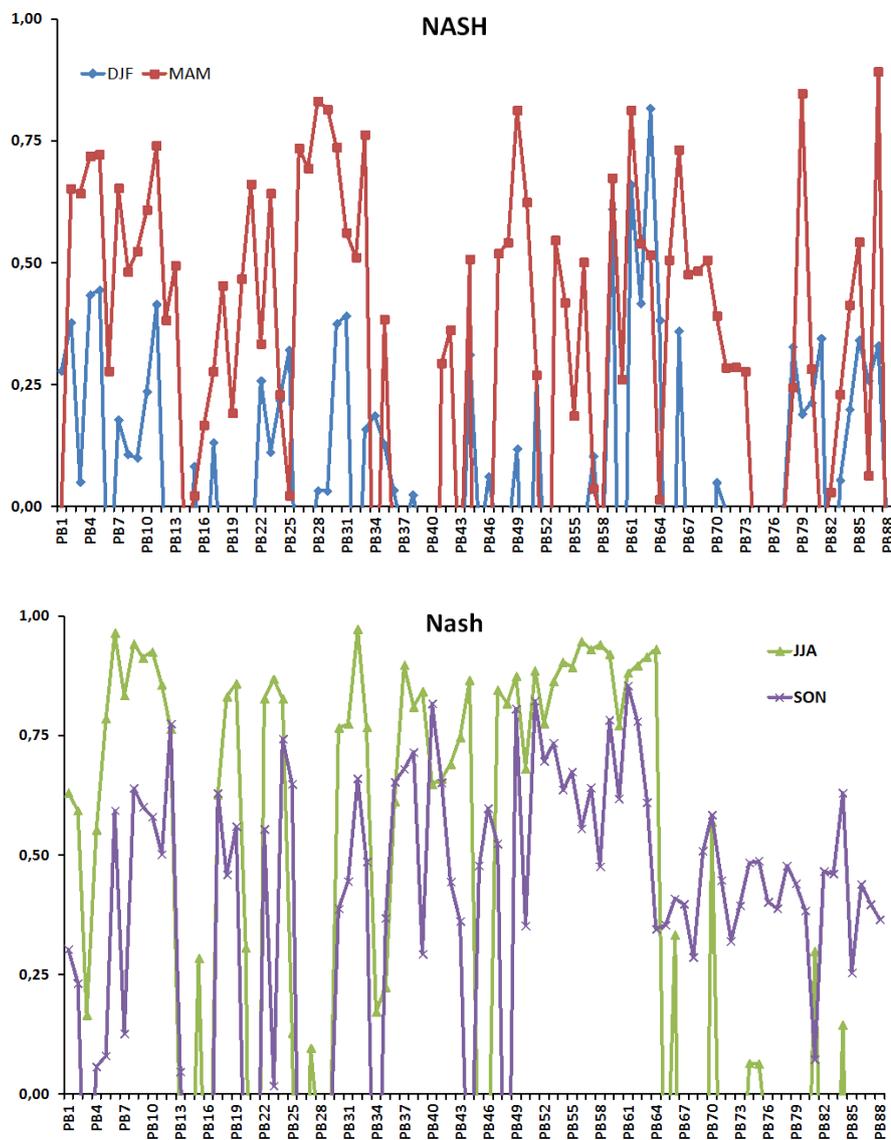


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Analisando os coeficientes de NASH, apresentados na Figura 5.25, percebe-se que o valor médio serial entre os PB's, é de 0,53, considerado relativamente elevado, com menor valor observado no PB88 e PB45 que possui valor de 0,06 e 0,09, respectivamente. Para os valores dos diferentes períodos e PB's a variabilidade é muito grande; o valor médio para o período de DJF é de -0,01 variando entre -1,67 para o PB14 e 0,82 para o PB63; para MAM o valor médio é de 0,29 variando entre -2,48 para o PB45 e 0,89 para o PB87; para JJA o valor médio é de 0,32 variando entre -1,31 para o PB67 e 0,97 para o PB32; e para SON o valor médio é de 0,34 variando entre -0,87 para o PB27 e 0,85 para o PB61.

Coeficientes de NASH negativos significam que a regressão utilizada para determinação de valores de previsão é menos eficiente que o uso da média histórica de longo período, tal situação são apresentadas para o período DJF nos PB's 6, 12 a 14, 16, 18 a 21, 26 e 27, 32, 37, 39 a 43, 45, 47 a 48, 50, 52 a 56, 58, 60, 65, 67 a 69, 71 a 77, 82, e 88; para MAM nos PB's 2 a 13, 15 a 33, 35, 41 e 42, 44, 47 a 51, 53 a 57, 59 a 73, 78 a 80, e 82 a 87; para JJA nos PB's 1 a 12, 15, 17 a 20, 22 a 25, 27, 30 a 44, 47 a 64, 66, 70, 74 e 75, 81 e 84; para SON nos PB's 1 e 2, 4 a 13, 17 a 19, 22 a 25, 30 a 33, 35 a 43, 45 a 47, 49 a 88.

Figura 128-Valores de coeficiente de NASH (eixo y) das vazões médias observadas e estimadas (1998-2003) a partir do Modelo PARx definidos para cada Posto Base (eixo x).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

14. RESULTADOS E DISCUSSÕES: ESCALA DE CURTO PRAZO-CEARÁ

Este capítulo apresenta o resultado da previsão sazonal usando o método dos K-vizinhos para a bacia do Óros.

14.1. K-vizinhos

O modelo elaborado nesta seção tem por objetivo realizar a previsão de vazões na bacia do Óros de um dado ano, utilizando as anomalias de temperatura das superfícies do oceano Atlântico sul, oceano Atlântico norte e oceano pacífico do ano anterior ao da previsão, podendo ser de forma simplificada, representado como:

$$Q = f(TSM_{as}, TSM_{an}, TSM_p) \quad (71)$$

Foram elaborados inicialmente, modelos que utilizam como sinais de entrada as anomalias de temperaturas de quatro grupos de meses do ano: DJFM, AMJ, JAS e OND.

Os modelos atribuíram valores positivos a TSM do Atlântico Sul e valores negativos a temperatura do pacífico, conforme Figura 129. Enquanto o coeficiente da regressão do quadrimestre DJFM apresentou valores positivos para a TSM do Atlântico Norte, os demais períodos apresentaram valores negativos. O fato do período DJFM apresentar valores positivos tanto para o atlântico sul quanto para o norte, indica que com essa antecedência não é possível captar o sinal do dipolo do atlântico.

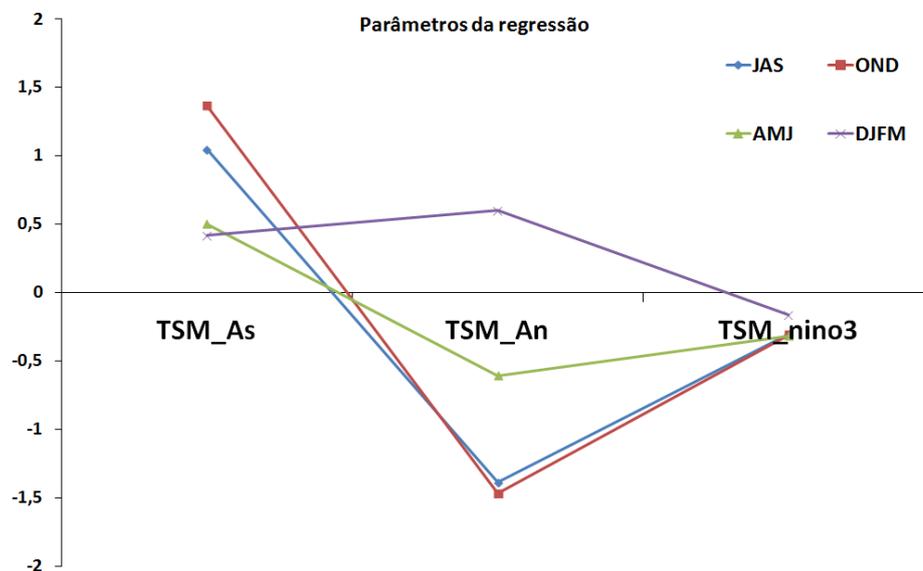
Para calibração dos parâmetros mostrados na Figura 129 foi utilizado à série de vazões de 1913 a 2000 do Óros, excluindo-se 10 anos usados na verificação das previsões selecionados aleatoriamente, conforme Tabela 25. A seleção obteve 6 anos secos, 2 normais e 2 chuvosos.

Tabela 25- Anos utilizados para verificação daa previsões, classificação por tercil(chuvoso-C, normal-N e seco-S), probabilidade de ocorrência de um ano igual ou inferior e vazões observadas.

ANO Previsto	OBS	Prob. Clima	Q(m ³ /s)
1914	C	74,58%	48,25
1928	S	32,60%	8,73
1943	N	39,67%	12,44
1953	S	20,07%	3,79
1954	S	16,09%	2,62
1959	S	31,57%	8,24
1961	N	52,03%	20,99
1971	S	25,36%	5,63
1991	S	29,46%	7,30
1997	C	66,04%	35,32

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 129-Valores dos coeficientes das variáveis usadas para construção do modelo K-vizinhos.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

O comportamento do modelo baseado na TSM do DJFM sugere inconsistência, já que na maioria dos anos previstos identificou o tercil chuvoso como o mais provável, conforme a Tabela 26 e a Tabela 27. Os modelos baseados nos trimestres OND e JAS, apesar de apresentar o tercil normal em todos os anos previstos, na maioria dos anos indicaram como segunda categoria mais provável a referente à observação.

O modelo baseado no trimestre AMJ identificou como mais provável, considerando os 20 anos mais próximos, nos anos de 1953 e 1954 o tercil seco e nos anos de 1914 e 1997 o tercil chuvoso. Nos anos chuvosos, esse tercil foi sinalizado com probabilidade superior a 50%. Admitindo que o tercil mais provável é observado na maioria dos casos, indica que esse modelo pode contribuir para previsão sazonal de vazões no Ceará.

O número de anos selecionados sob a suposição de serem mais prováveis mostra clara influência na geração dos tercís, conforme a Tabela 26 e a Tabela 27. Isto indica que algum critério deve ser adotado para limitar ou expandir o conjunto de cenários de anos prováveis. Ou ainda, ponderar a possibilidade de ocorrência do cenário de um ano anterior pela distância que se encontra das condições climáticas no momento da previsão.

Tabela 26- Probabilidade de cada tercil para o grupo de meses selecionados, considerando os 30 anos mais próximos das condições do ano previsto com a técnica dos K-vizinhos.

ANO Previsto	DJFM			AMJ			OBS
	S	N	C	S	N	C	
1914	33%	30%	37%	18%	37%	45%	C
1928	18%	36%	46%	31%	45%	25%	S
1943	18%	36%	46%	22%	47%	30%	N
1953	18%	36%	46%	27%	45%	28%	S
1954	28%	31%	41%	40%	41%	19%	S
1959	15%	43%	42%	38%	39%	22%	S
1961	16%	39%	45%	25%	50%	25%	N
1971	14%	41%	45%	23%	51%	26%	S
1991	17%	39%	44%	24%	41%	35%	S
1997	17%	37%	47%	13%	36%	51%	C
ANO Previsto	JAS			OND			OBS
	S	N	C	S	N	C	
1914	28%	36%	37%	28%	42%	30%	C
1928	34%	45%	21%	33%	44%	23%	S

1943	24%	44%	32%	20%	49%	31%	N
1953	31%	47%	21%	31%	48%	21%	S
1954	34%	44%	22%	33%	42%	25%	S
1959	34%	46%	20%	30%	42%	28%	S
1961	25%	53%	23%	18%	49%	32%	N
1971	26%	40%	34%	21%	48%	31%	S
1991	30%	45%	24%	25%	49%	26%	S
1997	19%	41%	40%	26%	47%	27%	C

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Tabela 27- Probabilidade de cada tercil para o grupo de meses selecionados, considerando os 30 anos mais próximos com a técnica dos K-vizinhos.

ANO Previsto	DJFM			AMJ			OBS
	S	N	C	S	N	C	
1914	23%	30%	47%	15%	34%	51%	C
1928	18%	34%	48%	17%	52%	31%	S
1943	18%	34%	48%	22%	58%	20%	N
1953	16%	34%	51%	20%	52%	28%	S
1954	20%	38%	42%	43%	39%	18%	S
1959	9%	39%	52%	39%	37%	24%	S
1961	20%	36%	44%	19%	51%	30%	N
1971	15%	40%	44%	21%	54%	25%	S
1991	24%	38%	39%	29%	45%	25%	S
1997	20%	40%	40%	14%	33%	53%	C
ANO Previsto	JAS			OND			OBS
	S	N	C	S	N	C	
1914	24%	37%	39%	29%	41%	29%	C
1928	40%	41%	20%	33%	49%	18%	S
1943	25%	49%	26%	16%	54%	30%	N
1953	31%	48%	21%	38%	45%	17%	S
1954	38%	45%	17%	32%	39%	29%	S
1959	39%	43%	18%	32%	46%	23%	S
1961	23%	51%	26%	18%	55%	26%	N
1971	18%	41%	41%	22%	45%	33%	S
1991	33%	47%	20%	25%	52%	23%	S
1997	13%	46%	41%	21%	47%	32%	C

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

15. METODOLOGIA: ESCALA CURTISSIMO PRAZO

Este capítulo apresenta uma metodologia verificação da previsão numérica do tempo de modelos regionais.

15.1. Características dos modelos regionais utilizados no SIN

Na implementação da técnica de previsão de tempo por conjunto para o setor elétrico do Brasil são testados os modelos regionais BRAMS (adaptado do modelo RAMS 6.0-*Regional Atmospheric Modeling System*) (PIELKE et al., 1992; COTTON et al., 2003) e o modelo ETA.

Os modelos regionais possuem condições iniciais e fronteiras do modelo global do CPTEC T126 com resolução horizontal 100 x 100 km e resolução vertical de 28 níveis. Esse modelo roda operacionalmente no CPTEC quatro vezes ao dia, às 00, 06, 12 e 18 UTC utilizando condição inicial do NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) (BONATTI, 1996).

O modelo Regional Eta é rodado operacionalmente no CPTEC em dois horários, 00 e 12 UTC para a América do Sul. Atualmente o Eta operacional possui resolução horizontal de 40 km e resolução vertical de 38 camadas, mais detalhes do modelo ver em Black (1994). As condições iniciais e de contorno são provenientes do modelo global do CPTEC/COLA T126 (CHOU, 1996 e 1999). As simulações inicializadas a partir das 00 UTC e com duração de 10 dias são utilizadas como dados de entrada em parte do planejamento energético atual pelo Organizador Nacional de Sistemas(ONS).

As demais simulações são implementações em fase de teste, no caso o modelo BRAMS com resolução de 15km e o modelo Eta também com resolução de 15km. Estas simulações recebem como condição de fronteira dados proveniente do modelo global do CPTEC T126, as rodadas são inicializadas as 00 UTC e tem duração de 10 dias.

15.2. Sistema de previsão numérica do tempo utilizado no Ceará

Na implementação da técnica de previsão de tempo por conjunto para o estado do Ceará, são utilizados os modelos regionais RAMS 6.0 (*Regional Atmospheric Modeling System*) (PIELKE et al., 1992) e WRF 3.1 (*Weather Research and Forecasting*), inicializados com dados dos modelos globais do Centro de Previsão de

Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) (T126L28) ou do *Global Forecast System* (GFS) (T382L64). O método empregado para geração do conjunto de previsões consiste na utilização de combinações de diferentes configurações físicas e distintas condições iniciais e fronteira para cada rodada dos modelos, originando assim um “super-ensemble” (SILVEIRA, 2009), conforme Tabela 28.

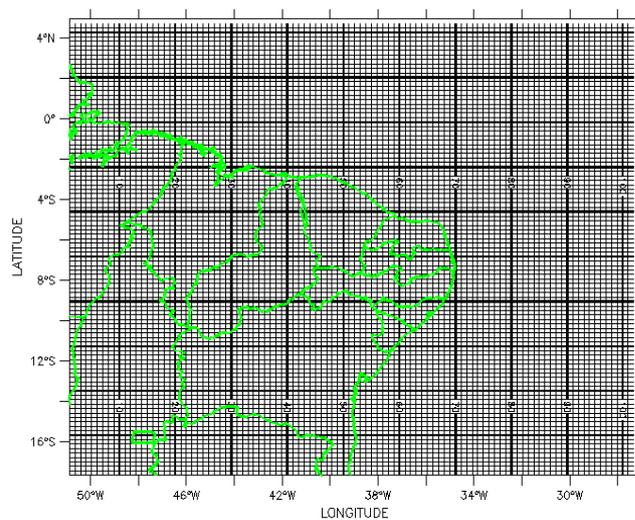
As previsões realizadas com os modelos regionais são efetuadas com grades horizontais de 115 por 115 pontos, com aproximadamente 25 km de espaçamento, centradas no estado do Ceará (39,0°W, 6,5°S), conforme indica a Figura 130. As mesmas cobrem grande parte do Nordeste Brasileiro, assim como uma porção do Oceano Atlântico. Os membros que utilizam o modelo regional RAMS foram obtidos com a combinação de duas opções de parametrização de convecção e duas fontes distintas de forçantes de grande escala, ao passo que aqueles que utilizam o modelo regional WRF foram obtidos com duas opções de parametrização de convecção a partir do mesmo forçante de grande escala.

Tabela 28-Membros do ensemble regional

Membro do ensemble	Modelo regional	Modelo global	Param. de convecção
RGKF	RAMS 6.0	GFS	Kain-Fritsch
RGKU	RAMS 6.0	GFS	Kuo
RCKF	RAMS 6.0	CPTEC	Kain-Fritsch
RCKU	RAMS 6.0	CPTEC	Kuo
WGKF	WRF 3.1	GFS	Kain-Fritsch
WGGR	WRF 3.1	GFS	Grell

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 130-Grade utilizada pelos modelos regionais.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

15.3. Período avaliado e dados de observação do modelo usados no SIN

Para a verificação proposta nesse trabalho foram consideradas as simulações dos modelos regionais Eta 40, Eta 15 e Brams. As previsões dos modelos foram comparadas a dados pluviométricos espalhados em todo o Brasil por bacia ou trecho. Será usado o valor médio entre os pluviômetros e o valor médio entre os pontos dos modelos regionais distribuídos dentro da bacia. Na Tabela 29 são mostrados o período avaliado e número de eventos disponíveis para avaliação por modelo.

Tabela 29 - Período de avaliação dos modelos e número de eventos avaliados.

	Período	Número de eventos
Modelo Eta 40	Jan/2006 a Fev/2012	322
Modelo Eta 15	Jan/2005 a Dez/2010	305
Modelo Brams	Jan/2005 a Dez/2010	305

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

15.4. Avaliação usando limiares

Assim como na grande maioria de estudos de verificação apresentados na literatura, a distribuição conjunta de probabilidades entre as previsões e as observações de chuva é descrita por frequências relativas das diferentes combinações possíveis entre previsão e observação.

Diversos livros e artigos descrevem detalhadamente os atributos de um bom sistema de previsão, e as métricas que devem ser utilizadas num estudo de verificação (WILKS, 2006; MURPHY, 1997 ; MURPHY e WRINKLER,1987; MOURA et al., 2010; MACHADO et al., 2010; SILVEIRA et al.,2010c ;SILVEIRA, 2011). Estas métricas seguem a estratégia de tentar descrever características da distribuição conjunta de probabilidades entre as previsões e as observações, e geralmente são termos, ou função de termos, que aparecem nas duas equações de fatoração da distribuição conjunta descritas acima. Não existe uma métrica única que consiga caracterizar de forma completa a distribuição conjunta entre previsão e observação. Daí a necessidade de utilização de diversas delas para avaliar a qualidade de um sistema de previsão.

Embora a precipitação seja uma variável contínua, o estudo de verificação baseia-se na previsão de variáveis discretas. Isto é feito dividindo a faixa de valores possíveis de precipitação em duas categorias, abaixo e acima de um valor limite pré-estabelecido. Portanto, a verificação é baseada em tabelas de contingência 2 x 2. O estudo irá avaliar o sistema de previsão para diferentes limites de precipitação, fornecendo uma ideia da capacidade do sistema em prever eventos de diferentes intensidades.

Na Tabela 30 é apresentado uma tabela de contingência 2 x 2, que expressa o número de vezes que ocorreram as diversas combinações entre previsão e observação. No caso específico de uma tabela 2 x 2, os valores possíveis de precipitação são divididos em duas categorias, abaixo de um limite pré-estabelecido, e acima deste limite. Os valores de a, b, c e d são utilizados para estimar as frequências relativas de cada uma destas combinações. A descrição das métricas apresentadas a seguir faz uso destes valores, conforme Wilks (2006).

Tabela 30 - Tabela de contingência 2 x 2.

Previsão	Observação	
	Sim	Não
Sim	a	b
Não	c	d

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

15.4.1 Índices Estatísticos

O *HeidkeSkill Score* (IH) é uma das estatísticas mais utilizadas para fornecer uma ideia da qualidade relativa de um sistema de previsão. O IH utiliza a proporção de acertos (H) como métrica para calcular a qualidade relativa do sistema de previsão. O padrão de referência mais frequentemente usado é a climatologia, mas o índice de Heidke (*IH*) é quase sempre associado à aleatoriedade (Murphy e Winkler, 1987). Este índice possui valores entre 1 e -1 que indicam, respectivamente, um modelo perfeito e um modelo incapaz de captar os fenômenos de precipitação, havendo ainda a total ausência de ganho em relação a aleatoriedade com um resultado igual a zero.

O IH é calculado segundo a equação 72,

$$IH = \frac{2(ad - bc)}{(a + c)(c + d) + (a + b)(b + d)} \quad (72)$$

A proporção de acerto H expressa à fração na qual o sistema de previsão acertou a faixa, ou categoria da chuva. Um sistema de previsão perfeito possui $H = 1$, ou seja, o evento nunca acontece sem que o sistema de previsão o tenha previsto. Obviamente que sistemas reais de previsão não são perfeitos, mas quanto maior o valor de H, menor é chance de a sociedade ser surpreendida por um evento que não tenha sido previsto.

A proporção de acerto (H) expressa à fração na qual o sistema de previsão acertou a faixa ou categoria de chuva. H é calculado segundo a Equação 73.

$$H = \left(\frac{a + d}{n} \right) \quad (73)$$

onde n é o número de dias do período de verificação. Se o sistema de previsão for perfeito, $H = 1$. A proporção de acertos não faz qualquer distinção entre acertar a precipitação acima de um limite pré-estabelecido e acertar a não ocorrência do evento. Segundo Murphy (1996), esta métrica não é interessante quando a probabilidade de ocorrência do evento que se deseja prever for pequena. Para este caso, um modelo que prevê sempre a não ocorrência do evento pode resultar num H bastante elevado. Porém,

em casos como este, obter um H maior não caracteriza muito bem o sistema de previsão, já que não há utilidade em prever sempre a não ocorrência de um evento.

A probabilidade de detecção (*POD*), conforme equação 74, representa a probabilidade do sistema prever a ocorrência do evento, dado que o evento de fato ocorreu. Um sistema de previsão perfeito possui $POD = 1$, ou seja, o evento nunca acontece sem que o sistema de previsão o tenha previsto.

$$POD = \left(\frac{a}{a+c} \right) \quad (74)$$

A taxa de alarme falso (*F*) representa a probabilidade condicional do sistema de previsão ter previsto chuva acima de um determinado limite pré-estabelecido, dado que a observação foi abaixo deste limite. Um sistema de previsão perfeito apresenta $F=0$, da mesma forma que se o sistema sempre indica que o evento vai ocorrer e ele não ocorre tem-se $F=1$. O valor de *F* é dado pela equação 75:

$$F = \left(\frac{b}{d+b} \right) \quad (75)$$

A razão de alarme falso (*FAR*) não deve ser confundida com a taxa de alarme falso (*F*), a *FAR* também representa uma probabilidade condicional, porém essa expressão indica a probabilidade de não observar chuva acima de um determinado limite, dado que o sistema de previsão previu chuva acima deste limite. A *FAR* é calculada segundo a equação 76,

$$FAR = \left(\frac{b}{a+b} \right) \quad (76)$$

A razão de *viés* indica uma possível tendência do sistema de previsão em superestimar ou subestimar os eventos de precipitação, sendo calculada como a razão entre o total de eventos previstos e o total de eventos observados, conforme Equação 77.

$$BIAS = \frac{a+b}{a+c} \quad (77)$$

De modo que $BIAS = 1$ significa que o sistema de previsão não é tendencioso, ou seja, não possui tendência a subestimar ou superestimar o número de eventos de precipitação acima do limiar estabelecido. Para *BIAS* maior que 1, o sistema de previsão tende a superestimar o número de eventos ocorrido para um dado limiar, assim como para *BIAS* menor que 1 o sistema tende a subestimar.

Para avaliação por limiares foram considerados cinco percentis por estação do ano (DJF, MAM, JJA e SON) no caso do SIN. Enquanto que para o Estado do Ceará foram considerados três limiares (1mm, 5mm e 10mm) apenas para o primeiro semestre do ano.

Para cada série observada do SIN por bacia foi feita um triagem onde foram selecionados todos os valores maiores ou iguais a 2 mm, após isso foram utilizados os percentis de 20% (P20), 40% (P40), 60% (P60), 80% (P80), e 90% (P90) da série histórica observada. Entretanto, os valores com precipitação abaixo de 2mm também são utilizados para a avaliação.

15.5. Avaliando o comportamento da série de precipitações modelada

Para esta avaliação foram consideradas todas as séries modeladas e observadas e foi avaliado o comportamento de superestimação e subestimação do sistema. As medidas estatísticas utilizadas, cujas definições estão indicadas a seguir, são: erro de viés (BIAS) e correlação (CORREL).

15.5.1 Índices estatísticos

O erro de viés (Bias Error) mede a tendência do modelo para superestimar ou subestimar uma variável, e é definido por:

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum (P - A) \quad (78)$$

onde n é o número total de observações/previsões e o índice P e A indicam o valor previsto e a análise verificada, respectivamente. Um valor positivo do erro de viés indica uma predisposição do modelo em superestimar uma variável particular. Reciprocamente, um valor negativo do erro de viés implica numa subestimação do modelo na avaliação de uma a variável.

A correlação pode assumir valores entre -1 e 1 que indicam, respectivamente, perfeita anticorrelação e perfeita correlação, havendo ainda a total ausência de correlação verificada com um resultado igual a zero. Este índice tem a capacidade de detectar correspondência de fase entre as séries, sendo, por construção, insensível a erros de viés.

$$CORREL = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (A_i - \bar{A})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^{i=n} (A_i - \bar{A})^2}} \quad (79)$$

15.6. Análise Multiobjetivo

Uma das ferramentas bastante utilizada para auxiliar em problemas de decisão é a análise Multicritério ou Multiobjetivo à Decisão. Esta abordagem sugere que, normalmente, não existe uma alternativa que seja a melhor em todos os critérios. Para aplicação do método serão considerados os diversos critérios de avaliação dos modelos, com pesos diferentes de acordo com a sua importância, conforme Tabela 31.

Tabela 31 - Pesos usados por critério na aplicação do método multiobjetivo.

Índices	p20	p40	p60	p80	p90
IH	2	2	2	1	1
H	2	2	1	1	1
POD	1	1	1	2	3
FAR	1	1	1	2	3
F	1	1	1	2	3
CORREL	3	-	-	-	-

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

O método utilizado será o Electre, conforme mencionado por Braga e Gobetti (1997) e descrito na seção 18.6.1.

15.6.1 Electre

15.6.1.1 Electre I

A ideia do método Electre I, é separar do conjunto total das alternativas aquelas que são preferidas na maioria dos critérios de avaliação, e que não causam um nível inaceitável de descontentamento nos outros critérios.

O método Electre I busca encontrar o menor conjunto possível de alternativas não dominadas referentes ao problema em questão. Para isso, são utilizados dois índices

básicos que medem a vantagem e a desvantagem de cada alternativa em relação às outras. São eles:

$C(a,b)$: Índice de concordância com a afirmativa aSb;

$D(a,b)$: Índice de discordância com a afirmativa aSb.

Esses índices são dados pelas equações 80 e 81.

$$C(a,b) = \frac{\sum (W^+ + 0,5W^-)}{\sum (W^+ + W^- + W^{--})} \quad (80)$$

Onde:

W^+ corresponde a soma dos pesos dos critérios para os quais **a** é preferível a **b**.

W^- corresponde a soma dos pesos dos critérios para os quais **a = b**.

W^{--} corresponde a soma dos pesos dos critérios para os quais **b** é preferível a **a**.

O índice de concordância pode ser entendido como uma porcentagem ponderada dos critérios para os quais a alternativa **a** é preferida a alternativa **b**.

O conceito de discordância é complementar ao de concordância e representa o desconforto experimentado na escolha da alternativa **a** sobre a alternativa **b**, e é determinada por:

$$D(a,b) = \max_{K \in I^-} \frac{|z_{(bK)} - z_{(aK)}|}{R^*} \quad (82)$$

Sendo: $R = Z_k^* \cdot Z_k^-$

Onde:

Z_{ak} avaliação de **a** em relação ao critério **k**.

Z_k^* melhor grau de avaliação obtido para o critério **k**.

Z_k^- pior grau de avaliação obtido para o critério **k**.

A relação de preferência é definida ao estabelecer-se valores limites (p,q), entre zero e um, tais que a alternativa **a** é preferida a alternativa **b**:

$$aSb \text{ se e somente se } \begin{cases} C(a,b) \geq p \\ D(a,b) \leq q \end{cases}$$

Para a análise em questão foi utilizado: p=0,80 e q=0,20.

15.6.1.2. Electre II

O procedimento de ordenação do método Electra II é formada por dois estágios: classificação progressiva e classificação regressiva. A classificação final é dada através da media das classificações obtidas em cada estagio.

Classificação Progressiva:

- 1- $G_F(t)$ é um subconjunto de G_r , onde $G_F(0) = G_F$; e $G_f(t)$ um subconjunto de G_f , onde $G_f(0) = G_f$, fixa-se $t=0$.
- 2- Selecionam-se os nós não dominados em $G_F(t)$. Denota-se este conjunto por C .
- 3- Selecionam-se os nós em C não dominados em $G_f(t)$. Denota-se este conjunto por $A(t)$.
- 4- Obtém-se uma classificação para cada $x \in A(t)$ mediante:

$$v'(x) = t + 1 \quad (84)$$

- 5- Reduzem-se os conjuntos $G_F(t)$ e $G_f(t)$ a partir de:

$$G_F(t+1) = G_F(t) - A(t) \quad (85)$$

$$G_f(t+1) = G_f(t) - A(t) \quad (86)$$

- 6- Se $G_F(t+1)$ for conjunto vazio, o processo pára. Caso contrário, $t=t+1$ e o processo repete a partir do passo 2.

Classificação Regressiva

- 1- Revertem-se as direções das setas em G_F e G_f .
- 2- Obtém-se uma classificação $a(x)$, do mesmo modo que $v'(x)$.
- 3- Reajusta-se a classificação fazendo:

$$v''(x) = 1 + a_{max} - a(x), \forall x \in X \quad (14)$$

Onde X é o conjunto de todas as alternativas, e $a_{max} = \max_{x \in X} a(x)$

A classificação final das alternativas, $\bar{v}(x)$ é calculada definindo a função $m(x)$ como:

$$m(x) = \frac{v' + v''}{2}, \forall x \in X \quad (87)$$

E ordenado de forma crescente os valores dados por $m(x)$.

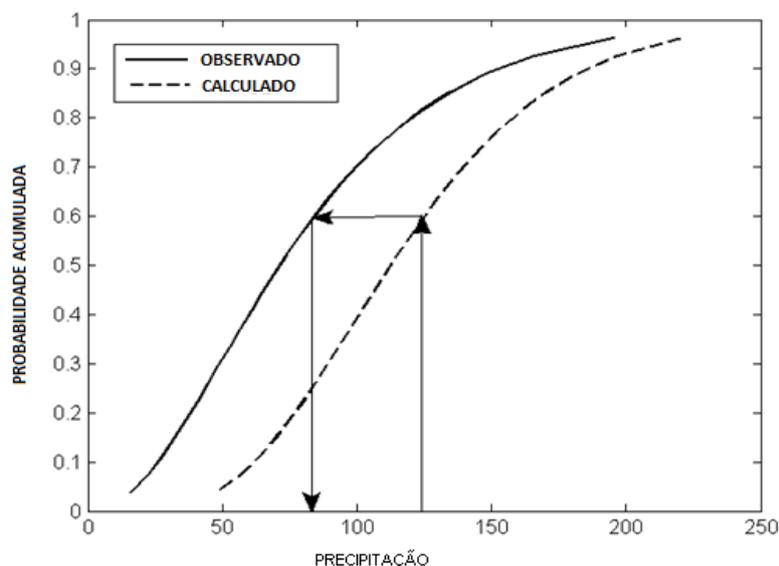
15.7. Proposição de Correções Estatísticas

15.7.1 Correção via CDF empírica (EMP)

Para a correção estatística das previsões modeladas de precipitação foi utilizado um ajuste de viés com base na função de distribuição de probabilidades empírica. A Figura 131 descreve a relação entre a probabilidade acumulada e a precipitação, e indica o funcionamento desta correção. Para valores que possuem a mesma probabilidade de acontecer na curva modelada e observada, atribui-se a chuva prevista o

valor observado. Esta correção é razoável para modelos que possuem uma clara tendência de viés de superestimação ou subestimação.

Figura 131 - Correção de viés via CDF observada x modelada.



Fonte:Elaborada pelo próprio autor.

Este ajuste foi realizado considerando a série dividida por estações do ano (DJF, MAM, JJA e SON).

15.7.2 Correção via CDF Gama (GAMA)

Um modelo probabilístico muito atraente para a representação de variáveis hidrológicas, que apresentam versatilidade de formas e coeficientes de assimetria variáveis, é a distribuição gama. Esse modelo possui numerosas aplicações bem sucedidas em modelagens de vazões, porém, a distribuição gama também pode ser usada para análises de precipitação de duração diária, semanal, mensal e anual. Para a correção gama foi utilizado um ajuste de viés seguindo os seguintes passos:

- 1º - Ajuste da distribuição gama para os dados observados;
- 2º - Ajuste da distribuição gama para os dados de precipitação dos modelos para identificar o problema do ajuste no viés;
- 3º - Correção das precipitações do modelo;

Este ajuste foi realizado considerando a série dividida por estações do ano (DJF, MAM, JJA e SON) e por dia simulado.

A correção é semelhante à proposta na secção 18.7.1 e segue o modelo da figura 17, porém é usada uma função de distribuição gama.

15.7.3 Correção via razão precipitação observada e modelada por estação do ano (RAZÃO)

Este modelo de correção consiste em obter os somatórios da precipitação observada e modelada por trimestre e em seguida obter a razão entre os mesmos por estações do ano. A precipitação obtida pelo modelo é multiplicada por esta razão. Conforme equação 88:

$$P_{cor_j}^k = P_{sc_j}^k \cdot \frac{\sum_{i=1}^{i=n} P_{obs_j}^i}{\sum_{i=1}^{i=n} P_{sc_j}^i} \quad (88)$$

Onde $P_{cor_j}^k$ é a precipitação corrigida do dia k do trimestre j e $P_{sc_j}^k$ é a precipitação modelada sem correção no dia k do trimestre j.

Sendo $P_{obs_j}^i$ a precipitação observada no dia i do trimestre j e $P_{sc_j}^i$ a precipitação modelada sem correção no dia i do trimestre j. Já n é o número de dias dos trimestres usados para correção (todas as previsões inicializadas dentro do trimestre não pertencente o trimestre atualmente avaliado).

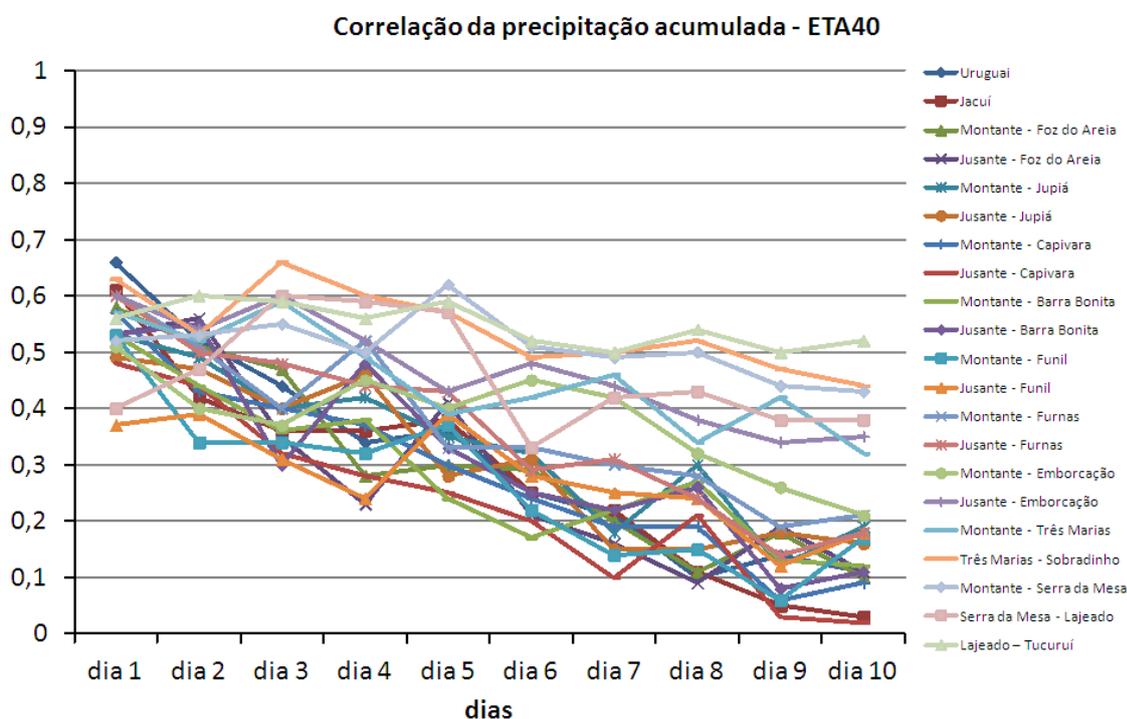
16. RESULTADOS: ESCALA DE CURTISSIMO PRAZO - SIN

Neste capítulo é apresentado os resultados da verificação da previsão numérica do tempo do setor elétrico do Brasil. Destaque para o uso da ferramenta ELECTRE multicritério.

16.1. Análise da Previsão diária do modelo ETA40

Na Figura 132 é mostrada a correlação para o modelo ETA 40 para toda a série de precipitação separada por dia. Há uma redução da qualidade de precipitação diária a medida que se aumenta o horizonte de previsão. Porém, para os trechos que compõe a Bacia do Tocantins as correlações são aproximadamente 0,5 depois de 10 dias. De forma geral, as melhores correlações são obtidas para a região da bacia do Tocantins e na Bacia do São Francisco, no trecho entre Três Marias e Sobradinho.

Figura 132 - Correlação entre as séries de precipitação diária (em mm) do modelo ETA40 sem correção e observada para cada bacia avaliada.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

16.2. Análise da Previsão Acumulada do modelo ETA40

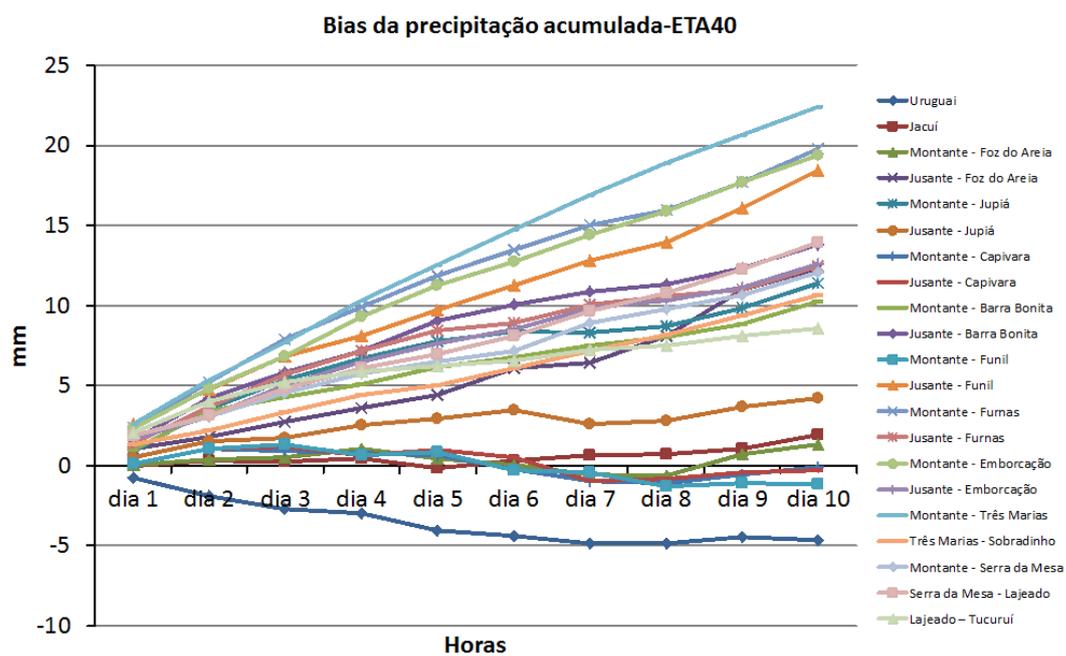
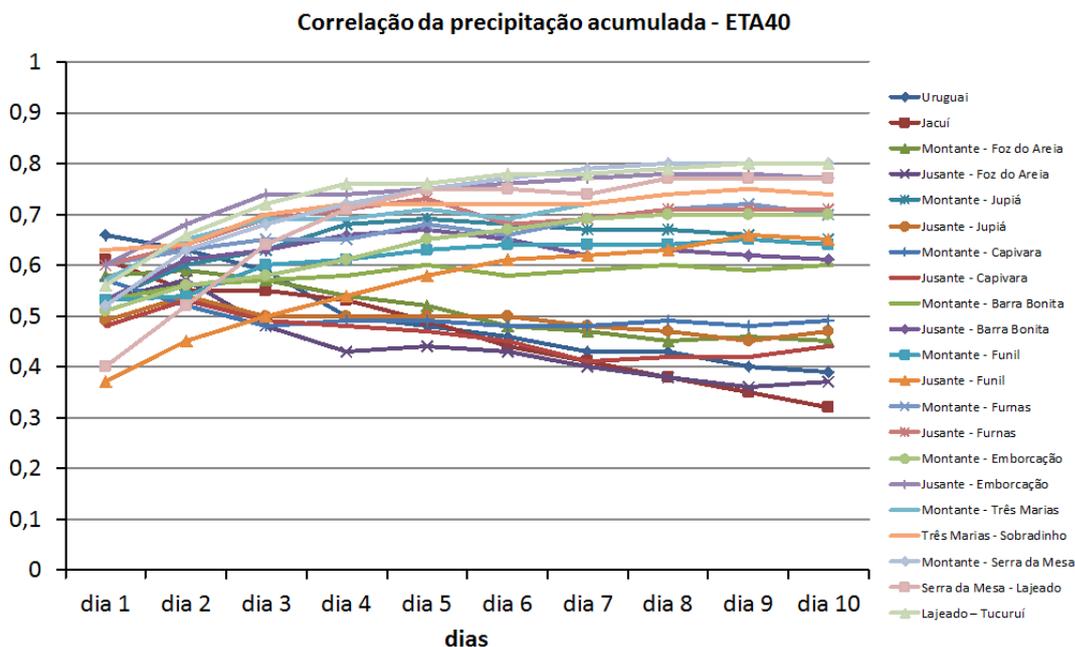
Na Figura 133 é mostrada a correlação e o BIAS para precipitação acumulada ao longo dos dias para todas as regiões avaliadas para o modelo regional ETA40. Para praticamente todas as bacias verifica-se um crescimento sistemático do erro de viés com o aumento do horizonte de previsão. Para as bacias do Uruguai, Jacuí, Jusante-Foz do Areia, Montante-Foz do Areia, Jusante-Capivara, Montante-Capivara e Jusante-Jupiá há uma crescente queda da correlação para horizontes superiores a 3 dias de precipitação acumulada.

A Figura 134 mostra a correlação entre as séries observada e modelada de precipitação acumulada de 10 dias, há uma acentuada dificuldade do modelo ETA 40 nas bacias que se encontram no setor mais a sul do Brasil, com correlações inferiores a 0,3 em alguns trechos.

As Figuras 133 (b) e 135 indicam que o modelo ETA 40 possui um sistemático viés positivo para maioria das bacias, exceto para bacia do Uruguai onde o mesmo apresenta viés negativo em todos os dias e para as bacias do Jacuí, Montante-Foz do Areia, Montante-Capivara, Jusante-Capivara e Montante-Funil, com viés praticamente inexistente.

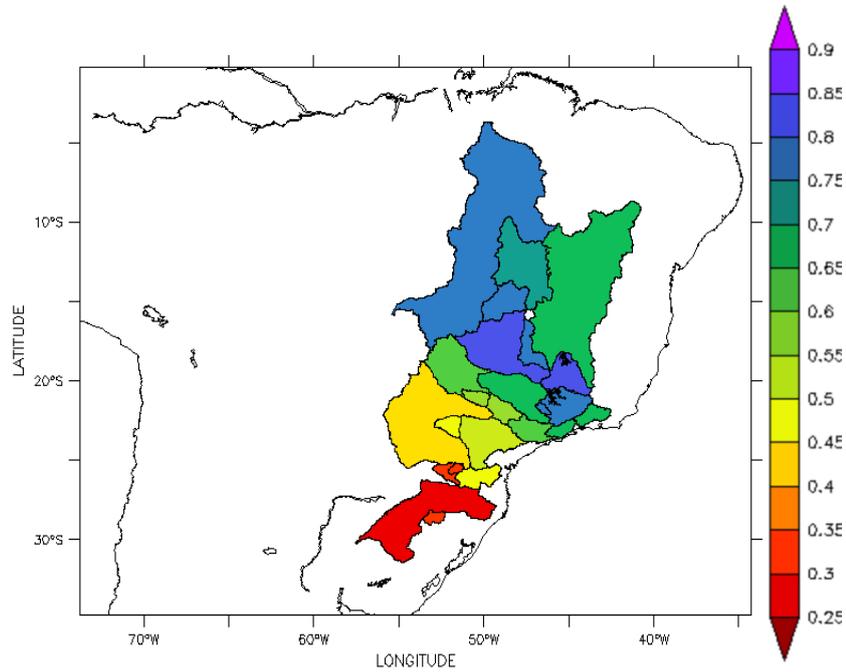
Considerando os resultados mostrados na seção 13.1 para previsão diária em comparação aos mostrados nessa seção, o modelo ETA 40 provavelmente desloca os eventos de precipitação em algumas horas ou dias, já que o rendimento é consideravelmente melhor para a maioria das bacias avaliadas ao considerar a precipitação acumulada.

Figura 133 - (a) Correlação e (b) Bias entre as séries de precipitação acumulada (em mm) do modelo ETA40 sem correção e observada para cada bacia avaliada.



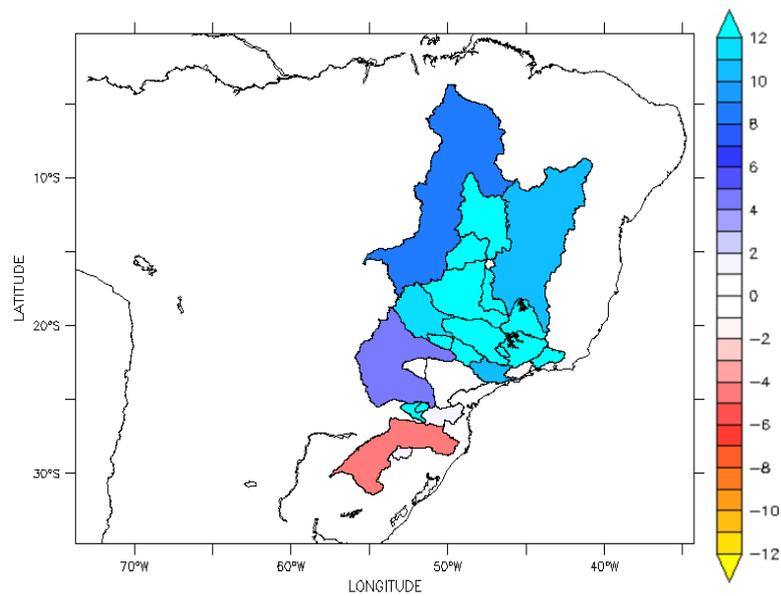
Fonte :Elaborada pelo próprio autor.

Figura 134 - Correlação entre as séries de precipitação acumulada de 10 dias do modelo ETA-40 e observada para cada bacia avaliada.



Fonte :Elaborada pelo próprio autor.

Figura 135 – BIAS entre as séries de precipitação acumulada 10 dias (em mm) do modelo ETA-40 e observada para cada bacia avaliada.

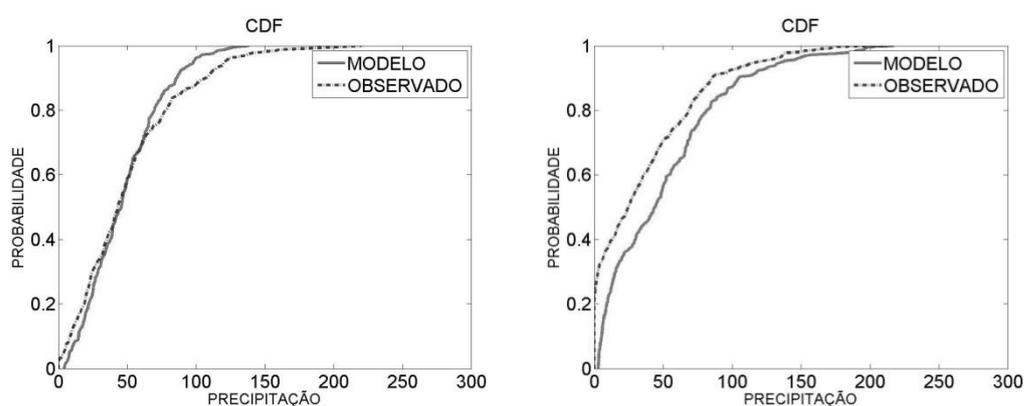


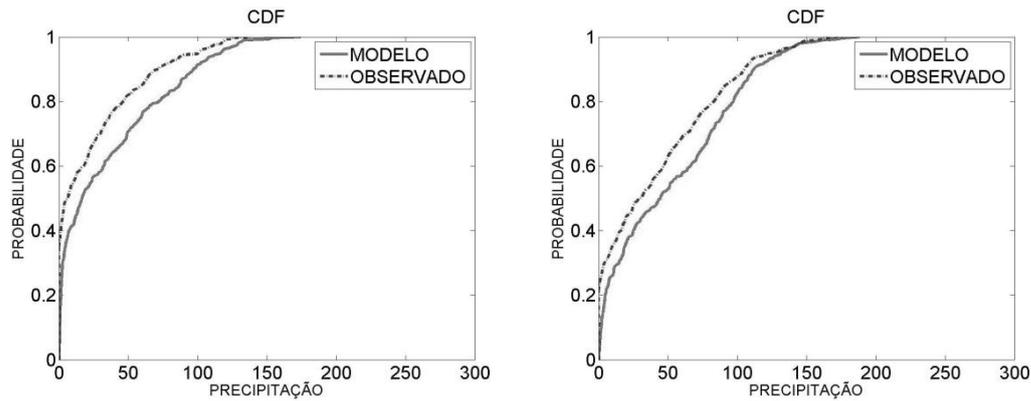
Fonte : Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 136 são mostradas as Funções de Distribuição de Probabilidades Acumuladas (CDF) da precipitação modelada em comparação à observada obtida pelo modelo ETA 40 sem correção para a bacia do Uruguai, Bacia do Grande- Trecho: Jusante Furnas, Bacia do São Francisco – Trecho: Três Marias – Sobradinho e Bacia do Tocantins- Trecho: Lajeado – Tucuruí. Na bacia do Uruguai, o modelo superestima os eventos de menor intensidade e subestima número de eventos de maior intensidade, isto leva a um comportamento muito peculiar que indica que o mesmo apresenta um alto falso alarme para evento de menor chuva e uma baixa probabilidade de detecção para eventos extremos. Nas demais regiões mostradas, a comparação entre as CDFs modelada e observada evidencia o comportamento de superestimação do modelo, este comportamento leva o sistema de previsão ter uma alta taxa de falso alarme e razão de falso alarme.

O comportamento mostrado na bacia do Uruguai é semelhante ao da Bacia do Jacuí, bacia do Iguaçu- Trecho: Montante Foz de Areia e nos trechos da Bacia do Paranapanema e Paraná. Enquanto as demais regiões, apresentam comportamento semelhante à Bacia do Grande e São Francisco.

Figura 136 - Função de distribuição de Probabilidades Acumuladas dos eventos de precipitação acumulada de 10 dias (em mm) do modelo ETA 40 sem correção e a observação para as regiões: (a) bacia do Uruguai; (b) Bacia do Grande- Trecho: Jusante Furnas; (c) Bacia do São Francisco – Trecho: Três Marias – Sobradinho e (d) Bacia do Tocantins- trecho: Lajeado – Tucuruí.



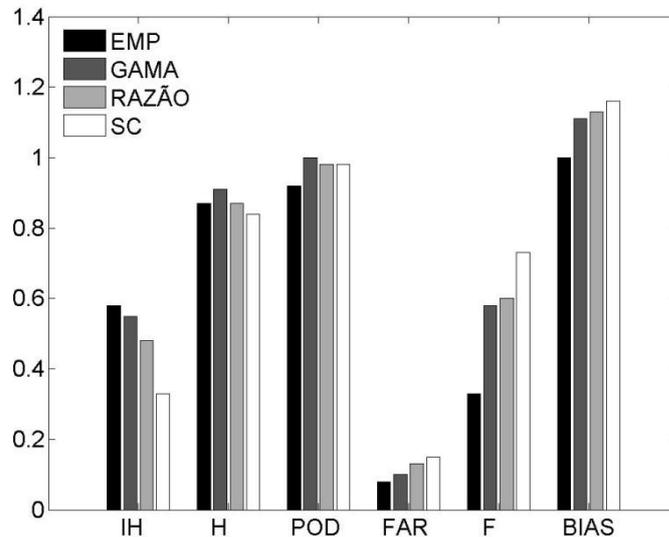


Fonte : Elaborada pelo próprio autor.

16.3. Comparação entre as metodologias de correção de viés para o modelo ETA40

Na Figura 137 é mostrada uma comparação do modelo ETA sem correção (SC) e com correção via função de distribuição gama, distribuição empírica e via razão precipitação observada e modelada para o limiar P20 para o trimestre DJF para o trecho Jusante Furnas da bacia do Grande. As correções reduzem o FAR e o F, diminuindo também o comportamento de superestimação do modelo nessa bacia, praticamente removendo os erros sistemáticos de viés, fazendo com que a razão *bias* seja reduzida à aproximadamente a unidade ($BIAS = 1$). Esse comportamento é repetido em vários dos limiares e trechos de bacias avaliadas.

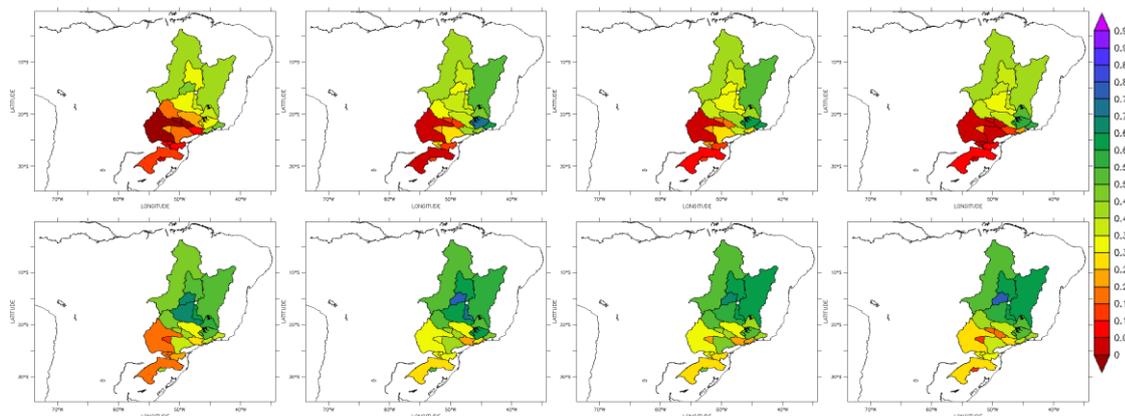
Figura 137 - Índices estatísticos obtidos pelo modelo ETA 40 para precipitação acumulada de 10 dias para o trimestre DJF para bacia do Grande- Jusante Furnas para o limiar P20. Onde SC é modelo ETA 40 sem correção.



Fonte : Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 138 é mostrado o IH do modelo ETA-40 para cada uma das bacias estrechos avaliados neste trabalho para os percentis de P20 e P80 para cada metodologia de correção e o modelo sem correção para os trimestres DJF e MAM, respectivamente. O modelo, mesmo com correção, mostra dificuldade em algumas bacias da região Sul e Sudeste, com IH inferior a 0,25 em alguns trechos para P20 do trimestre DJF. Porém, para o trimestre MAM as correções estatísticas melhoram consideravelmente o IH em praticamente todo o domínio avaliado.

Figura 138 - Índice de Heidke. Na primeira linha é mostrado o IH para o trimestre DJF para o limiar P20 para o modelo ETA40 na sequência SC, EMP, GAMA e RAZÃO. Na segunda linha o limiar P80 do trimestre MAM na mesma sequência da primeira linha, ambos para precipitação acumulada de 10 dias.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na figura 139 são mostrados os índices obtidos pelo modelo ETA 40 para a bacia do Uruguai, Bacia do Grande- Trecho: Jusante Furnas, Bacia do São Francisco – Trecho: Três Marias – Sobradinho e Bacia do Tocantins- Trecho: Lajeado – Tucuruí. À medida que o limiar de chuva adotado na construção da tabela de contingência aumenta, a qualidade das previsões diminui. Isso porque há uma gradual redução da probabilidade de detecção associado a um aumento da taxa de falso alarme. Para o limiar P20 o modelo apresenta uma probabilidade de detecção superior a 0,8 e um FAR inferior a 0,20, o que indica que o modelo é eficiente na informação chuva e não chuva. Porém, para eventos de maiores intensidades, como o limiar P80, a alta taxa de falso alarme, aproximadamente 0,40, reduz a confiabilidade do sistema de previsão para eventos extremos.

O modelo com correção via razão de precipitações observada e modelada tende a reduzir o FAR na maioria das bacias em relação ao modelo não corrigido, porém essa diminuição reduz o BIAS a valores inferiores a 1, principalmente para os percentis de maior intensidade. O que do ponto de vista da detecção de eventos extremos é muito ruim, tornando o POD inferior às demais metodologias.

Na bacia do Uruguai os modelos mostram índice de acerto inferior aos demais trechos, aproximadamente 0,70, enquanto nas demais essa métrica é superior a 0,80 para todos os trimestres e limiares P20 e P80. Neste trecho, fica evidente a adequação das correções à região mais ao sul domínio, com os melhores valores de H, POD e FAR

em praticamente todos os limiares e trimestres. Esse comportamento se repete na Bacia do Jacuí e Iguçu. As correções aumentam o POD e tornam o BIAS mais próximo da unidade, reduzindo o comportamento de subestimação deste modelo regional nesta bacia.

Enquanto, no trecho a Jusante de Furnas da Bacia do Grande o modelo sem correção mostra-se pouco eficiente nos trimestres JJA e SON, apresentando BIAS aproximadamente 3 para o limiar P80. O índice de acerto do modelo sem correção para o limiar de P80 é inferior ao modelo corrigido em todos os trimestres, esse comportamento impacta o FAR, que também é pior para o modelo sem correção.

Já nos trechos Três Marias- Sobradinho da Bacia do São Francisco e Lajeado – Tucuruí da Bacia do Tocantins o modelo corrigido via função de distribuição empírica e via distribuição de probabilidade gama melhoram o índice de acerto para praticamente todos os limiares e trimestres. Para os trimestres DJF e MAM e para o limiar P20 o modelo corrigido mostrou probabilidade de detecção aproximadamente 0,9 associado a um FAR de em torno de 0,10, indicando que esse sistema de previsão é eficiente para captar eventos de menor intensidade.

Apesar de não possuir os melhores índices para todas as bacias, as correções EMP e GAMA melhoram a razão de BIAS e o FAR do modelo sem correção na maioria dos trechos.

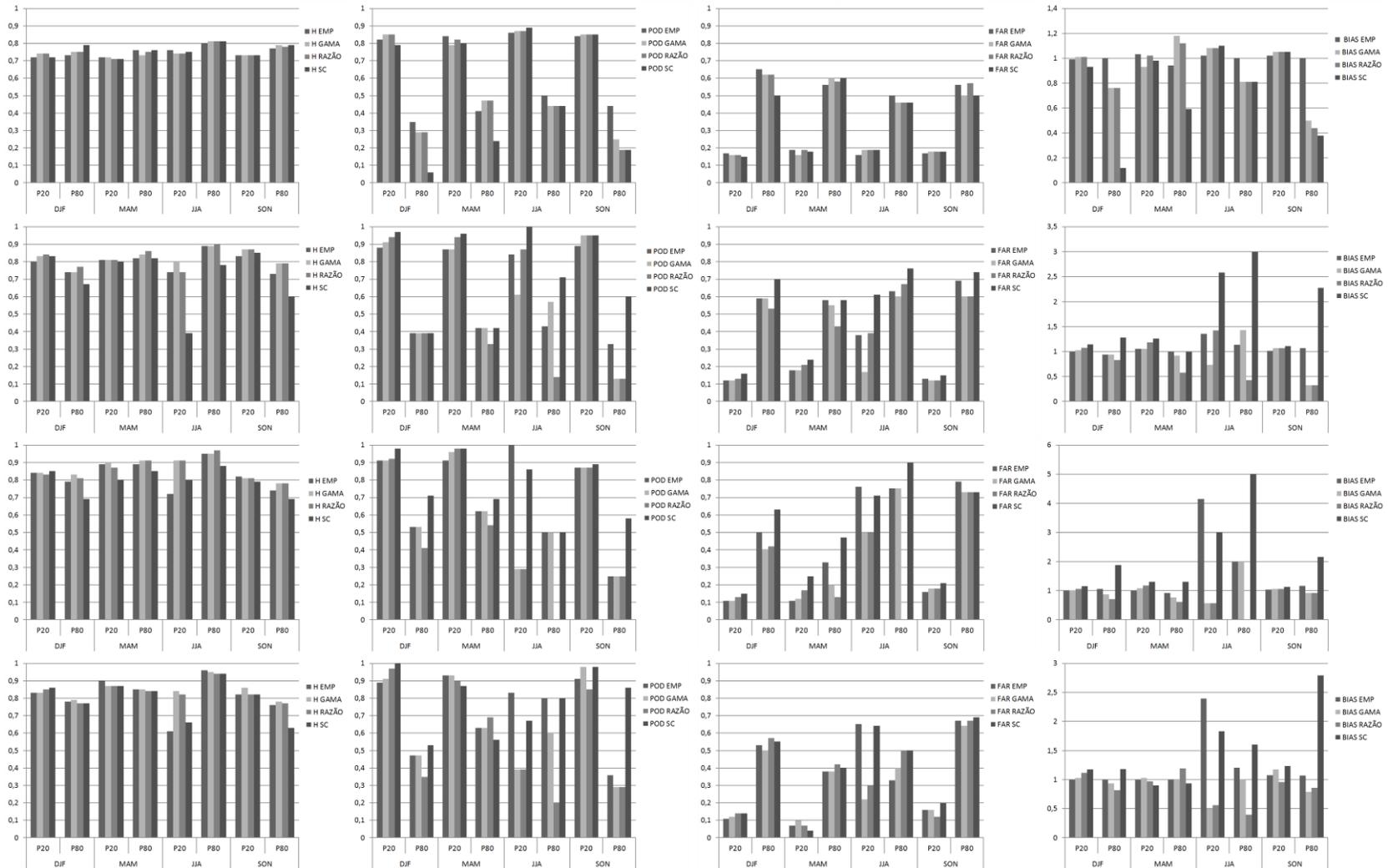
Na Tabela 32 é mostrada a classificação dos tipos de previsões usando correção estatística de viés do modelo ETA40 para a precipitação acumulada de 10 dias usando o método Electre II para as regiões avaliadas neste trabalho. As correções tendem a melhorar os índices obtidos nas previsões sem correção. Segundo esse método, não é possível identificar uma metodologia que seja melhor em todas as bacias e trimestre. Para os trimestres MAM e JJA fica evidente a eficiência das correções, sendo o modelo sem correção classificado em quarto lugar em vários trechos.

Para o trimestre MAM nenhuma das correções (EMP e GAMA) e o modelo sem correção é melhor do que a correção empírica em nenhum dos trechos. Porém no trimestre SON essa correção apresenta-se pior do que as demais, segundo o método ELECTRE II.

Para a Bacia do Tocantins, em todos os trechos, as previsões corrigidas via função de distribuição empírica mostram-se melhores do que os demais métodos para os trimestres DJF, MAM e JJA.

Na bacia do São Francisco nos trimestres MAM e JJA o modelo sem correção ocupa a quarta colocação em todos os trechos, isto mostra a necessidade do tratamento estatístico na saída do modelo regional nessa região.

Figura 139 - H, POD, FAR e BIAS das regiões:(a) bacia do Uruguai; (b) Bacia do Grande- Trecho: Jusante Furnas; (c) Bacia do São Francisco –Trecho: Três Marias – Sobradinho e (d) Bacia do Tocantins- trecho: Lajeado – Tucuruí.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Tabela 32 - Classificação das alternativas de correção de viés da precipitação acumulada de 10 dias do modelo ETA 40(EMP/GAMA/RAZÃO/SC) usando o método Electre.

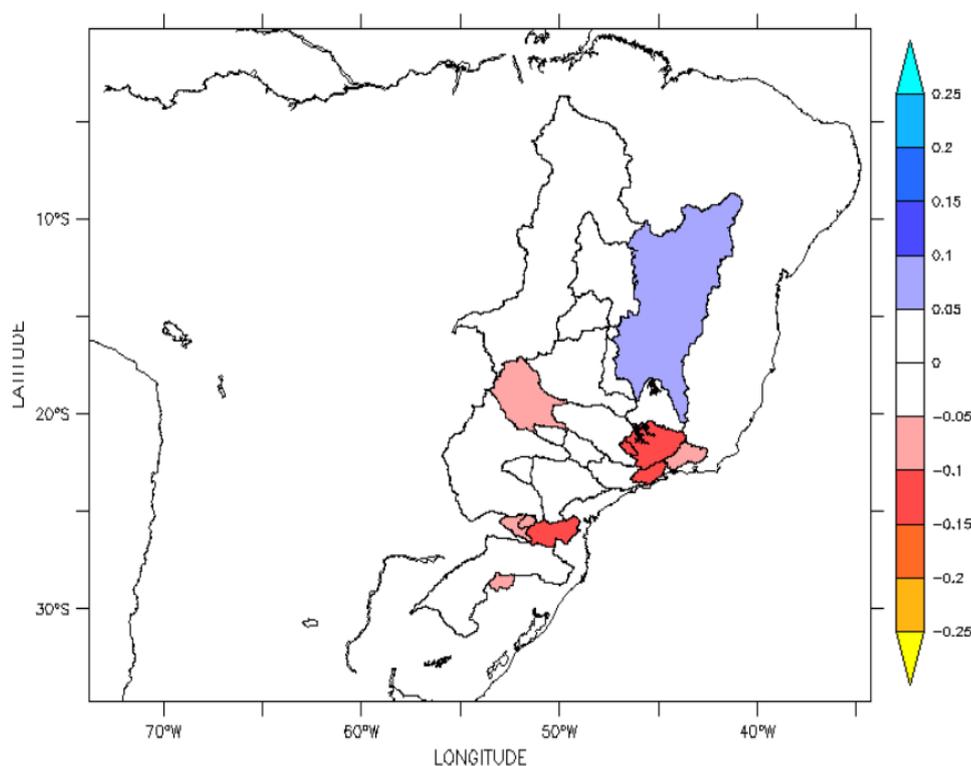
Bacia		DJF				MAM				JJA				SON			
	Trecho	EMP	GAMA	RAZÃO	SC												
Uruguai		4	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Jacuí		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Iguaçu	Montante - Foz do Areia	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	4	1	3	1
	Jusante - Foz do Areia	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	2
Paraná	Montante - Jupia	3	1	1	3	1	1	1	4	1	1	4	1	1	1	1	1
	Jusante - Jupia	1	1	1	4	1	1	1	4	1	1	4	1	1	1	1	1
Parapanema	Montante - Capivara	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1	4	1	1	4	1
	Jusante - Capivara	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tietê	Montante - Barra Bonita	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	4	1	1	1	4
	Jusante - Barra Bonita	1	1	1	1	1	1	1	4	1	1	4	1	3	3	1	1
Paraíba do Sul	Montante - Funil	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	4	1	1	1
	Jusante - Funil	1	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1
Grande	Montante - Furnas	1	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1
	Jusante - Furnas	1	1	1	1	1	1	1	4	1	1	3	3	1	1	1	1
Paranaíba	Montante - Emborcação	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	4	1	4	1	1
	Jusante - Emborcação	1	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1
São Francisco	Montante - Três Marias	1	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	4	1	1	1	1
	Três Marias - Sobradinho	4	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	4	4	1	1	1
Tocantins	Montante - Serra da Mesa	1	4	1	3	1	1	3	4	1	1	3	3	4	1	1	1
	Serra da Mesa – Lajeado	1	2	2	4	1	1	1	4	1	1	1	1	1	4	1	1
	Lajeado – Tucuruí	1	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1	4	1	1	1	4

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

16.4. Comparação entre os modelos ETA40 e ETA15

Na Figura 140 é mostrada uma comparação entre a correlação dos modelos ETA-15 e ETA40 para precipitação acumulada nos 10 dias para todas as regiões avaliadas, dada pela subtração do valor absoluto das correlações (ETA15 – ETA40). Para praticamente todas as bacias verifica-se que as diferenças de correlações são pouco significativas.

Figura 140 - Comparação entre a correlação dos modelos ETA-15 e ETA40 para precipitação acumulada nos 10 dias para todas as regiões avaliadas, dada pela subtração do valor absoluto das correlações (ETA15 – ETA40).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Na Tabela 33 é mostrada a classificação dos modelos ETA40 e ETA15 com correção EMP usando o método Electre II para as regiões avaliadas neste trabalho. As semelhanças entre as previsões dos modelos ETA 15 e ETA 40 ficam evidentes, visto que não é possível identificar o ganho produzido na maioria das bacias e trimestre. A relação de dominação de um modelo sobre outro só aparece no trimestre JJA, onde o modelo ETA-40 domina o ETA-15 em algumas bacias mais Sul do domínio.

Tabela 33 - Classificação das alternativas (ETA15/ETA40) usando o método Electre II.

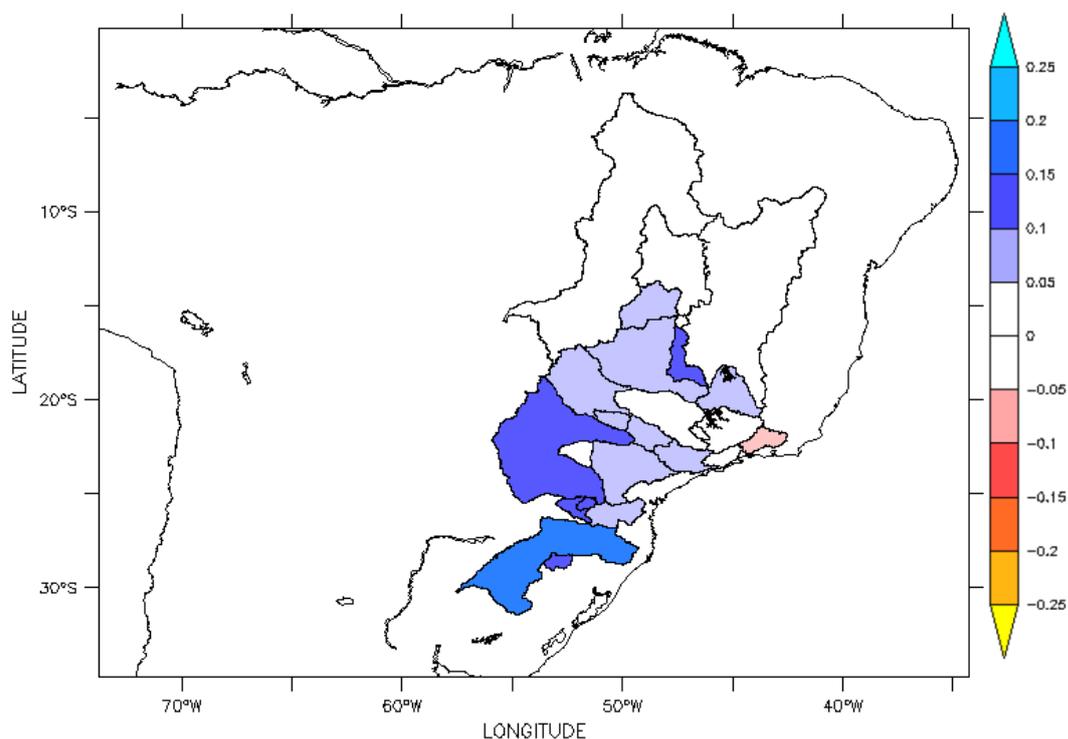
Bacia	Trecho	DJF		MAM		JJA		SON	
		ETA 40	ETA 15						
Uruguai		1	1	1	1	1	2	1	1
Jacuí		1	1	1	1	1	1	1	1
Iguaçu	Montante - Foz do Areia	1	1	1	1	1	2	1	2
	Jusante - Foz do Areia	1	1	1	1	1	2	1	1
Paraná	Montante - Jupia	1	1	1	1	1	2	1	2
	Jusante - Jupia	1	1	1	1	1	1	1	1
Parapanema	Montante - Capivara	1	1	1	1	1	1	1	1
	Jusante - Capivara	1	1	2	1	1	1	1	1
Tietê	Montante - Barra Bonita	1	1	1	1	1	1	1	1
	Jusante - Barra Bonita	1	1	2	1	1	2	1	1
Paraíba do Sul	Montante - Funil	1	1	1	1	1	2	1	1
	Jusante - Funil	1	1	1	1	1	1	1	2
Grande	Montante - Furnas	1	1	1	1	1	2	1	1
	Jusante - Furnas	1	1	1	1	1	1	1	1
Paranaíba	Montante - Emborcação	1	1	1	1	1	1	1	1
	Jusante - Emborcação	1	1	1	1	1	1	1	1
São Francisco	Montante - Três Marias	1	1	1	2	1	1	1	2
	Três Marias - Sobradinho	1	1	2	1	1	1	1	1
Tocantins	Montante - Serra da Mesa	1	1	1	1	1	1	1	2
	Serra da Mesa - Lajeado	1	1	1	1	1	1	1	1
	Lajeado - Tucuruí	1	1	1	1	1	1	1	1

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

16.5. Comparação entre os modelos ETA15 e BRAMS

Na Figura 141 é mostrada uma comparação entre a correlação dos modelos ETA-15 e BRAMS para precipitação acumulada ao longo dos dias para todas as regiões avaliadas, dada pela subtração do valor absoluto das correlações (ETA15 – BRAMS). O modelo ETA-15 apresenta melhores correlações, principalmente na sub-bacias e bacias do setor sul do domínio.

Figura 141 - comparação entre a correlação dos modelos ETA-15 e BRAMS para precipitação acumulada ao longo dos dias para todas as regiões avaliadas, dada pela subtração do valor absoluto das correlações (ETA15 – BRAMS).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Na Tabela 34 é mostrada a classificação dos modelos ETA15, BRAMS e ensemble médio dos membros com correção EMP usando o método Electre II para as regiões avaliadas neste trabalho. Neste caso, a relação de dominação de um modelo sobre o outro varia sazonalmente e por região.

Nos trimestres DJF e JJA o modelo ETA-15 é melhor nas bacias da região sul e sudeste do país, enquanto o BRAMS é melhor na região norte e nordeste. Já nos trimestres MAM e SON o comportamento é invertido.

Tabela 34 - Classificação das alternativas (ETA15/BRAMS/EM) usando o método Electre II.

Bacia		DJF			MAM			JJA			SON		
	Trecho	ETA-15	EM	BRAMS									
Uruguai		1	2	3	2	2	1	1	1	3	2	2	1
Jacuí		1	2	3	2	2	1	1	2	3	2	2	1
Iguaçu	Montante - Foz do Areia	1	2	3	2	2	1	1	1	3	2	2	1
	Jusante - Foz do Areia	1	1	3	3	1	1	1	2	2	3	1	1
Paraná	Montante - Jupia	1	2	2	1	1	1	1	2	2	3	1	1
	Jusante - Jupia	1	2	2	3	1	1	1	2	3	2	2	1
Parapanema	Montante - Capivara	1	1	3	2	2	1	1	1	3	2	2	1
	Jusante - Capivara	1	1	3	2	2	1	1	1	3	2	2	1
Tietê	Montante - Barra Bonita	1	2	3	2	3	1	1	1	2	2	2	1
	Jusante - Barra Bonita	1	1	3	2	2	1	1	1	3	2	2	1
Paraíba do Sul	Montante - Funil	1	2	3	2	3	1	1	2	3	2	2	1
	Jusante - Funil	1	2	3	2	2	1	1	2	3	2	2	1
Grande	Montante - Furnas	1	1	3	2	3	1	3	1	1	1	2	2
	Jusante - Furnas	3	1	1	1	2	3	1	1	3	2	2	1
Paranaíba	Montante - Emborcação	1	1	3	1	2	3	1	1	3	2	2	1
	Jusante - Emborcação	1	1	3	2	2	1	1	1	3	1	1	3
São Francisco	Montante - Três Marias	2	2	1	1	1	3	2	2	1	1	1	3
	Três Marias - Sobradinho	2	2	1	1	2	3	2	2	1	2	1	2
Tocantins	Montante - Serra da Mesa	2	2	1	1	1	3	2	2	1	2	1	3
	Serra da Mesa - Lajeado	2	2	1	1	2	3	3	2	1	1	1	3
	Lajeado – Tucuruí	2	3	1	3	2	1	1	2	2	3	1	1

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

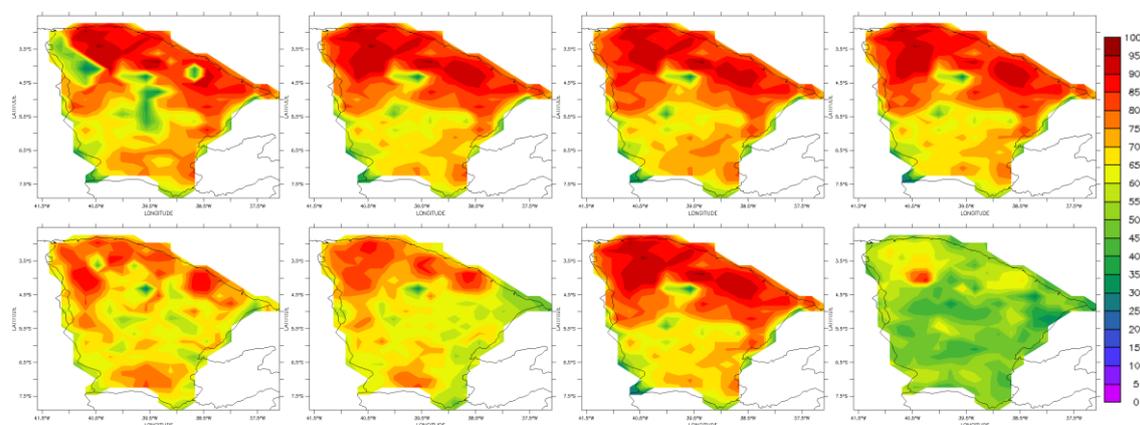
17. RESULTADOS: ESCALA DE CURTISSIMO PRAZO - CEARÁ

Neste capítulo são mostrados os resultados da verificação da previsão numérica do tempo dos modelos regionais disponibilizados pela FUNCEME para o Ceará. A princípio é feito uma avaliação por ponto de grade e em seguida uma verificação para as regiões homogêneas do Ceará.

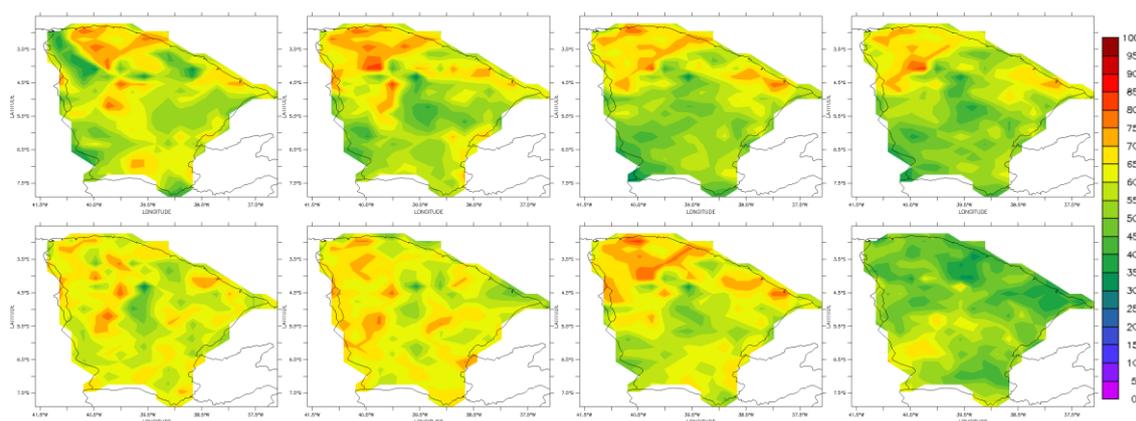
Na Figura 142 é apresentado o índice de acerto (H) dos membros do *ensemble*, *ensemble* médio e persistência para os limiares de 1 mm (a) , 5 mm (b) e 10 mm (c), para a previsão de 24h. Todos os modelos apresentam melhores resultados que a persistência, principalmente no litoral do estado do Ceará, onde o seu índice de acerto é superior a 75% para o limiar de 1 mm. À medida que o limiar de chuva adotado na construção da tabela de contingência aumenta, a qualidade das previsões diminui, mas continua melhor que a persistência. Exceto para região mais ao sudoeste do Ceará para 10 mm, onde a persistência apresentou índice de acerto superior aos demais modelos. Isto pode estar associado à baixa frequência de ocorrência desse evento nessa região.

Analisando a proporção de acerto, ainda na Figura 142, observa-se que os membros que utilizam a parametrização de *Kain-Fritsch* (RCKF, RGKF e WGKF) apresentam melhores resultados na região mais ao sul do Ceará em detrimento às outras simulações (RCKU, RGKU e WGGR) para o limiar de 1 mm.

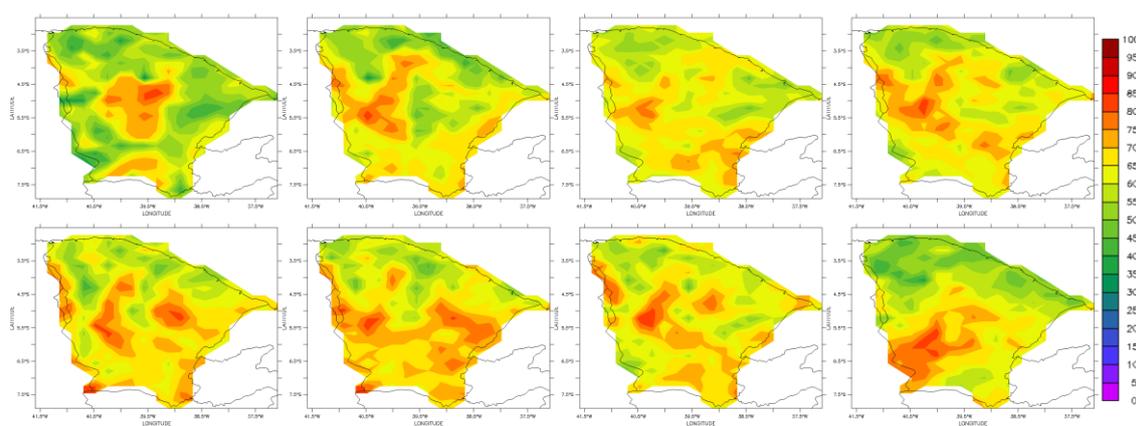
Figura 142 - Verificação das previsões de 24 horas para os limiares de: (a) 1 mm; (b) 5 mm e (c)10 mm. O índice de acerto(H) é mostra para cada modelo na seguinte sequência (da esquerda para direita e de cima para baixo): RCKF, RCKU, RGKF, RGKU, WGKF, WGGR, EM e Persistência.



(a)



(b)

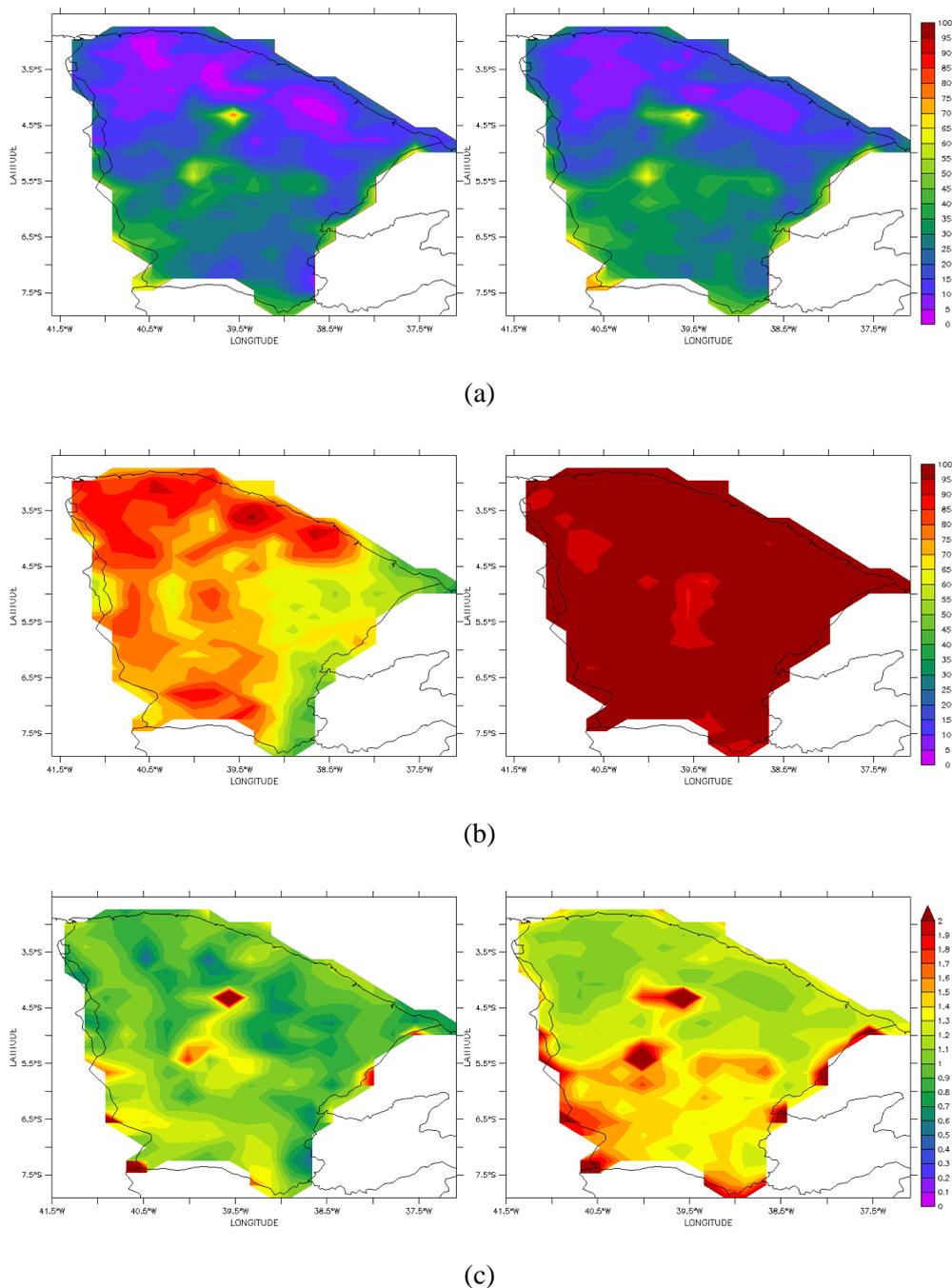


(c)

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 143 são comparados dois membros que possuem modelos regionais distintos, WGKF e RGKF, observa-se que o RAMS apresentou uma maior proporção de acerto (conforme Figura 142) e uma maior probabilidade de detecção para praticamente todo o domínio avaliado para o limiar de 1 mm, porém o modelo WRF apresentou um falso alarme menor. O modelo RAMS tende a superestimar a ocorrência de eventos de precipitação, principalmente na região sul do estado, apresentando BIAS bastante elevado, enquanto esta métrica para o WRF é muito próxima de 1 em quase todo o domínio para os limiar de 1 mm, comportamento também seguido para o limiar de 5 mm.

Figura 143 - Verificação das previsões de 24 horas para o limiar de 1 mm: (a)FAR; (b)POD e (c)BIAS. Modelo a esquerda WGKF e a direita RGKF.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 142 o membro que utilizara o modelo RAMS e a parametrização de convecção de *Kain-Fritsch* com forçante de grande escala do modelo global do CPTEC (RCKF) apresentaram piores resultados no sertão central e no litoral oeste do estado comparado ao membro que assimilara dados do GFS (RGKF). Isto fica evidente quando

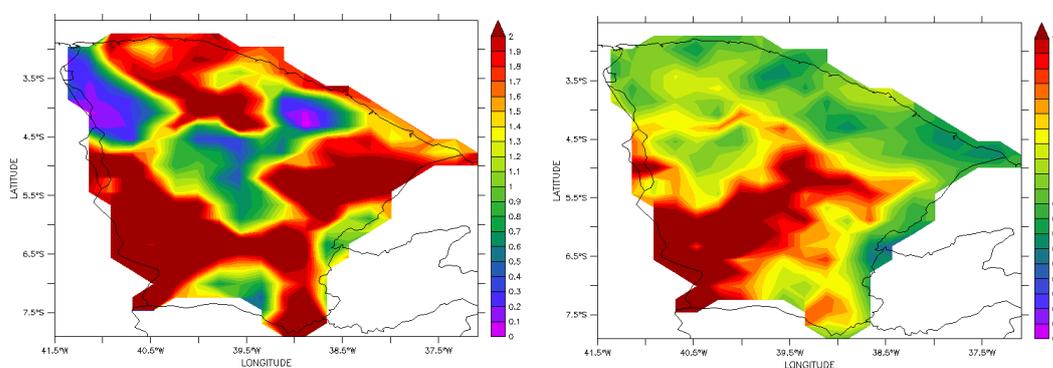
compara-se, na Figura 144, o BIAS desses dois membros para o limiar de 10 mm e para previsão de 24 h. O RCKF superestimam a ocorrência de precipitação em algumas regiões, mas próximo a estas, apresentam BIAS aproximadamente nulo, principalmente para o limiar de 10 mm. Isto sugere a existência de um erro sistemático na localização dos eventos de precipitação.

Na Figura 145 são apresentados *H*, *FAR*, *POD* e *BIAS* dos membros do *ensemble*, *ensemble* médio e persistência para os limiares de 5 mm (a) e 10 mm (b), para a previsão de 72h. Para as previsões 72h os modelos apresentam melhores previsões do que a persistência, com uma proporção de acertos bem acentuada no litoral norte do estado. Porém há uma sensível redução da qualidade para previsões mais distantes.

Para o limiar de 10 mm das previsões de 72 h, apesar de não apresentar índice de acerto melhor que o WGGR, WGKF e a persistência, o ensemble médio possui FAR menor que os membros que usam o RAMS e um POD superior ao WRF. O que indica que esta média das previsões reduz o comportamento de superestimação de eventos de chuva desse modelo e mantém ainda uma informação de qualidade, evidenciada pelos valores elevados de POD. Isto sugere que a média é uma ferramenta potencial para limiares mais elevados e para previsões mais afastadas das condições iniciais (SILVEIRA, 2009).

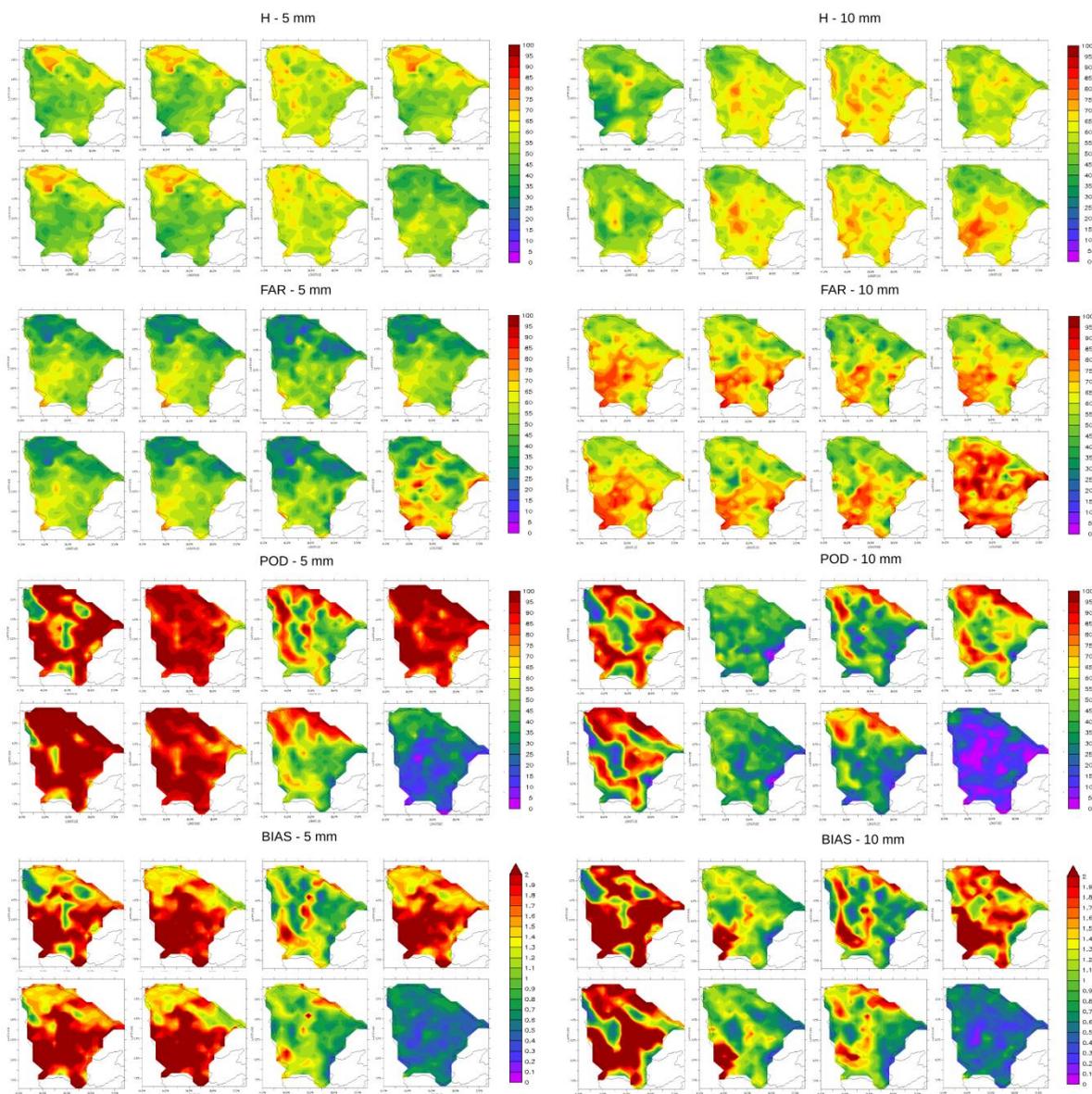
A persistência possui extrema dificuldade de detectar chuvas para o limiar de 10 mm, apresentando POD inferior a 20% e um BIAS muito próximo de zero em praticamente todo o domínio para os três limites de previsões.

Figura 144 - BIAS das previsões de 24 horas para o limiar de 10 mm. Modelo a esquerda RCKF e a direita RGKF.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 145 - Verificação das previsões de 72 horas para os limiares de: (a) 5 mm e (b) 10 mm. Cada índice (H, FAR, POD e BIAS) mostra os resultados de cada modelo na seguinte sequência (da esquerda para direita e de cima para baixo): RCKF, RGKF, WGKF, EM, RCKU, RGKU, WGGR e Persistência.



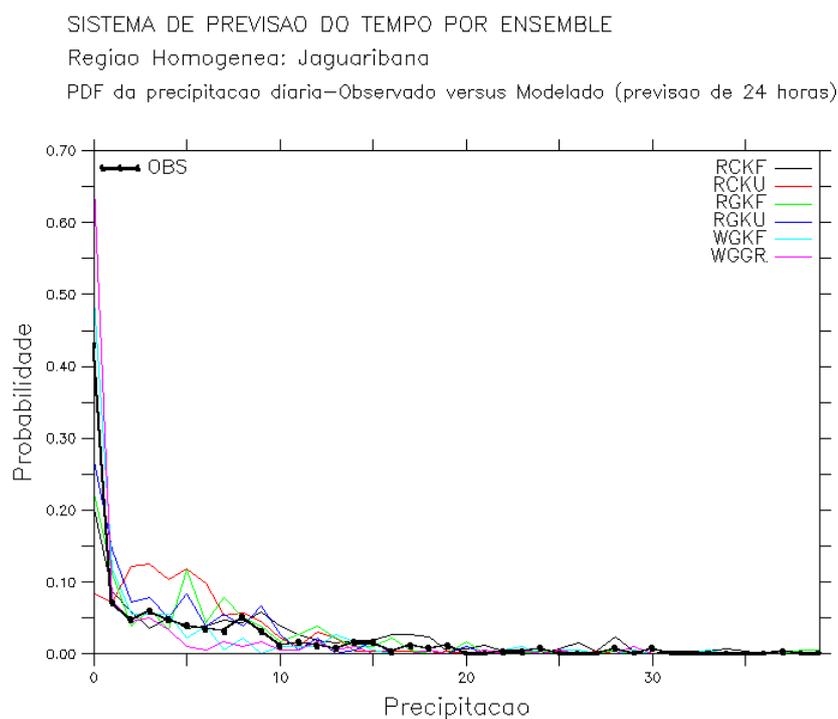
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 146 é mostrada a função de distribuição de frequência de precipitação sem correção para a região de Jaguaribana e para o horizonte de 24h. Os membros que utilizam o modelo RAMS sem correção tendem a superestimar a maioria dos eventos de chuva, isso implica numa alta probabilidade de detecção associado a um alto falso

alarme, o que reduz o grau de confiabilidade da previsão. Enquanto isso, os membros que utilizam o modelo WRF sem correção tendem a subestimar o número de eventos de chuva, isso leva a uma redução do falso alarme e uma probabilidade de detecção também menor. Esse comportamento dos modelos sem correção tende a se repetir nas demais regiões e nos demais horizontes de previsão.

Claramente o modelo WRF tende a apresentar um BIAS muito seco para “chuva-não chuva” sem o uso da correção BIAS seco, ou seja, a frequência relativa de eventos de chuva observado é muito maior do que a frequência relativa modelada. Esse fato pode distorcer os resultados das previsões corrigidas aumentando em muito a frequência relativa de ocorrência de alguns eventos.

Figura 146 - Função de probabilidade de frequência (PDF) de precipitação para a região de Jaguaribana para todos os modelos e para previsão de 24 horas.

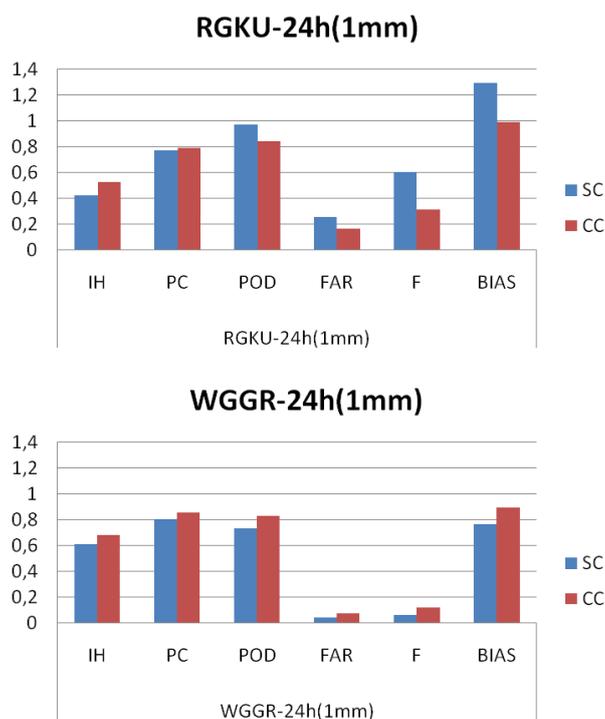


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 147 é mostrada uma comparação dos modelos RGKU e WGGR sem correção (SC) e com correção (CC). A correção reduz o FAR e o F dos membros que usam o modelo RAMS e diminui o comportamento de superestimação do membro RGKU com BIAS aproximadamente igual a 1. Já no caso do WRF a correção aumenta

o POD, mantém o FAR e o F aceitáveis e também melhora o BIAS, reduzindo o comportamento de subestimação deste modelo regional.

Figura 147 - Comparação dos modelos após correção estatística para o horizonte de 24h e para o limiar de 1mm para a região de Jaguaribana: (a) RGKU e (b)WGGR.



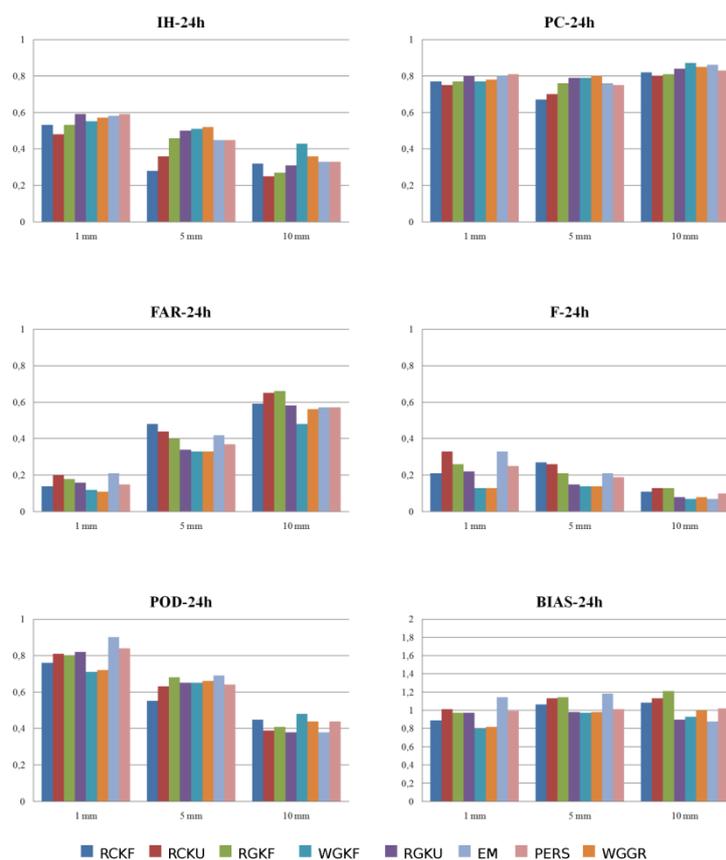
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Nas figuras Figura 148, Figura 149 e Figura 150 são apresentados o *IH* (a), *PC* (b), *FAR* (c), *F* (d), *POD* (e) e *BIAS* (f) dos membros do *ensemble*, *ensemble* médio e persistência para os limiares de 1 mm, 5 mm e 10 mm, para os horizontes de 24h, 48h e 72h, respectivamente, para região de Jaguaribana após correção. De acordo com a Figura 148 os membros do *ensemble* não apresentam superioridade significativa em relação ao modelo de persistência para o horizonte de 24 horas e para a região de Jaguaribara. Claramente há uma redução da qualidade das previsões com o aumento do limiar que se quer prever, tomando por base, principalmente, o aumento do falso alarme e redução da probabilidade de detecção entre 1mm e 10mm.

Comparando os membros que possuem modelos regionais distintos, observa-se que WRF apresentaram melhores índices do que o RAMS, principalmente para os

limiares de 5mm e 10mm, onde o WRF possui maior POD e menor FAR e F. Sendo o membro WGFK aquele que representa os melhores índices para o limiar de 10 mm.

Figura 148 - Verificação das previsões corrigidas de 24 horas usando os índices : (a)IH, (b)PC, (c)FAR ,(d)F, (e)POD e (f)BIAS para os limiares de 1 mm, 5 mm e 10 mm para a região de Jaguaribara e para os anos de 2009/2010.

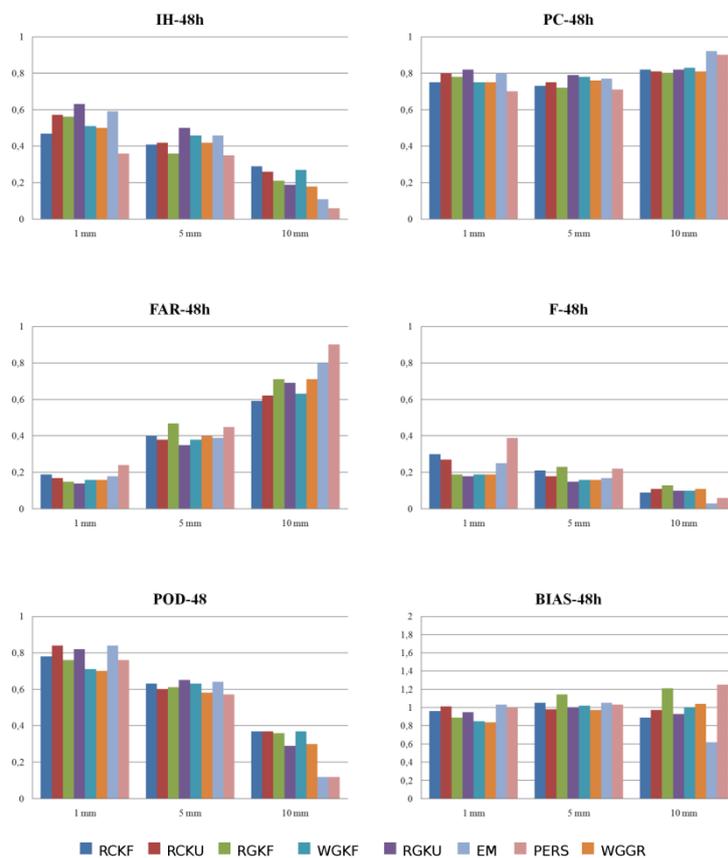


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

De acordo com a Figura 149 todos os membros do ensemble apresentam melhores resultados do que a persistência para o horizonte de 48 horas e para a região de Jaguaribana, isto torna-se evidente no IH, no POD e no FAR para o limiar de 10 mm. Porém a média dos modelos tende a subestimar a quantidade de eventos de chuva superior a 10 mm, apresentando BIAS inferior a 1 para esse limiar.

O POD inferior a 0,4 e um FAR superior a 0,5 para o limiar de 10 mm, dificultam a aplicação dessa informação para alerta de eventos extremos

Figura 149 - Verificação das previsões corrigidas de 48 horas usando os índices : (a)IH, (b)PC, (c)FAR ,(d)F, (e)POD e (f)BIAS para os limiares de 1 mm, 5 mm e 10 mm para a região de Jaguaribara e para os anos de 2009/2010.

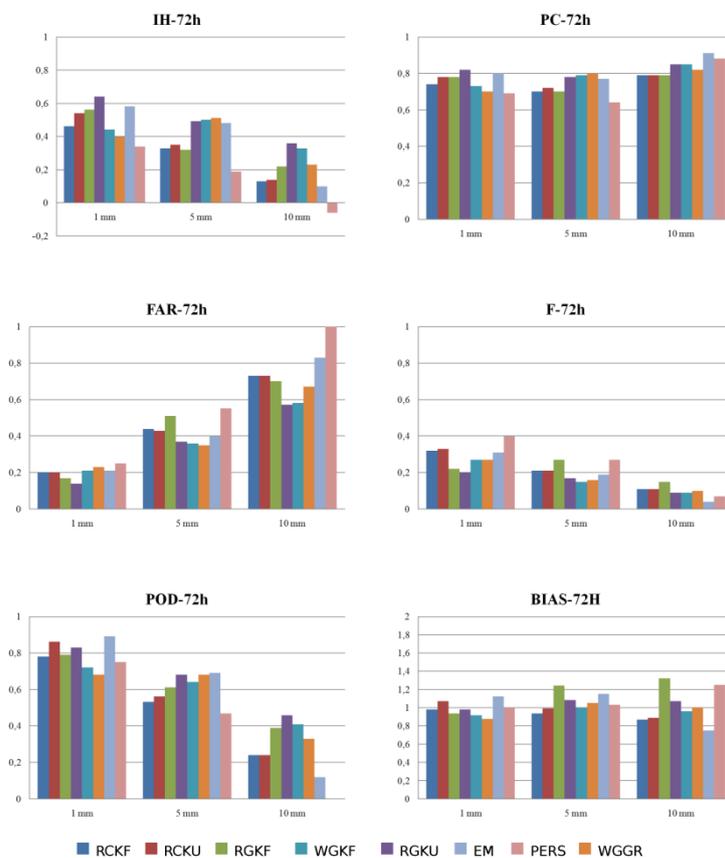


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Conforme a Figura 150, onde são mostrados os índices obtidos para região de Jaguaribana para o horizonte de 72h, a persistência não detectou nenhum evento de chuva superior a 10 mm, apresentando um falso alarme igual 1 e um IH negativo para esse limiar. Portanto, todos os membros do ensemble são melhores que a persistência para esse limiar.

Os membros que utilizaram o modelo RAMS com forçantes de grande escala do modelo global do CPTEC (RCKF e RCKU) apresentaram piores resultados do que os alimentados pelo GFS (RGKF e RGKU) nessa região para o horizonte de 72 horas. O RGKF e RGKU apresentam maior IH e POD e um menor FAR do que o RCKF e o RCKU.

Figura 150 - Verificação das previsões corrigidas de 72 horas usando os índices : (a)IH, (b)PC, (c)FAR ,(d)F, (e)POD e (f)BIAS para os limiares de 1 mm, 5 mm e 10 mm para a região de Jaguaribara e para os anos de 2009/2010.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

18. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A grande variabilidade climática exerce uma forte influência no desenvolvimento da sociedade, devido às enchentes, às secas, às catástrofes, dentre muitos outros fatores que interferem diretamente no meio ambiente, na agricultura, no setor energético, na qualidade do ar etc. Diante disso, análise da variabilidade de séries temporais e a possibilidade de uso da informação climática pode se tornar uma informação muito útil para o planejamento e gestão de recursos hídricos.

O avanço das ciências atmosféricas permite que se incorpore a modelagem climática ao planejamento em recursos hídricos em diversas escalas temporais. Portanto, torna-se necessária a busca pelo desenvolvimento de novos sistemas de previsão de vazões incluindo informações climáticas para melhorar a qualidade da previsão. Isto possibilita um maior entendimento das incertezas relacionadas com as condições climáticas futuras.

No setor elétrico o planejamento da operação do SIN é extremamente complexo, e devido este fato é feito em etapas com o auxílio da cadeia de modelos desenvolvidos no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL (MACEIRA et al., 2002). Em cada etapa os modelos utilizados possuem diferentes horizontes de planejamento e discretização no tempo, estimando assim as afluências hidrológicas futuras e a incerteza associada às mesmas.

Esses modelos de previsões de vazões atualmente utilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em geral, são estocásticos e não consideram informações meteorológicas. Esta forma de previsão supõe que as séries de vazões são estacionárias, o que considerando as alterações no uso e ocupação do solo e as mudanças climáticas é uma suposição que pode indicar estratégias que provoquem grandes arrependimentos.

Além disso, o planejamento do SIN não incorpora a informação de longo prazo, a projeção dos modelos do CMIP5, publicados pelo quinto relatório do IPCC, geram informações para esta escala temporal e podem influenciar a instalação de infraestrutura das hidrelétricas no país. Este trabalho, além de identificar uma clara tendência negativa nas vazões do setor norte do SIN, propôs uma análise por agrupamento que mostra modelos com anomalias de vazões muito próximas e confirma a sinalização do setor norte.

A análise de séries hidrológicas demanda informações sobre tendências e padrões de variação de baixa frequência do clima (décadas a séculos). O clima das próximas décadas depende tanto de variações climáticas naturais como das forças antropogênicas. Previsões climáticas decadais devem tentar cobrir a lacuna entre a previsão sazonal/interanual com prazos de dois anos ou menos e projeções de mudanças climáticas de um século à frente. Não há nenhuma teoria amplamente aceita para esse tipo de projeção, nem se sabe se a sua evolução passada é a chave para seu futuro. Contudo, este trabalho mostrou que existem controles de baixa frequência, associados aos lentos processos oceânicos, que podem conferir certa previsibilidade ao clima na escala decenal, principalmente na região tropical. O modelo baseado na série de ondeletas (WAR) foi capaz de captar o comportamento da série decenal de vazões e pode ser usado nesta escala de planejamento.

Na escala sazonal foram testados os modelos PAR, PARx e o uso do modelo dinâmico ECHAM 4.5-SMAP para o SIN. O fato destes modelos preservarem a estrutura espacial das vazões e apresentarem desempenho melhor que a climatologia em diversas regiões do Brasil mostram que estes podem ser alternativas ao uso do modelo estocástico GEVAZp, atualmente utilizado no setor elétrico.

A possibilidade de incorporar os resultados dos modelos numéricos de previsão do tempo a um modelo hidrológico distribuído ou concentrado na escala de curtíssimo prazo mostra-se como uma alternativa relevante para operação em tempo real do SIN.

Atualmente, estão sendo testadas novas configurações para o sistema de previsão numérica do tempo no SIN, estas informações devem ser usadas para o planejamento energético semanal. Este teste baseia-se no uso de previsões de precipitação simuladas pelo modelo regional ETA, com resolução horizontal de 40 km e resolução vertical de 38 camadas, mais detalhes do modelo ver em Black (1994). Estes dados servem de entrada para o modelo hidrológico *Soil Moisture Accounting Procedure* – SMAP (LOPES *et. al.*, 1982) para obtenção das vazões. Com intuito de melhorar a previsibilidade e estender o prazo de validade das previsões, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) tem testado novas configurações de previsão numérica do tempo usando modelos regionais. Estes testes possuem duas vertentes: a primeira consiste em utilizar novos modelos regionais (no caso o modelo regional BRAMS), com as mesmas condições de fronteira atual, e a segunda consiste no uso do mesmo modelo

regional com diferentes configurações físicas e com os mesmos dados de fronteira combinado a uma melhor resolução de grade (aproximadamente 15 km).

Como principal contribuição nesta escala temporal, este trabalho apresentou um sistema de verificação de desempenho da previsão numérica do tempo via modelos regionais e identificou as regiões de maior e menor previsibilidade. Além disso, avaliou-se o ganho produzido pelo aumento da resolução de grade e pelo uso do modelo regional BRAMS. Toda essa análise comparativa para identificar o modelo com melhor desempenho foi feita com uma ferramenta multicritério, o ELECTRE.

As diversas técnicas nas distintas escalas temporais e a boa adequação das mesmas ao problema proposto indicam que estas podem ser usadas no planejamento do SIN, sugere-se ainda que a informação climática deva ser inserida neste processo, dado a grande quantidade de informações disponíveis e a possibilidade de melhorar a operação do sistema.

No Estado do Ceará na escala de longo prazo, apesar dos modelos do CMIP5 mostrarem grande divergência para o sistema Jaguaribe-Metropolitano, os resultados obtidos podem ser usados para definir o volume outorgável de longo prazo. Possibilitando uma análise da incerteza dos volumes outorgáveis e dos níveis de garantia adotado no sistema.

Na escala de médio prazo os modelos que utilizam série de Fourier e ondeletas identificaram os padrões de variabilidade das precipitações, essas informações podem ser utilizadas para definir os volumes outorgáveis entre 5 e 10 anos.

O uso da informação climática sazonal pode ser usado para definir redução das vazões alocáveis para um dado ano, com uso do software aquanet, por exemplo. Podendo ser utilizado para definir os níveis de racionamento em anos secos e servir como parâmetro para alocação negociada.

A possibilidade de acoplamento dos resultados dos modelos numéricos de previsão do tempo a um modelo hidrológico distribuído ou concentrado na escala de curtíssimo prazo mostra-se como uma alternativa relevante para operação em tempo real do sistema Jaguaribe-metropolitano. Podendo ser uma ferramenta relevante em sistema de alerta de cheias.

18.1. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES: ESCALA DE LONGO PRAZO

Quanto às projeções dos modelos do CMIP5 analisados para os cenários RCP8.5 e RCP4.5 do século XXI, há divergências quanto o futuro da precipitação nas várias regiões do setor elétrico. Esse espalhamento pode estar associado à própria incerteza proveniente dos fenômenos meteorológicos que envolvem essa variável (a atmosfera é um sistema caótico, Lorenz, 1965) e/ou má representação dos fenômenos de micro e mesoescala que precisariam ser resolvidos numa grade de melhor resolução.

18.1.1. Setor elétrico

Os modelos do cenário RCP4.5 não mostram tendência significativa na maioria das bacias avaliadas no século XXI. Nota-se uma maior amplitude de oscilações das séries, principalmente no período de 2080 a 2098. Essa mudança é associada a uma maior amplitude da banda de baixa frequência (1 a 9 anos), indicando a ocorrência de eventos extremos do que no século XX;

Enquanto os modelos do RCP8.5 mostram tendência significativa em várias bacias, principalmente na região Norte do Brasil, indicando a possibilidade de mudanças significativas no clima. No setor Norte, a maioria dos modelos sinalizam tendência negativa, divergindo apenas em magnitude. Esse padrão é captado pelo resíduo e se intensifica a partir de 2060, quando a variabilidade da série tende a se intensificar e os eventos extremos passam a ser mais frequentes;

No setor Nordeste, os modelos dos cenários RCP4.5 e RCP 8.5 divergem na bacia do Xingó nos três períodos analisados, mostrando grande incertezas nessa bacia.

Para o cenário RCP4.5 e para o setor Norte, os modelos indicam uma maior possibilidade de reduções ou normalidade nas bacias desse setor no período de 2010 a 2039. Enquanto para o cenário RCP8.5 os modelos indicam reduções significativas nas vazões médias anuais, principalmente em Belo Monte.

18.1.2. Ceará

Nota-se uma maior amplitude de oscilações das séries no período de 2080 a 2100. Essa mudança é associada a uma maior amplitude da banda de baixa frequência

(1 a 9 anos), indicando a ocorrência de eventos extremos do que no século XX para as bacias do Ceará.

Os modelos mostram grande divergência para as vazões no século XXI sobre o Ceará, tanto para o cenário RCP4.5 quanto RCP8.5.

As divergências dos modelos do CMIP5 analisados quanto às projeções demonstram o alto nível de incerteza existente nessas projeções. Entretanto, estas informações definem uma margem dos possíveis cenários futuros de precipitação do setor elétrico brasileiro, devendo ser usadas para adoção de políticas e gestão.

Obviamente, projeções com menos incertezas seriam mais interessantes para os tomadores de decisão, no entanto isto não ocorre nas projeções regionais dos modelos do CMIP5, especialmente sobre áreas menores. Artificializar a redução destas incertezas pode induzir estratégias que levem àquilo que, em gerenciamento de risco, se conhece como grandes arrependimentos. Daí, estratégias robustas precisam considerar as incertezas no nível atual de conhecimento.

A crescente demanda de energia no Brasil exerce grande pressão sobre o sistema elétrico brasileiro, condições climáticas mais desfavoráveis resultariam em condicionantes críticos ao desenvolvimento econômico do país. O risco de um sistema de geração e distribuição de energia como o brasileiro é o da externalidade climática de longo prazo, está pode fragilizar o desenvolvimento econômico e social de um período, caso estratégias robustas não sejam tomadas para tornar o SIN mais resiliente.

18.2. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES: ESCALA DE MÉDIO PRAZO

Os modelos autorregressivos puros (ARs, ARsmédia e ARsmediana) não representam a variabilidade das séries históricas. Portanto, não são adequados para esse tipo de problema.

Os modelos baseados na série de *Fourier* não funcionaram para os locais onde se observou tendência acentuada.

Os modelos WAR apresentaram verossimilhança maior que 1 em várias regiões do Brasil, indicando que se comportam melhor do que a climatologia e consegue representar a variabilidade decadal, podendo ser usado como ferramenta de planejamento de médio prazo.

18.2.1. Setor elétrico

Os resultados apresentados para as médias e medianas móveis, além do método Lowess, mostram uma variabilidade de alta frequência, com período de poucos anos, nas séries de vazões naturalizadas estudadas.

Os resultados assinalam uma tendência de aumento, ou variabilidade de baixa frequência, das vazões nos postos das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, como também uma tendência de redução, ou variabilidade de baixa frequência, nas vazões das regiões Norte e Nordeste, segundo o método de Mann-Kendall-Sen.

Essa tendência de redução nas vazões nas regiões Norte e Nordeste pode resultar em uma redução da capacidade local de produção de hidroeletricidade em longo prazo. Por outro lado, a tendência de aumento, ou variabilidade de baixa frequência, das vazões nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste pode suprimir essa possível perda, haja vista que a maior parte da produção de hidroeletricidade no país vem dessas três regiões.

A análise da transformada em ondeletas mostrou que há uma variabilidade de baixa frequência, com período superior a 40, na maioria dos postos analisados.

18.2.2. Ceará

A série histórica de precipitações sobre o Ceará não apresentou tendência significativa, segundo o método de Man-Kendall Sen. A média móvel e a mediana móvel mostram alternância entre períodos de sequenciais de anos secos e outros intervalos com sequência de anos úmidos. Essa variabilidade pode estar associado a variação dos padrões do comportamento da temperatura da superfície do mar do oceano Pacífico.

A transformada de *Fourier* mostra padrões de baixa frequência (entre 10 e 13 anos) e na escala de média a baixa frequência (entre 4 e 7 anos). Enquanto a transformada de ondeletas mostra que ao longo de 1912 a 2002 há três bandas características de 2 a 7 anos(banda 1) , 8,2 a 16,6 anos (banda 2) e 17-27,8 anos(banda 3) , ou seja, ela apresenta oscilações em várias escalas de tempo.

As duas primeiras bandas de ondeletas e a variabilidade dos principais harmônicos de Fourier indicam padrões de variação semelhante a TSM do pacífico,

podendo esse ser um dos fatores relevantes para tal variabilidade temporal das precipitações.

18.3. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES: ESCALA DE CURTO PRAZO

18.3.1. Setor elétrico

Os modelos de previsão de vazão atualmente utilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em geral, são estocásticos e não consideram informações meteorológicas. O aprimoramento dos modelos atmosféricos ocorrido nos últimos anos faz com que a inserção dessa informação no sistema de previsão de vazões seja cada vez mais viável. Os aperfeiçoamentos metodológicos para a obtenção dos cenários hidrológicos de previsão ou geração de aflúências mostrados nesse trabalho podem contribuir para a melhoria do processo de planejamento e programação da operação do SIN, já que sugerem a inclusão dessa informação. A grande vantagem de utilizar informações climáticas para realizar previsões é que estas são influenciadas pelo fluxo atmosférico corrente, de modo que podem dimensionar de maneira mais adequada a incerteza associada a precipitação, e conseqüentemente as vazões.

Obviamente, deve-se, ainda, investigar e investir na melhoria das previsões de precipitação, mas estas poderão trazer ainda mais benefícios aos resultados dos modelos chuva-vazão em desenvolvimento.

O aumento do número de locais com previsão climática possibilitar uma ampliação no ganho de informações tanto com relação a avaliação sazonal das vazões nos diferentes locais, assim como na estrutura espacial das vazões tendo em vistas que o modelo climático garante consistência física da distribuição espacial das precipitações por ele produzida.

Quanto aos métodos de reamostragem usados são feitas as seguintes proposições:

- O método dos vizinhos atribui peso bastante elevado para alguns dos membros do GERVAZP, o que torna a sua utilização impraticável, visto que ao considerar uma pequena quantidade de membros mais prováveis perde-se a informação da incerteza associada ao um evento;

- O método de Kernel apesar de aproximar sensivelmente a CDF do GERVAZP para a dos membros do SMAP em FURNAS, apresenta resultados não tão favoráveis em Canoas e Capivara. Isto ocorre porque no cálculo da distância prevalece a ENA de Furnas, que é bem maior que as demais, sendo os termos da equação da distância total pertencente às demais bacias de outra ordem de grandeza;
- O método de reamostragem dos cenários do GERVAZp pelos cenários do SMAP se aproxima razoavelmente a CDF do SMAP. Porém, em alguns casos os cenários do GERVAZP e os cenários do SMAP divergem de tal forma, que mesmo este método não consegue reproduzir adequadamente a CDF do SMAP.

Considerando a ordem de grandeza dos desvios existentes nas previsões de vazões naturais do SIN, e conseqüentemente do GERVAZP, é razoável supor que uma significativa melhoria nos processos de planejamento e programação da operação do SIN é a grande redução, em alguns meses, nestes desvios para os métodos de Kernel e pelo método reamostragem dos cenários do GERVAZp pelos cenários do SMAP. O desvio padrão pode ser considerada uma forma de caracterizar a incerteza associada à previsão. É importante que o método de geração de cenários utilizado represente bem a incerteza associada ao estado do sistema previsto e mantenha dentro da amplitude do conjunto de previsões dos membros do método utilizado o estado real futuro da atmosfera.

Os ganhos oriundos do modelo climático podem ser potencializados em um modelo que possibilite a integração íntima entre a modelagem acoplada (climático-hidrológica) e a modelagem estocástica. Alternativa metodológica para este fim é utilizar de forma explícita a informação oriunda do modelo climático na formulação do modelo estocástico, aninhando o modelo acoplado para algumas regiões dentro do modelo estocástico que complementaria a previsão para os locais onde não houvesse ou não fossem satisfatórias as previsões do modelo acoplado. Este procedimento conservaria de forma mais adequada a estrutura espacial das séries de vazões.

Na análise das regressões, quanto a sua estrutura, verifica-se um melhor desempenho dos modelos do tipo PAR quando se usa toda a série de previsão (1998-2003), e para os meses dezembro, janeiro e fevereiro (DJF); março, abril e maio (MAM), e junho, julho, e Agosto (JJA). Para o período de setembro, outubro e novembro (SON), a uma maior eficiência preditiva é observada para modelos do tipo PARX.

18.3.2. Ceará

A alocação sazonal e operação de reservatórios no Ceará são feitas considerando aporte nulo para os reservatórios, a COGERH reconhece a fragilidade dessa hipótese. A técnica usada neste trabalho (k-vizinhos) e o uso de modelos regionais, como os atualmente operados pela FUNCEME, indicam que a clima pode agregar informação ao gerenciamento de hidrossistemas na escala sazonal.

Foram testados quatro grupos de meses de TSMs para a confecção dos modelos baseados nos k-vizinhos: DJFM, AMJ, JAS e OND. O quadrimestre DJFM não apresentou resultados satisfatórios, apresentando sempre o tercil chuvoso como o mais provável. Enquanto o trimestre AMJ apresentou os melhores resultados, onde o tercil sinalizado como mais provável nos 10 anos de análise para este modelo se efetivou na maioria dos casos.

Este resultado sugere que é possível com 18 meses de antecedência ter previsibilidade a respeito do comportamento das vazões, através do uso de informações climática proveniente de TSMs.

18.4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES- ESCALA DE CURTÍSSIMO PRAZO

18.4.1 Setor elétrico

Os modelos possuem maiores correlações e melhores índices quando considerada a precipitação acumulada, isto sugere que o modelo desloca a ocorrência de chuvas em algumas horas (possuem dificuldade de representar o clico diurno de precipitação, fato já mostrado por Silveira et al. (2011) para o Nordeste brasileiro e para o modelo RAMS) ou há uma tendência das séries observadas em convergir para o valor central.

Os modelos possuem viés positivo na maioria das bacias, isso implica que sem uma remoção de viés os modelos tendem a superestimar a maioria dos eventos de chuva. Isto indica que nos modelos sem correção a frequência relativa de eventos de chuva observado é muito menor do que a frequência relativa modelada.

As correções propostas reduzem os erros de viés na maioria dos casos, reduzindo também a razão de falso alarme do modelo sem correção, o que aumenta o grau de confiabilidade da previsão.

Quanto às correções de viés são feitas as seguintes proposições:

- A correção via razão observada e modelada tende a reduzir de mais a razão de BIAS para os limiares de maior intensidade, não permitindo, portanto, a captação de eventos extremos. O que do ponto de vista de alerta de cheias é muito ruim e inviabiliza seu uso;
- Recomenda-se o uso da correção empírica, principalmente para os trechos da Bacia do Tocantins. Dado o erro sistemático de viés do modelo, nas regiões onde não é usada a correção empírica deve-se usar a correção gama.

Os modelos ETA 15 e ETA 40 apresentam previsões bastante semelhantes, não sendo possível identificar o ganho ao aumentar a resolução. Este resultado pode levar a discussões de uma pergunta fundamental que permanece sem ser respondida até hoje: Qual é o valor relativo de um conjunto de previsões com uma resolução de mesoscala que não inviabilize o seu custo computacional, (que como exemplo poderia ser de 20-40 km), comparado a um número muito menor de previsões a resolução consideravelmente mais alta (1-3 km, por exemplo) e custo computacional semelhante? A resposta para esta pergunta tem implicações de longo alcance, levando vários centros (NCEP, CPTEC, JMA, etc.) a investirem em pesquisa científica e aquisição de tecnologia, ao mesmo tempo em que buscam uma resposta para obter o máximo proveito dos recursos disponíveis.

O modelo BRAMS apresentou dificuldade na região mais ao sul do domínio, indicando correlações bem inferiores ao ETA 15 nas bacias desse setor. Porém, o método Electre II, indica que a relação de dominação de um modelo sobre o outro varia sazonalmente nas várias regiões. Nos trimestres DJF e JJA o modelo ETA-15 é melhor nas bacias da região sul e sudeste do País, enquanto o BRAMS é melhor na região norte e nordeste. Já nos trimestres MAM e SON o comportamento é invertido.

Considerando a clara influência do sinal do modelo global nos modelos regionais sugere-se o uso de previsões usando um conjunto de multi-modelos a partir de diferentes modelos globais. Assume-se que as previsões de controle geradas por diferentes modelos representam bastante bem incertezas associadas às condições iniciais da atmosfera.

18.4.2Ceará

O ensemble regional exposto nesse trabalho apresentou desempenho superior ao obtido pelo modelo de persistência para os horizontes de 48h e 72h. À medida que o evento de interesse fica mais intenso, ou seja, que o limiar de chuva adotado na construção da tabela de contingência aumenta, a qualidade das previsões diminui.

Os modelos regionais sem correção apresentam certas características que tendem a persistir mesmo após as correções, por exemplo:

- Os membros que usam o modelo RAMS tendem a superestimar os valores observados principalmente para a categoria de 1mm, isso implica numa alta probabilidade de detecção associado a um falso alarme extremamente elevado;
- O WRF tende a subestimar os eventos de chuvas, isso implica num baixo falso alarme associado a uma baixa probabilidade de detecção;
- O membro RCKU apresentou resultados piores que os demais membros, e isso influenciou na qualidade da previsão do ensemble médio.

O modelo de persistência possui dificuldade de detectar chuva para o horizonte de 48h e 72 h, principalmente para os limiares de 5 mm e 10 mm, o que torna inviável o seu uso para fornecer informações para alerta de eventos extremos ou para modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão.

A correção estatística realizada nos modelos regionais indica uma redução bastante relevante dos erros de viés dos modelos regionais, porém devido à assimetria entre os anos de 2009/2010 algumas previsões podem perder um pouco de qualidade. No caso do WRF, por ser um modelo de BIAS muito seco, a correção também pode piorar a qualidade das previsões, principalmente para limiares inferiores.

O sistema de previsão numérica por *ensemble* mostra-se eficiente em detectar a ocorrência ou não de chuva diária, apresentando resultados mais satisfatórios na região litorânea do estado do Ceará, possivelmente associados a uma representação adequada da circulação sobre essa região pelo sistema de previsão.

Este presente trabalho é uma avaliação preliminar das previsões do modelo de um ensemble regional multi-modelos. Novos testes deverão ser executados para fornecer um conjunto de informações mais detalhado e melhorar o método de correção estatística destas previsões.

19. REFERÊNCIAS

AJAMI, N. K. et al. Multi- Model Combination Techniques for Analysis of Hydrological Simulations: Application to Distributed Model Intercomparison Project Results.. **Journal of Hydrometeorology** , v. 8, p. 755-768, 2006.

ALEXANDRE, A. M. B. **Previsão de vazões mensais para o sistema interligado nacional utilizando informações climáticas**. Fortaleza-CE: Universidade Federal do Ceará, Tese de Doutorado em engenharia civil, 2012.

ALLEN, R. G. et al. **Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**.. FAO-Irrigation and Drainage Paper. Roma, p. 297. 1998.

ALVES, B. C. C.; SOUZA FILHO, F. A.; SILVEIRA, C. S. Análise de tendência e Padrões de Variação das séries históricas de vazões do Operador Nacional de Sistemas(ONS). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 4, p. 19-34, 2013.

ANDREOLI, R. V. et al. A influência da temperatura da superfície do mar dos Oceanos Pacífico e Atlântico na variabilidade de precipitação em Fortaleza. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 3, p. 337-344, 2004.

ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. Enso-Related Rainfall Anomalies in South America and Associated Circulation Features During Warm and Cold Pacific Decadal Oscillation Regimes. **International Journal of Climatology**, v. 25, p. 2017-2030, 2005.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília. Agência Nacional de Energia Elétrica(ANEEL). Brasília, p. 153. 2002.

ANEEL. **Banco de Geração de Informações – Capacidade de Geração do Brasil**.< <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>>Acesso em 03/04/2011; 2011.

ARNELL, N. W. Climate change and global water resources: SRES emission and socioeconomic scenarios. **Global Environmental**, v. 14, p. 31-52, 2004.

ARNELL, N. W.; REYNARD, N. S. The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain.. **Journal of Hydrology**, v. 183, p. 397-424, 1996.

BANCOMUNDIAL. **Relatório sobre o desenvolvimento mundial de 2010: desenvolvimento e mudança climática/ Banco Mundial**. São Paulo. São Paulo: UNESP, 2010.

BARNSTON, A. G.; HE, Y.; GLANTZ, M. H. Predictive Skill of Statistical and Dynamical Climate Models in Forecasts of SST During the 1997-1998 El Nino Episode and the 1998 La Nina Onset. **Journal of Climate** , v. 12, p. 217-244, 1999.

BEVEN, K.; FREER, J.. Equifinality, Data Assimilation, and Uncertainty Estimation in Mechanistic Modelling of Complex Environmental Systems Using the GLUE Methodology. **Journal of Hydrology**, v. 249, p. 11-29., 2001.

BINDER, W. L. C. Climate Change and Watershed Planning in Washington State.. **Journal of the American Water Resources Association.**, v. 42, n. 4, p. 915-926, 2006.

BLACK, T. L. The new NMC mesoscale Eta model: description and forecast examples.. **Weather and Forecasting**, v. 9, p. 265-278, 1994.

BLOCK, P. J. et al. Streamflow Forecasting Framework using Multiple Climate and Hydrological Models.. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 45, n. 4, 2009.

BLOCK, P. J.; RAJAGOPALAN, B. Statistical – Dynamical Approach for Streamflow Modeling at Malakal, Sudan, On the White Nile River. **Journal of Hydrologic Engineering** , v. 14, n. 2, p. 185-196, 2008.

BOGGESS, A.; NARCOWICH, F. J. . **A first course in wavelets with fourier analysis**. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.

BOLZAN, M. J. A. Análise da transformada em ondas aplicadas em sinal geofísico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 1, p. 37-41, 2004.

BONATTI, J. P. Modelo de Circulação Geral Atmosférica do CPTEC. Climanálise. Edição comemorativa de 10 anos. [<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a/index1.shtml>], 1996.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. **Time Series Analysis: forecasting and control**. Revisada. ed. San Francisco: Holden-Day, 1976.

BUIZZA, R.; PALMER, T. N. The singular-vector structure of the atmospheric general circulation.. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 52, p. 1434-1456, 1995.

BURN, D. H.; ELNUR, M. A. H. .. Detection of hydrologic trends and variability. **Journal of Hydrology**, v. 255, p. 107-122, 2002.

CAMPOS, N; STUDART, T. **Gestão das águas: princípios e práticas**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2003.

CATALDI, M. **Estudo Numérico da Influência das Anomalias da TSM do Atlântico Sul Extratropical e do Pacífico Equatorial no Regime Hidrometeorológico das Regiões Sul e Sudeste do Brasil**. 2008. 255f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

CAVALCANTI, A. I. F. et al. **Tempo e Clima no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

CEPEL – CENTRO DE PESQUISA DE ENERGIA ELÉTRICA, 2002. **Manual de Referência – Modelo de Geração de Séries Sintéticas de Energias e Vazões – MODELO GEVAZP**. CEPEL. Rio de Janeiro – RJ.

CEPEL - CENTRO DE PESQUISA DE ENERGIA ELÉTRICA, **MANUAL DE REFERÊNCIA DO MODELO NEWAVE**, Rio de Janeiro, 2006.

CHEN, C.; COTTON, W. R. Numerical experiments with a one-dimensional higher order turbulence model: Simulation of the Wangara day 33 case. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 25, p. 375-404, Janeiro 1983.

CHOU, S. C. Regional EtaModel. Climanálise. Edição comemorativa de 10 anos. [<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a/index1.shtml>], 1996.

CHOU, S. C. e Justi, M. G. S.. A. Objective evaluation of Eta model precipitation forecasts over South America. Climanálise. Jan, 1999.

CITEU, J. et al. Position de La zone de convergence a 28°N et température de surface de l'océan. **Veille Climatique Satellitaire**, n. 21, p. 3-7, 1988.

COGERH. COGERH. **Site da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará**. Disponível em: <<http://portal.cogerh.com.br/>>. Acesso em: 10 ago. 2010.

COLLISCHONN, W. et al. The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, n. 5, p. 878-895, 2007.

COMPO, G. P.; WHITAKER, J. S.; SARDESHMUKH, P. D. Feasibility of a 100 year reanalysis using only surface pressure data. **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 87, p. 175-190, 2006.

COSTA, A. A.; NETO, O. L. M. **Modelagem de mesoescala da variabilidade climática interanual sobre o nordeste brasileiro**. Anais do III Simpósio Internacional de Climatologia. Canela-RS: [s.n.]. 2009.

COSTA, F.S.; MACEIRA, M.E.P.; DAMÁZIO, J.M. Modelos de Previsão Hidrológica Aplicados ao Planejamento da Operação do Sistema Elétrico Brasileiro, 2007. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos** V12, n.3, p21-30.

COTTON, C. E. A. RAMS 2001: Current status and future directions. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 82, n. 1, p. 5-29, 2003.

COTTON, W. R.; PIELKE SR, R. A.; WALKO, R. L. RAMS 2001: Current status and future directions. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 82, n. 1, p. 5-29, 2003.

COUTINHO, M. M. **Previsão por conjuntos utilizando perturbações baseadas em componentes principais**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE. São José dos Campos- SP, p. 136. 1999.

DA SILVA, D.F.; MOLION, L.C.B. Influência da Variabilidade Climática Interanual na Hidrologia da Bacia do rio São Francisco, 2004. **Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Fortaleza.

DALEY, R.; MAYER, T. Estimates of global analysis error from the global weather experiment observational network. **Monthly Weather Review**, v. 114, p. 1642-1653, 1986.

DELLEUR, J. W. et al. **Applied Modeling of Hydrologic Time Series**. 1. ed. Colorado: Water Resources Publications, 1987.

DIAZ, A. F.; STUDZINSKI, C. A.; MECHOSO, C. R. Relationships between Precipitation Anomalies in Uruguay and Southern Brazil and Sea Surface Temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. **Journal of Climate**, v. 11, n. 2, p. 251-271, 1988.

DOBLAS-REYES, F. J.; HAGEDORN, R.; PALMER, T. N. The Rationale Behind the Success of Multi-Model Ensembles in Seasonal Forecasting – II. Calibration and Combination.. **Tellus**, v. 57, n. 3, p. 234-252, Maio 2005.

DUAN, Q. et al. Multi- Model Ensemble Hydrologic Prediction Using Bayesian Model Averaging. **Advances in Water Resources**, v. 30, p. 1371-1386, 2006.

FILHO, F. D. A. D. S.; PORTO, R. L. L. Mercado de água e o Estado: lições da teoria dos jogos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 4, p. 83-98, 2008.

FOLLAND, C. K.; PARKER, D. E. Observed variations of sea surface temperature.. In: SCHLESINGER, M. E. **Climate- Ocean Interaction**. [S.l.]: Kluwer, Dordrecht, 1990. p. 21-52.

GEORGAKAKOS, K. P.; KRZYSZTOFOWICZ, R. Probabilistic and Ensemble Forecasting (Editorial). **Journal of Hydrology**, n. 1, p. 249(1-4), 2001.

GEORGAKOS, K. P. et al. Characterizing Streamflow Simulation Uncertainty Through Multimodel Ensembles. **Journal of Hydrology**, v. 298, n. 1-4, p. 222-241, 2004.

GODDARD, L. et al. Current approaches to seasonal-to-interannual climate predictions. **International Journal of Climatology**, Londres, v. 21, n. 9, p. 1111-1152, Julho 2001.

GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S.; ALMEIDA, A. T. **Tomada de Decisão Gerencial: Enfoque Multicritério**. São Paulo: Atlas S.A, 2006.

GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E.; DOYLE, M. E. Climate variability in southern South America associated with El Nino and La Nina events.. **Journal of Climate**, v. 13, n. 1, p. 35-58, 2000.

GUILHON, L. G.; ROCHA, V. F.; MOREIRA, J. C. Comparação de métodos de previsão de vazões naturais afluentes a aproveitamentos hidroelétricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 3, p. 13-20, 2007.

HAMED, K. H. Exact distribution of the Mann-Kendall trend test statistic for persistent data.. **Journal of Hydrology**, v. 365, p. 86-94, 2009.

HARRINGTON, J. **The effects of radiative and microphysical processes on simulated warm and transition season arctic stratus..** Phd. Colorado State University. [S.l.]. 1997.

HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in northeast. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 113, n. 435, p. 411-425, 1977.

HASTIE, T., TIBSHIRAMI, R., FRIEDMAN, J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. Second Edition Series: HYPERLINK "<http://www.springer.com/series/692>" Springer Series in Statistics , 533p, 2009.

HAYLOCK, M. R. et al. Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature. **Journal of Climate**, v. 19, p. 1490-1512, 2006.

HELSEL, D. R.; HIRSCH, R. M. **Statistical methods in water resources:** U. S. geological survey techniques of water-resources investigations. Capítulo A3. Disponível em: <<http://water.usgs.gov/pubs/twri/twri4a3/>>. Acesso em: 2002.

HIRSCH, R. M.; SLACK, J. R.; SMITH, R. A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data.. **Water Resources Research**, v. 18, p. 107-121, 1982.

HOFFMAN, R. N.; KALNAY, E. Lagged Average Forecasting, an Alternative to Monte Carlo Forecasting.. **Tellus**, v. 35A, n. 2, p. 100-118, 1983.

IPCC. **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability..** Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, p. 23. 2007.

IPCC. **Climate Change 2007: The physical science basis.** Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, p. 18. 2007.

KAHYA, E. . K. E. Trend analysis of streamflow in Turkey. **Journal of Hydrology** , v. 289 , p. 128-144, 2004.

KANE, R. P. El Niño and La Niña events and rainfall in NE and South Brazil.. **Revista Brasileira Geofísica**, v. 10, p. 49-59, 1992.

KANG, I. S.; YOO, J. H. Examination of Multi-Model Ensemble Seasonal Prediction Methods Using a Simple Climate System. **Climate Dynamics** , v. 26, p. 286-294, 2006.

KAPLAN, A. et al. Analyses of global sea surface temperature 1856-1991. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. 18, p. 567-589, 1998.

- KELMAN, J.; VIEIRA, A. M.; RODRIGUEZ-AMAYA, J. E. El niño influence on streamflow forecasting.. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 13, p. 123-138, 2000.
- KENDALL, M. G. . G. J. D. **Rank Correlation Methods**. 5. ed. Londres: Griffin, 1990.
- KENDALL, M. G. **Rank Correlation Measures**. 1. ed. Londres: Charles Griffin, 1975.
- KEPPENNE, C. L.; LALL, U. Complex singular spectrum analysis and multivariate adaptive regression splines applied to forecasting the Southern Oscillation. **Exp. Long Lead Forecast Bull.**, v. 5, p. 54-56, 1996.
- KOUSKY, V. E. Frontal influences on Northeast Brazil. **Montly Weather Review**, v. 107, n. 9, p. 1140-1153, 1979.
- KUO, H. L. Further Studies of the Parameterization of the Influence of Cumulus Convection on Large-Scale Flow.. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 31, n. 5, p. 1232-1240, 1974.
- KWON, H. H.; LALL, U.; KHALIL, A. F. Stochastic simulation model for nonstationary time series using an autoregressive wavelet decomposition:Applications to rainfall and temperature. **WATER RESOURCES RESEARCH**, v. 43, p. 1-15, 2007.
- KWON, J.-H. **Streamflow Forecasting for Geum River Basin by Using ARMAX Model**. [S.l.], p. 83. 2002.
- LALL, U.; SHARMA, A. A nearest neighbor bootstrap for resampling hydrologic time series. **WATER RESOURCES RESEARCH**, v. 32, n. 3, p. 679-693, Março 1996.
- LÁZARO, Y. M. C. **Avaliação dos modelos do IPCC – AR4 quanto à sazonalidade e à variabilidade plurianual de precipitação no século XX em três regiões da América do Sul - projeções e tendência para o século XXI**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-CE, p. 182. 2011.
- LEITH, C. E. Theoretical Skill of Monte Carlo Forescast.. **Monthly Weather Review**, v. 102, n. 6, p. 409-418, 1974.
- LIU, Y.; GUIPINGWU; ZHAO, X. Recent declines in China's largest freshwater lake: trend or regime shift? **ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS**, v. 8, n. 1, p. 9, 2013.
- LOPES, J. E. G.; BRAGA JR., B. P. F.; CONEJO, J. G. L. A. **Simulação Hidrológica: Aplicações de um Modelo Simplificado**. Anais do III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Fortaleza: [s.n.]. 1981. p. 42-62.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. SMAP -A Simplified Hydrological Model, Applied Modelling in Catchment Hydrology, Ed. V.P.Singh, **Water Resources Publications**, 1982.

LORENZ, E. N. Deterministic non-periodic flow.. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 20, n. 2, p. 130-141, 1963.

LORENZ, E. N. A study of the predictability of a 28 –Variable Atmospheric Model.. **Tellus**, v. 17, n. 3, p. 321-333, 1965.

MANN, H. B. Non-parametric tests against trend.. **Econometrica**, v. 13, p. 245-259, 1945.

MANTUA, N. J. et al. A Pacific Interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 78, p. 1069-1979, 1997.

MANTUA, N. J.; HARE, S. R. The Pacific Decadal Oscillation. **Journal of Oceanography**, v. 58, p. 35-44, 2002.

MACEIRA, M.E.P.; PENNA, D.D.J.; DAMÁZIO, J.M. Geração de Cenários Sintéticos de Energia e Vazão para o Planejamento da Operação Energética. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, ABRH, João Pessoa, 2005.

MACEIRA, M.E.P.; MERCIO, C.M.V.B. Stochastic Sreamflow Model for Hydroelectric Systems. **5th International Conference PMAPS – Probabilistic Methods Applied to Power Systems**, Vancouver, Canada, 1997.

MACHADO, L. H. R.; MENDONÇA A. M.; MENDONÇA, R. W. B.; BONATTI, J. P.. Impacto da utilização de previsões “defasadas” no sistema de previsão de tempo por conjunto do CPTEC/INPE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.1, p.54-69, 2010.

MARENGO, J. A.; SOARES, W. R. **Impacto das mudanças climáticas no Brasil e Possíveis Cenários Climáticos: Síntese do Terceiro Relatório do IPCC de 2001**. CPTEC-INPE. São Paulo, p. 29. 2005.

MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. **Revista Multiciência**, Campinas-SP, n. 8, Maio 2007.

MASON, S. J. et al. The IRI Seasonal Climate Prediction System and the 1997/1998 El Nino Event.. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 80, p. 1853-1973, 1999.

MELLO, E. L.; OLIVEIRA, F. A.; PRUSKI, F. F. EFEITO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA DA BACIA de PARACATU. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 4, p. 635-644, out./dez. 2008.

- MELLOR, G.; YAMADA, T. A hierarchy of turbulence closure models for atmospheric boundary layers.. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 31, p. 1791-1806, 1974.
- MILLY, P. C. D.; DUNNE, K. A.;, A. V. V. Global pattern of trends in streamflow e water availability in a changing climate. **Nature**, v. 438, Novembro 2005.
- MME. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro Abril-2011**. Ministério de Minas e Energia. Brasília, p. 43. 2011.
- MOLINARI, J. A general form of Kuo's cumulus parameterization. **Monthly Weather review**, v. 113, n. 8, p. 1411-1416, 1985.
- MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.
- MORAES J. M., G. A. M. . M. J. . B. M. V. . M. L. A.; VICTORIA, R. L. Análise de intervenção das séries temporais de vazão dos principais rios da bacia do Rio Piracicaba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 2, p. 65-79, 1997.
- MORETTIN, P. A. Ondas e ondaletas: da análise de Fourier à análise de ondaletas. EDUSP, 1999.
- MORETTIN, P. A.; TOLOI, M. C. C. **Análise de séries temporais**. 2. ed. São Paulo: Editora Egard Blucher, 2006.
- MOURA, A. D.; J., S. On the Dynamics of Droughts in Northeast Brazil: Observations, Theory, and Numerical Experiments With a General Circulation Model.. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 38, p. 2653-2675, 1981.
- MOURA, R. G.; HERDIES, D. L.; MENDES, D.; MENDES, M. C. D.. Avaliação do modelo regional ETA utilizando as análises do CPTEC e NCEP.**Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.1, p-46-53, 2010.
- MURPHY, A. H.; WINKLER, R. L..A general framework for forecast verification, **Monthly Weather Rev**, vol. 115 (7), pp. 1330-1338, 1986.
- MURPHY, A. H..*The Finley affair: A signal event in the history of forecast verification*, **Weather and Forecasting**, vol. 11 (1), pp. 3-20, 1996.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. 1. ed. Belo Horizonte: CPRM – Serviço Geológico do Brasil., 2007.
- NAMIAS, J. Influence of northern hemisphere general circulation on drought in northeast Brazil.. **Tellus**, v. 24, p. 336-342, 1972.
- NEW, M. et al. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. **Climate Research**, v. 21, p. 1-25, 2001.

NEW, M.; HULME, M.; JONES, P. D. Representing twentieth century space-time climate variability. Part 1: development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. **Journal of Climate**, v. 12, p. 829-856, 1999.

NOBRE, C. A. **Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança no clima**. In: Brasil, Presidência da República. Núcleo de Assuntos Estratégicos. Mudança do clima: Negociações Internacionais sobre a Mudança do Clima. Brasília, p. 147-216. 2005.

NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **J. Clim.**, v. 4, p. 957-988, 1991.

NOBRE, P.; MOURA, A. D.; SUN, L. Dynamical downscaling of seasonal climate prediction over Nordeste Brazil with ECHAM3 and NCEP'S Regional Spectral Model at IRI. **Bulletin of American Meteorological Society**, Boston, v. 82, p. 2787-2796, 2001.

NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress and rainfall over the tropical Atlantic and South America. **Journal of Climate**, v. 9, p. 2464-2479, 1996.

OLIVEIRA, K. F. L. **Previsão de vazão em uma bacia do semi-árido usando previsões climáticas numéricas de precipitação**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB, p. 77. 2006.

PANAGOULIA, D.; DIMOU, G. Linking space-time scale in hydrological modeling with respect to global climate change: model properties and experimental design. **Journal Hydrology**, v. 194, p. 15-37, 1997.

PICCILLI, D.G.A. **Avaliação da previsão hidroclimática no Alto Paraguai**. 2007. 342f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre/RS, 2007.

PIELKE, R. A. et al. A comprehensive meteorological modeling system—RAMS. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 49, n. 1, p. 69-91, 1992.

PORTO, R. L. L. et al. **Técnicas quantitativas para o gerenciamento de Recursos Hídricos**. Porto Alegre: Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1997.

PRESS, W. H. et al. **Numerical Recipes - The art of scientific computing**. 1. ed. Nova Yorke: Cambridge University Press, 1986.

RAJAGOPALAN, B.; LALL, U.; ZEBIAK, S. E. Categorical Climate Forecasts Through Regularization and Optimal Combination of Multiple GCM Ensembles. **Monthly Weather Review**, v. 130, p. 1792-1811, 2002.

REBELLO, E. R. G. **A Oscilação Decadal do Pacífico e sua possível influência no clima do Sul do Brasil**. INMET. Brasília-DF. 2005.

REGONDA, S.; B. RAJAGOPALAN, M.; ZAGONA, E. A Multimodel Ensemble Forecast Framework: Application to Spring Seasonal Flows in the Gunnison River Basin. **Water Resources Research**, v. 42, n. 9, 2006. ISSN 10.1029/2005WR004653.

REIS JUNIOR, D. S. et al. **Verificação da Previsão Operacional de Chuva sobre Bacias Hidrográficas do Estado do Ceará**. Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande: [s.n.]. 2009.

RIBEIRO, D. C. M. **Modelo de previsão de vazão aplicado ao nordeste brasileiro utilizando a informação climática para auxiliar a operação de hidrossistemas**. Fortaleza, p. 189. 2011.

ROCHA, E.J.P.; ROLIM, P.A.M.; SANTOS, D.M. Modelo estatístico hidroclimático para previsão de níveis em Altamira-PA. **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, São Paulo, 2007.

ROHN, M.C.; KAVISKI, E.; CUNHA, L.M. Estimativa de variáveis hidrológicas a partir de indicadores do fenômeno EL NIÑO. **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, ABRH, Curitiba, 2003.

SALAS, J.D.; DELLEUR, J.W.; YEVJEVICH, V.; LANE, W.L. **Applied Modeling of Hydrologic Time Series**. Water Resources Publications, Colorado. 482p, 1997.

SANTOS, C. A. C. et al. TENDÊNCIAS DOS ÍNDICES DE PRECIPITAÇÃO NO ESTADO DO CEARÁ. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 1, p. 39-47, 2009.

SANTOS, C. A. C.; BRITO, J. I. B. Análise dos índices de extremos para o semi-árido do Brasil e suas relações com TSM e IVDN. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 3, p. 303-312, 2007.

SARNAGLIA, A. J. Q.; REISEN, V. A. **Estimação robusta em processos periódicos auto-regressivos na presença de outliers aditivos**. 19o SINAPI - Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística. São Pedro-SP: [s.n.]. 2010.

SKAMAROCK, W.C. et al. **A description of the Advanced Research WRF version 2**. *NCAR Tech Notes-468+STR*, 2005.

SEBER, G. A. F. *Multivariate Observations*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 1984

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau.. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, p. 1379-1389, 1968.

SILVEIRA, C. S. **Previsão de Tempo por Ensemble Regional para o Nordeste Brasileiro.** Dissertação (Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas). Universidade Estadual do Ceará. Fortaleza-CE, p. 202. 2008.

SILVEIRA, C. S. et al. **Previsão de tempo por conjuntos para a região Nordeste do Brasil:** uma avaliação para precipitação. XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Belém: [s.n.]. 2010.

SILVEIRA, C. S. et al. VERIFICAÇÃO DAS PREVISÕES DE TEMPO PARA PRECIPITAÇÃO USANDO ENSEMBLE REGIONAL PARA O ESTADO DO CEARÁ EM 2009. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 4, p. 609-618, 2011. ISSN 0102-7786.

SILVEIRA, C. S. et al. Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século xx sobre a região nordeste do Brasil, Amazônia e bacia do Prata e análise das projeções para o cenário RCP8.5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 317-330, Setembro 2013. ISSN 0102-7786.

SMAGORINSKY, J. General circulation experiments with the primitive equations. **Monthly Weather Review**, v. 91, n. 3, p. 99-164, 1963.

SOUZA FILHO, F.A.; LALL, U. Modelo de Previsão de Vazões Sazonais e Interanuais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** v. 9, n. 2, p.61-74, ABRH, Porto Alegre, 2004.

SOUZA FILHO, F. A.; LALL, U. Seasonal to Interannual Ensemble Streamflow Forecasts for Ceara, Brazil: Applications of a Multivariate, Semiparametric Algorithm. **Water Resources Research**, v. 39, n. 11, p. 1307-1320, Novembro 2003. ISSN doi:10.1029/2002WR001373.

SOUZA FILHO, F. A.; MOURA, A. D. **Memórias do Seminário Natureza e Sociedade nos Semi-Áridos.** 1. ed. Fortaleza: FortalezaBanco do Nordeste do Brasil/Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2006.

SOUZA FILHO, F. A.; LALL, U.; PORTO, R. L. L. Role of price and enforcement in water allocation: Insights from Game Theory. **Water Resources Research**, v. 44, p. 400-420, 2008.

SPATH, H. Cluster Dissection and Analysis: Theory, FORTRAN Programs, Examples. Translated by J. Goldschmidt. New York:, Halsted Press, 1985.

SUN, L. et al. Climate Downscaling over Nordeste, Brazil, Using the NCEP RSM97. **Journal of Climate**, v. 18, p. 551-567, 2005.

TOMASELLA, J. et al. **Estudo de impacto das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos superficiais e sobre os níveis dos aquíferos na bacia do rio**

Tocantins. Convênio de Cooperação Técnico-Científica INPE-VALE. [S.l.], p. Convênio de Cooperação Técnico-Científica. 2009.

TORRENCE, C.; COMPO, G. A practical guide to wavelet analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, n. 1, p. 61-78, Janeiro 1998.

TOTH, Z.; KALNAY, E. Ensemble Forecasting at NMC: The Generation of Perturbations.. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 74, n. 12, p. 2317-2339, Dezembro 1993.

TREMBACK, C. **Numerical Simulation of a Mesoscale Convective Complex: Model Development and Numerical Results.** Tese -Department of Atmospheric Science.Colorado State University. [S.l.], p. 289. 1990.

UVO, C. B. T. U.; BERNDTSSON, R. Forecasting discharge in Amazonia using artificial neural networks.. **International Journal of Climatology**, v. 20, p. 1495-1507, 2000.

UVO, C. B.; GRAHAM, N. E. Seasonal runoff forecast for northern South America: a statistical model. **Water Resources Research**, v. 34, n. 12, p. 3515-3524, Dezembro 1998.

UVO, C. B.; TOLLE, U.; BERNDTSSON, R. Forecasting discharge in Amazonia using artificial neural networks. **INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY** , v. 20, n. 12, p. 1495-1507, 2000.

WALPOLE, R. E. et al. **Probability & Statistics for Engineers & Scientists**. 8. ed. Nova Jersey: Pearson–Prentice Hall, 2007.

WILKS, D. S. . 4. P. **Statistical Methods in the Atmospheric Science**. 1. ed. San Diego: Academic Press, 1995.

WILKS, D. S.. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, 2^a Edição, 630 p., 2006.

XU, Z. X.; TAKEUCHI, K.; ISHIDAIRA, H. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation.. **Journal of Hydrology**, v. 279, p. 144-150, 2003.

ZHANG, Y.; WALLACE, J. M.; BATTISTI, D. ENSO-like interdecadal variability: 1900-93.. **Journal of Climate**, v. 10, p. 1004-1020, 1997.

ANEXO

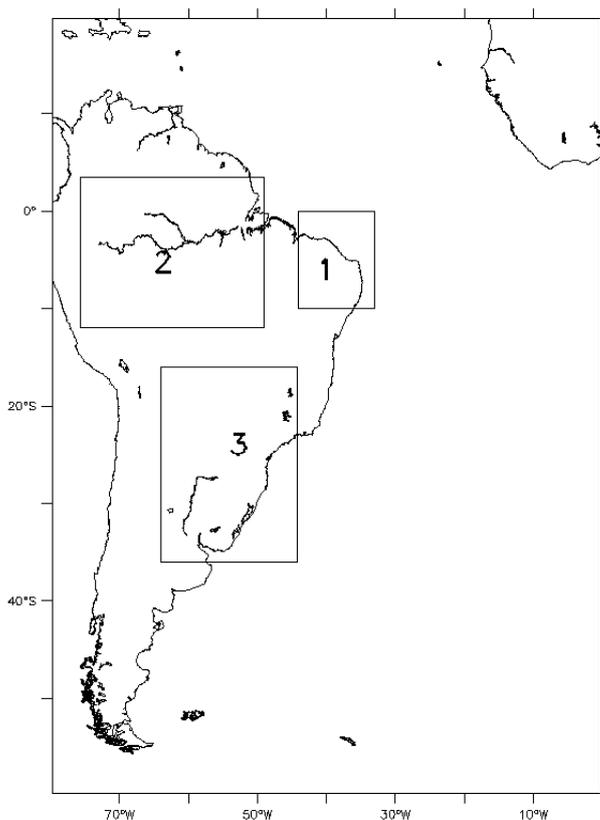
Avaliação dos modelos do CMIP5 quanto a representação dos padrões de variação climática para NEB, bacia do Prata e Amazônia.

METODOLOGIA

Região de estudo

Na Figura 151, apresenta-se a localização espacial das três grades que englobam as regiões de estudo: a do Nordeste Setentrional Brasileiro (grade 1), compreendida entre as coordenadas 0° a 10° S de latitude e 33° O a 44° O de longitude, da Amazônia (grade 2), entre as coordenadas 3,5° N a 12° S de latitude 49° O a 75,5° O de longitude e da Prata (grade 3) compreendida entre 16,5° S a 36° S de latitude e longitude 44° O a 64° O, respectivamente.

Figura SEQ Figura * ARABIC 151-Localização das regiões estudadas: Nordeste Setentrional brasileiro (1), Amazônia (2) e Rio Prata (3).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Dados observacionais

A base de dados observacionais utilizada para verificar a destreza dos modelos do IPCC sobre o continente são provenientes da *University of East Anglia/Climate Research Unit* (CRU) (New et al, 1999 e New et al, 2001) (<http://badc.nerc.ac.uk/data/cru/>). Enquanto na porção da grade sobre o oceano são usadas as reanálises 20th Century Reanalysis V2 (Compo, 2006; Whitaker, 2004)(NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, EUA, a partir do seguinte site: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>) fornecidos pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA).

O conjunto de dados utilizado corresponde à climatologia de precipitação de 1901 a 1999, com resolução de 0,5° para o continente (CRU TS 3.0) e 2,0 graus para oceano (20th Century Reanalysis V2).

Modelos do CMIP5

Os dados provenientes do CMIP5 são resultados de simulações de modelos globais de alguns centros de pesquisa que contribuem para confecção dos relatórios dos IPCC (conforme Tabela 1), forçadas pelas concentrações observadas de gases de efeito estufa durante o século XX. Para cada modelo foram considerados diferentes membros, conforme disponibilizados pelo CMIP5. O código das configurações das simulações disponibilizadas é apresentado na forma “rxitypz”, tal que:

- r = "realizações", isto é, “rodadas”, com a mesma física e condições iniciais diferentes;
- i = inicializações diferentes, com implicações físicas;
- p = perturbação na física.

Ou seja, a simulação que apresentar o seguinte código: `model_r1i1p1` significa que se trata da “rodada” 1, com inicialização 1 e física 1 do modelo “model”. O caso `r1i1p1` de cada modelo será chamado, no texto, de `run1`.

Tabela 35- Modelos do CMIP5 analisados.

Modelo	Instituição
HadGEM2-ES	<i>Met Office Hadley Centre</i>
GISS-E2-H	<i>NASA Goddard Institute for Space Studies</i>
GISS-E2-R	<i>NASA Goddard Institute for Space Studies</i>
IPSL-CM5A-LR	<i>Institut Pierre-Simon Laplace</i>
CCCMA/CanESM2	<i>Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis</i> <i>Centre National de Recherches Meteorologiques/</i>
CNRM-CM5	<i>Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en</i> <i>Calcul Scientifique (CNRM/CERFACS)</i>
INM_CM4	<i>Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of</i> <i>Science</i>

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Critérios de avaliação geral

Para a avaliação geral dos modelos do CMIP5, é proposto o modelo hierárquico da .

Em busca de identificar os modelos que melhor representam os padrões de variação do século XX, foi adotada a avaliação sazonal proposta por Silveira et al.(2012) e uma adaptação da avaliação plurianual proposta por Lázaro et al. (2011).

A avaliação foi constituída por três etapas que analisam padrões de variação de diferentes escalas: sazonal, interanual e interdecadal.

Para avaliação sazonal (AVAL_s) dos modelos, foi calculada a climatologia mensal média sobre a região de estudo para todos os modelos do IPCC e a observação (CRU continente e NOAA oceano). Em seguida foi feita uma comparação com base em alguns índices estatísticos para que possam ser definidos quais modelos possuem melhor comportamento para América do Sul.

As avaliações interanual (AVAL_a) e interdecadal (AVAL_d) baseiam-se na transformada de ondeletas (Torrence e Compo, 1998), sobretudo na comparação do espectro global de variação das séries observadas e modeladas.

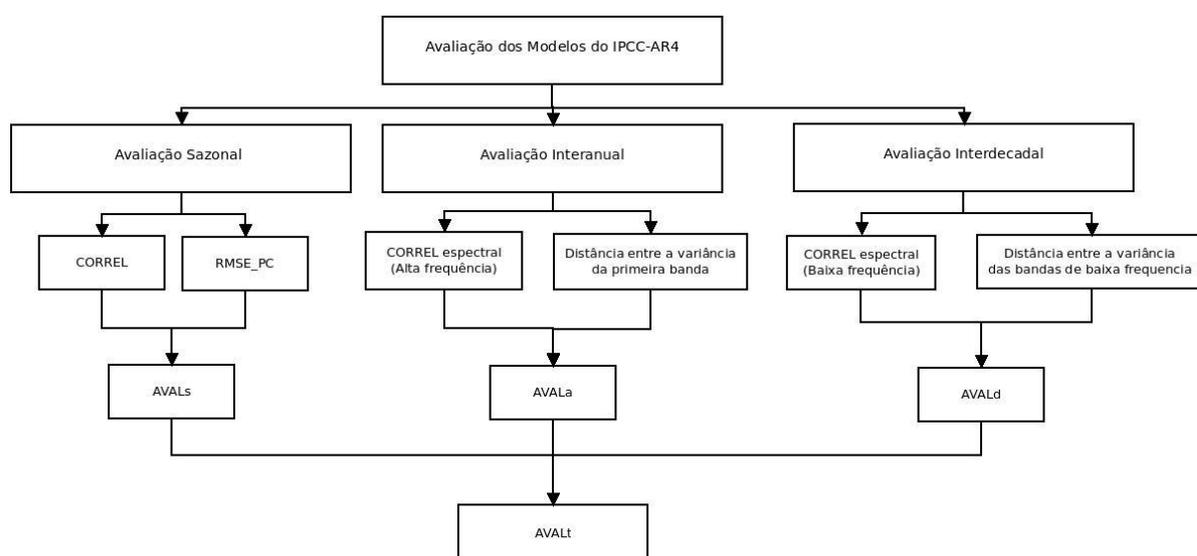
Cada uma das avaliações possui valores entre zero e 1, que representam, respectivamente, o pior e o melhor modelo para todos os índices daquela análise.

Depois de calculados $AVAL_s$ (conforme já mostrada no estudo de climatologia dos modelos do CMIP5), $AVAL_a$ e $AVAL_d$ de todos os modelos foi sugerido um índice geral, $AVAL_t$, conforme Equações 89 e 90. Este é dado pelo somatório das avaliações, ponderados por um valor γ_j (que possui valores entre zero e 1). Esta ponderação pode ser feita de acordo com os interesses do avaliador: ao atribuir valores iguais para γ_j , todas as avaliações possuem o mesmo peso no índice geral, enquanto ao atribuir valores diferentes, as avaliações têm pesos distintos na análise geral

$$AVAL_G = \sum_{j=1}^n \gamma_j \cdot AVAL_j \quad (89)$$

$$\sum_{j=1}^n \gamma_j = 1 \quad (90)$$

Figura 151- Critérios de avaliação dos modelos do CMIP5 no período de 1901 a 1999.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Critérios de avaliação do desempenho dos modelos do IPCC quanto à representação da sazonalidade

Utilizou-se como critério de avaliação a representação da sazonalidade das precipitações, que é de grande relevância para a avaliação dos impactos do clima em recursos hídricos e agricultura, afinal o início do plantio das culturas e o regime fluvial são condicionados pela distribuição temporal das chuvas. Uma má representação dessa sazonalidade pode comprometer seriamente a avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre estas duas áreas importantes. Adicionalmente, pode-se avaliar que os totais mensais de precipitação e sua sazonalidade são considerados como indicativo da

qualidade que o modelo tem de representar os sistemas geradores de chuvas e sua ocorrência.

Para avaliação sazonal dos modelos foi calculada a climatologia mensal média sobre a região de estudo para os modelos dos CMIP5 enumerados na Tabela 35 e as observações (CRU continente e NOAA oceano, sem interpolação). Em seguida, foi feita uma comparação com base em alguns índices estatísticos para que possam ser definidos quais modelos apresentam melhor comportamento para as diferentes regiões da América do Sul mostradas na Figura SEQ Figura * ARABIC 151.

As medidas estatísticas utilizadas, cujas definições estão indicadas a seguir, conforme sugerido por Silveira et al. (2012), são a raiz do erro quadrático médio da contribuição percentual mensal em relação às chuvas anuais (RMSE_PC) e a correlação de Pearson (CORREL) (Wilks, 1995), já mostrados na escala de projeção de longo prazo.

Crítérios de avaliação do desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação da variabilidade plurianual

Métodos de análise de séries temporais – Wavelets

Diante da dificuldade em se caracterizar as variabilidades, tanto de espaço, como de tempo no padrão de chuvas, torna-se necessário utilizar um método de análise adequado na localização temporal das estruturas de multiescalas. O método usado neste estudo é a Transformada de *Wavelets* (TW). Este método é recomendado para o estudo de fenômenos transientes, espacialmente heterogêneos e que atuam simultaneamente em várias escalas do escoamento (Torrence e Compo, 1998).

A TW é definida em termos de uma integral de convolução entre o sinal analisado $f(t)$ e uma função *wavelet* conhecida, expressa por:

$$C(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi_{a,b}(t)dt \quad (91)$$

em que os parâmetros a e b variam continuamente em \mathbb{R} , com $a \neq 0$, e

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a \in \mathbb{R}^+ \text{ e } b \in \mathbb{R} \quad (92)$$

Sendo as funções $\psi_{a,b}$ chamadas *wavelets* filhas e são geradas a partir de dilatações e translações da *wavelets*-mãe $\psi(t)$. A função *wavelet* considerada para a análise foi a de Morlet, dada pela seguinte expressão:

$$\psi(\eta) = \pi^{-1/4} e^{iw_0\eta} e^{-\eta^2/2} \text{ com } w_0=6 \text{ e } \eta=t/s \quad (93)$$

onde t é o tempo e s é a escala da *wavelet*. Esta função é complexa e possui características semelhantes às da série temporal analisada, tais como, simetria ou assimetria, variação temporal brusca ou suave. O algoritmo usado foi o desenvolvido por Torrence e Compo (1998).

Cr terios de avalia o

Utilizou-se como crit rio de avalia o plurianual a representa o da s rie de dados observacionais de 1901 a 1999 da precipita o, atrav s do espectro de energia global dos totais de precipita es anuais. A avalia o plurianual   dividida em duas: avalia o interanual e avalia o interdecadal.

Para avalia o dos modelos foi calculado o espectro de energia global sobre as regi es de estudo para todas as rodadas dos modelos do IPCC e as observa es. Em seguida, foram identificados os principais padr es de varia o das s ries observadas a partir do Espectro Global da Ondeleta e a partir disto foram executadas as seguintes etapas:

- decomposi o do sinal para obter os coeficientes *wavelets* no dom nio transformado. Para o caso da s rie observada de precipita o nas tr s regi es avaliadas, a decomposi o foi igual   soma das bandas caracter sticas no s culo XX e o res duo. A partir da equa o 94, tem-se:

$$P(t) = R + \sum_{i=1}^n B_i \quad (94)$$

$P(t)$   a s rie de precipita o m dia anual observada;
 R   o res duo;

i   o n mero de bandas utilizadas;

B_i   a ondeleta que representa a banda i .

Cada uma das regi es avaliadas neste trabalho apresentou tr s bandas. Sendo assim, a primeira banda do espectro observado foi considerada varia o interanual e as demais regi es do espectro foram consideradas varia o interdecadal.

- análise e processamento dos coeficientes neste domínio;
- reconstrução do sinal a partir dos coeficientes modificados.

O processo de reconstrução foi repetido para os modelos do CMIP5 para as mesmas bandas observadas. Em seguida, foi feita uma comparação com base em alguns índices estatísticos, para que possam ser definidos que modelos possuem melhor desempenho para a região de estudo.

As medidas estatísticas utilizadas, cujas definições estão indicadas a seguir, são a correlação entre a reconstituição da série do modelo e da observação para uma dada banda de frequência (CORREL) e uma “distância” calculada a partir das variâncias das rodadas dos modelos (DIST) nas diferentes bandas espectrais.

Sendo as frações entre a variância espectral da banda e a variância do espectro global da série da chuva anual f_P e f_A , tais que

$$f_P = \frac{VP_s}{VP_G}$$

$$f_A = \frac{VA_s}{VA_G} \quad (95)$$

onde VP_s é a variância da precipitação modelada na região da banda de interesse sobre a região estudada e VP_G a variância de todo o espectro global de potência da série modelada e, analogamente, VA_s é a variância da observação na banda de interesse e a VA_G a variância do espectro global de ondeletas da observação.

A distância euclidiana DIST foi calculada a partir das razões entre as variâncias por banda definidas nas Equações 96 e é definida pela equação:

$$DIST^2 = \sum_{i=1}^n (f_{P_i} - f_{A_i})^2 \quad (96)$$

em que n é o número de bandas avaliado e i é um índice que se refere à i -ésima banda.

Ao final do cálculo desses índices, foi feita uma avaliação ponderada para representação interanual e outra para interdecadal a fim de que os modelos possam ser classificados. A avaliação interanual é dada por:

$$AVAL_a = \beta_c \left(\frac{CORREL_1 - CORREL_{MIN1}}{CORREL_{MAX1} - CORREL_{MIN1}} \right) + \beta_d \left(\frac{DIST_{MAX1} - DIST_1}{DIST_{MAX1} - DIST_{MIN1}} \right) \quad (97)$$

tal que

$$\beta_c + \beta_d = 1 \quad (98)$$

Sendo, $CORREL_{MIN1}$ a menor correlação obtida entre os modelos do CMIP5 e $CORREL_{MAX1}$ a máxima correlação em relação ao observado na primeira região do espectro avaliada. De modo similar, $DIST_{MAX1}$ é a o valor máximo da distância entre modelo e observação, referente à variabilidade na banda interanual e $DIST_{MIN1}$, o valor mínimo correspondente.

A avaliação interdecadal é dada por:

$$AVAL_d = \sigma_c \left(\frac{CORREL_2 - CORREL_{MIN2}}{CORREL_{MAX2} - CORREL_{MIN2}} \right) + \sigma_d \left(\frac{DIST_{MAX2} - DIST_2}{DIST_{MAX2} - DIST_{MIN2}} \right) \quad (99)$$

$$\sigma_c + \sigma_d = 1 \quad (100)$$

Sendo $CORREL_{MAX2}$, $CORREL_{MIN2}$, $DIST_{MAX2}$ e $DIST_{MIN2}$ referentes à variabilidade interdecadal, com definições análogas às variáveis correspondentes no caso interanual.

As variáveis β_c , β_r , σ_c e σ_d assumem valores entre 0 e 1 (conforme Equações 14 e 16). Para valores $\beta_c > \beta_d$ e $\sigma_c > \sigma_d$, a correlação exerce maior influência na avaliação do modelo, enquanto que para $\beta_c < \beta_d$ e $\sigma_c < \sigma_d$, o índice DIST exerce maior efeito.

As variáveis $AVAL_y$ e $AVAL_d$ assumem valores entre 0 e 1 que indicam, respectivamente, o pior entre os modelos avaliados e o melhor deles, segundo o critério adotado.

RESULTADOS

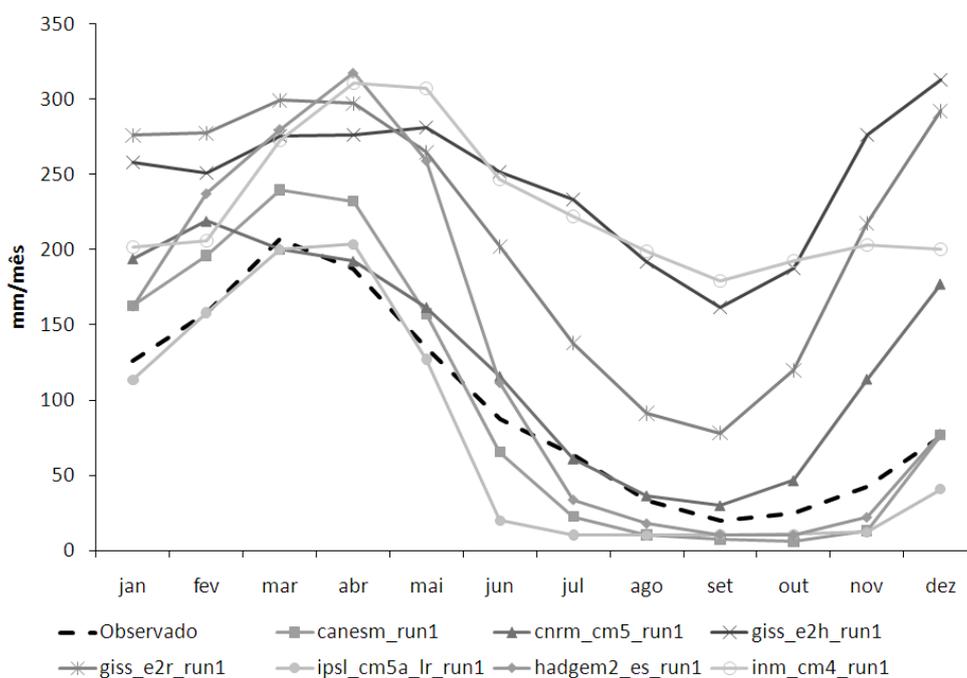
Esta seção mostra os resultados da avaliação para o NEB, bacia do prata e Amazônia.

Nordeste setentrional do Brasil

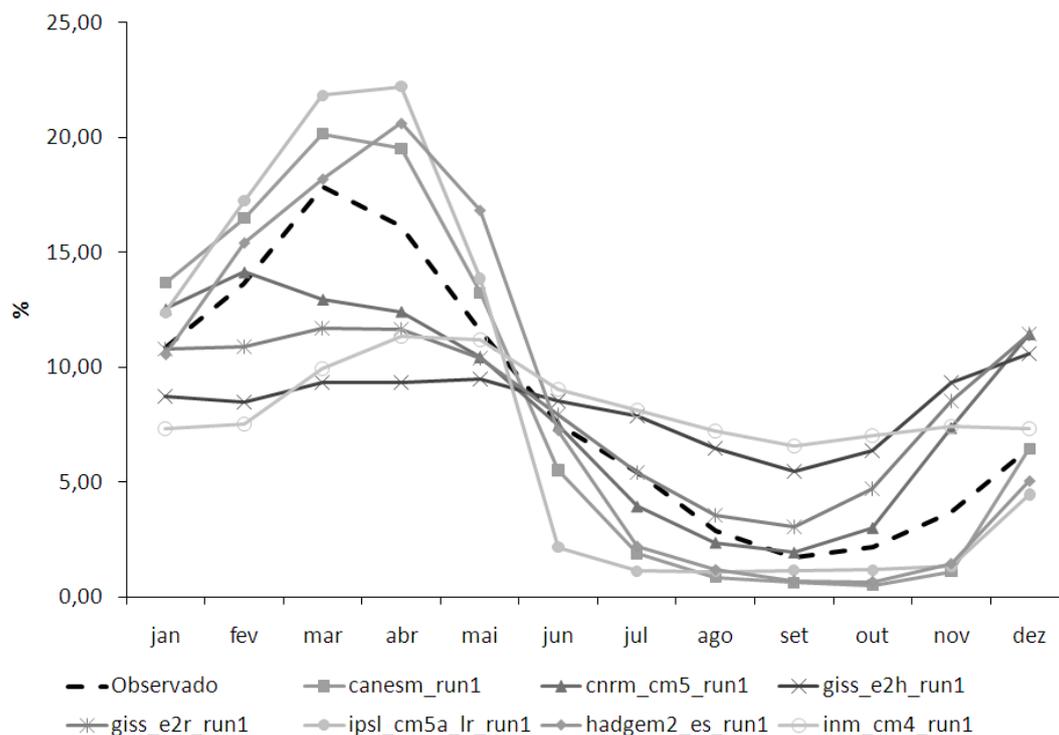
A Figura 152 mostra as climatologias dos modelos do CMIP5 (apenas a rodada 1) em comparação com as observações sobre a região do Nordeste Setentrional do Brasil, conforme indicado na grade 1 da Figura 1. A maioria dos modelos representa razoavelmente a climatologia observada, porém, principalmente no período da estação chuvosa, os modelos divergem quanto à quantidade de chuva nessa região.

Os modelos GISS_E2R_RUN1, GISS_E2H_RUN1 e INM_CM4_RUN1 superestimam a precipitação climatológica em todos os meses, resultando em totais anuais respectivamente 120%, 155% e 137% acima do observado. Os modelos GISS_E2H_RUN1 e INM_CM4_RUN1 apresentam erros na distribuição sazonal média da precipitação, subestimando a contribuição percentual das chuvas no primeiro semestre para o total anual e superestimando-a no segundo. O modelo HADGEM2_ES_RUN1 superestima em cerca de 30% a precipitação nos meses da estação chuvosa, enquanto o modelo francês IPSL-CM4 subestima a climatologia da precipitação durante a pré-estação e pós-estação (total anual 21% abaixo das observações), superestimando a contribuição percentual das chuvas entre janeiro e maio. O modelo CNRM_CM5 superestima a precipitação observada nos meses de pré-estação, indicando uma contribuição percentual no trimestre novembro, dezembro e janeiro cerca de 10% maior do que nas observações.

Figura 152-Climatologia dos Modelos do CMIP5 para século XX (1901-1999) para o Nordeste Setentrional do Brasil: (a) Quantidade de precipitação por mês; (b) Percentual de chuva por mês.



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Tabela 36, são mostrados os índices estatísticos da avaliação dos modelos do CMIP5 em ordem de classificação para região do Nordeste Setentrional do Brasil, para γ igual a 1/3. As rodadas r2i1p1, r3i1p1 e r1i1p1 do modelo CanESM, nessa ordem, apresentaram o maior valor de $AVAL_t$ para região do Nordeste Setentrional do Brasil, sugerindo que este modelo possui a melhor representação dos padrões de variações da região.

Quanto à avaliação sazonal, a maioria dos modelos indicou correlações superiores a 0,85 e erro quadrático inferior a 5% em relação ao percentual de chuva mensal. O modelo canadense CanESM apresentou correlações superiores a 0,97 e RMSE_PC inferior a 2,4%, o que o classifica como o melhor modelo para região Nordeste Setentrional do Brasil, segundo a avaliação sazonal proposta neste trabalho (usando α_c igual a 0,5), seguido pelo modelo HADGEM2_ES. Os modelos GISS_E2H e INM_CM4 apresentaram correlações inferiores a 0,75, bem abaixo dos demais modelos, e os maiores RMSE_PC para todas as rodadas. Isto levou esses modelos a apresentarem $AVAL$ inferior a 0,30, indicando que os mesmos não representam adequadamente a sazonalidade da precipitação no Nordeste Setentrional Brasileiro.

Quanto à avaliação interanual, a maioria dos modelos apresenta correlações superiores a 0,70, indicando uma boa representação dos padrões de variação nessa escala, sendo o modelo INCM4_r1i1p1 o que obteve os maiores valores de AVALA, seguido pelo modelo GISS_E2R_r5i1p1.

Quanto à avaliação interdecadal, a maioria dos modelos indicou correlações negativas, evidenciando sua dificuldade em representar as frequências mais baixas de variação da série. O modelo CANESM_r2i1p1 apresentou o menor DIST associado a uma correlação de 0,371, por isso obteve o maior AVALL interanual.

Tabela 36-Modelos do CMIP5, CORREL, RMSE_PC, RMSE, AVALL e classificação para $\alpha = \alpha_r = 0,5$ para o Nordeste Setentrional do Brasil.

Models	Sazonal			Interanual			Interdecadal			Total AVALL	Cla s
	RMSE_PC	Corre l	Aval s	Corre l	DIS T	Aval a	Corre l	DIS T	Aval d		
canesm_r2i1p1	2,290	0,987	0,992	0,903	1,240	0,588	0,371	0,838	0,851	0,810	1
canesm_r3i1p1	2,386	0,986	0,972	0,950	1,154	0,731	0,231	0,978	0,681	0,795	2
canesm_r1i1p1	2,352	0,986	0,979	0,933	1,099	0,771	0,682	1,446	0,500	0,750	3
giss_e2r_r5i1p1	3,257	0,825	0,606	0,871	0,994	0,817	0,308	0,955	0,732	0,718	4
cnrm_cm5_r1i1p1	2,642	0,871	0,786	0,737	0,904	0,769	-0,141	1,060	0,462	0,672	5
canesm_r5i1p1	2,254	0,987	1,000	0,807	0,998	0,743	-0,387	1,198	0,251	0,665	6
hadgem2_es_r1i1p1	2,494	0,970	0,931	0,836	1,014	0,758	-0,521	1,123	0,255	0,648	7
giss_e2r_r2i1p1	3,210	0,832	0,624	0,763	1,077	0,611	0,478	1,082	0,702	0,646	8
ipsl_cm5a_lr_r4i1p1	3,284	0,968	0,768	0,820	1,119	0,627	0,447	1,350	0,478	0,625	9
giss_e2r_r1i1p1	3,215	0,834	0,626	0,929	1,191	0,669	-0,154	1,005	0,500	0,599	10
ipsl_cm5a_lr_r2i1p1	3,387	0,966	0,745	0,856	1,008	0,786	-0,514	1,130	0,252	0,594	11
ipsl_cm5a_lr_r1i1p1	3,342	0,966	0,755	0,800	1,082	0,645	-0,303	1,153	0,322	0,574	12
giss_e2r_r3i1p1	3,263	0,827	0,608	0,913	1,351	0,480	-0,209	0,812	0,630	0,573	13
canesm_r4i1p1	2,311	0,987	0,988	0,489	1,052	0,341	0,012	1,258	0,370	0,566	14
Incm4_r1i1p1	4,340	0,725	0,270	0,846	0,924	0,865	-0,122	1,154	0,396	0,510	15
giss_e2r_r4i1p1	3,207	0,835	0,629	0,673	1,168	0,416	-0,297	0,988	0,455	0,500	16
ipsl_cm5a_lr_r3i1p1	3,362	0,965	0,749	0,705	1,369	0,235	-0,482	0,908	0,441	0,475	17
giss_e2h_r4i1p1	4,604	0,622	0,096	0,782	0,945	0,773	0,330	1,237	0,519	0,462	18
giss_e2h_r1i1p1	4,610	0,608	0,079	0,801	1,001	0,733	-0,214	0,905	0,554	0,455	19
giss_e2h_r3i1p1	4,613	0,619	0,090	0,692	0,904	0,719	-0,345	0,853	0,541	0,450	20
giss_e2h_r5i1p1	4,597	0,629	0,105	0,760	0,986	0,705	-0,178	1,145	0,380	0,396	21
giss_e2h_r2i1p1	4,717	0,560	0,000	0,676	1,033	0,564	-0,146	0,873	0,608	0,391	22

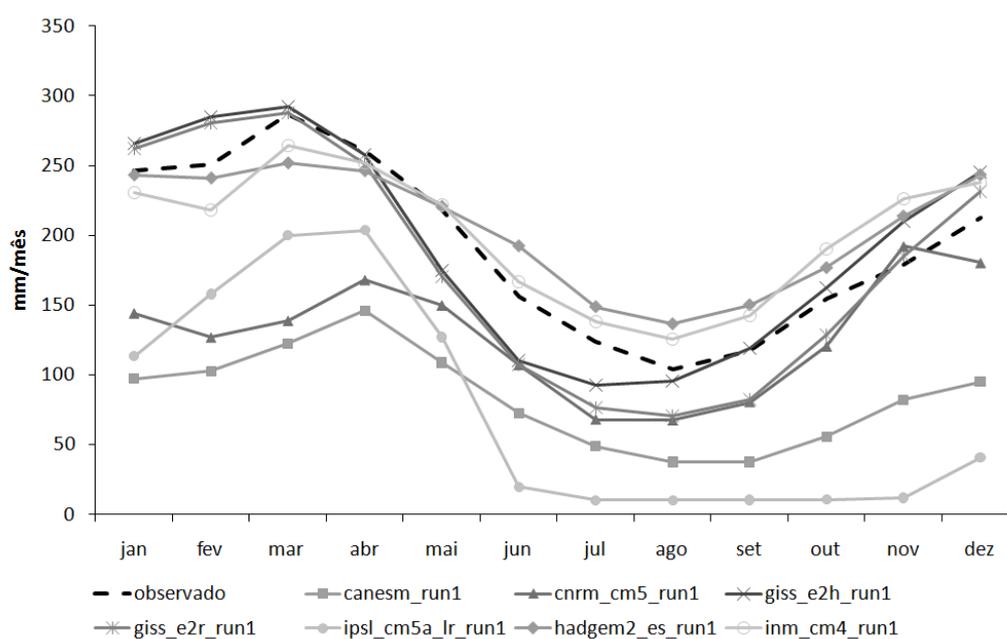
Região Amazônica

A Figura 153 mostra as climatologias dos modelos do CMIP5 (apenas a rodada 1) em comparação com o observado sobre a região da Amazônia, conforme indicado na grade 2 da Figura 1. Os modelos divergem quanto à quantidade de chuva nessa região.

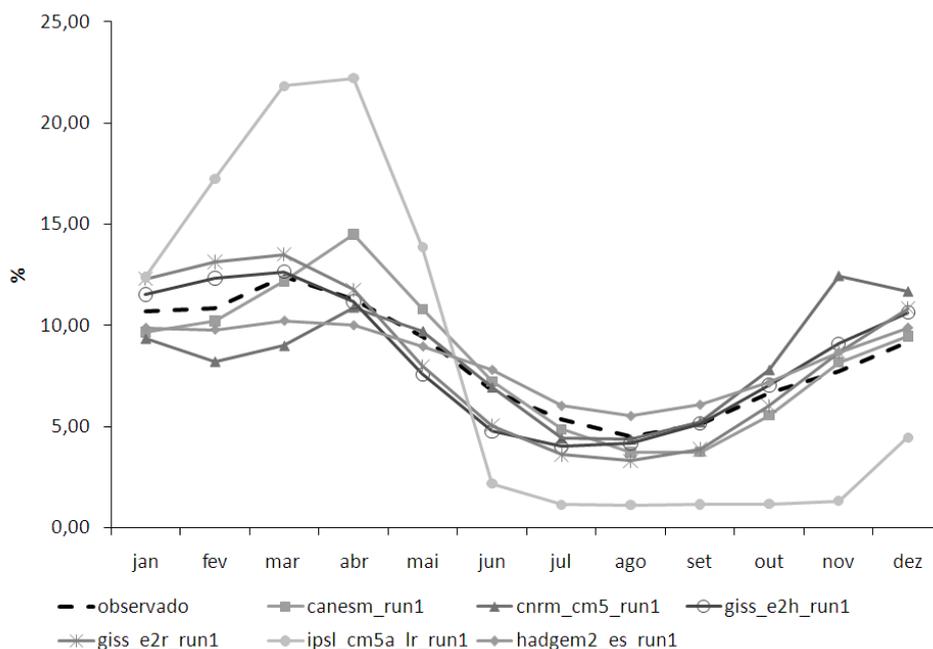
Os modelos CANESM, CNRM_CM5 e IPSL_CM5A_LR subestimam a precipitação climatológica em todos os meses, resultando em totais anuais respectivamente 56%, 33% e 60% abaixo do observado. Além disso, o IPSL_CM5A_LR apresenta erros na representação dos padrões de variação sazonal, superestimando bastante a contribuição percentual das chuvas no primeiro semestre para o total anual e subestimando-a no segundo.

O modelo HADGEM2_ES subestima a precipitação observada no primeiro quadrimestre do ano e superestima nos demais meses, mostrando erro de fase na representação da sazonalidade, enquanto os modelos GISS_E2R e GISS_E2H superestimam a precipitação climatológica no primeiro e último trimestre do ano, porém subestimam nos demais períodos, apresentando também um pequeno erro de fase.

Figura 153-Climatologia dos Modelos do CMIP5 para século XX (1901-1999) para a Região Amazônica: (a) Quantidade de precipitação por mês; (b) Percentual de chuva por mês.



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Tabela 37 são mostrados os índices estatísticos dos modelos do CMIP5 em ordem de classificação para região Amazônica, para γ igual a 1/3.

Quanto à avaliação sazonal, o modelo HADGEM2_ES apresentou o maior AVAL para região amazônica, porém, os modelos CANESM, GISS_E2R, e GISS_E2H também apresentaram AVAL superiores a 0,90. O modelo CNRM_CM5 apresentou correlação de aproximadamente 0,70, mostrando-se inferior aos demais na representação da sazonalidade nessa região, enquanto o modelo IPSL_CM5A_LR, apesar de apresentar correlação superior a 0,90, indicou RMSE_PC ligeiramente superior aos demais, o que o levou a ser classificado entre os piores modelos na representação da sazonalidade na região Amazônica. A avaliação geral apontou algumas rodadas dos modelos GISS_E2H e GISS_E2R como melhores representações dos padrões de variação na região amazônica.

Tabela 37-Modelos do CMIP5, CORREL, RMSE_PC, RMSE, AVAL e classificação dos para $\alpha = \alpha = 0,5$ para a Região Amazônica.

Models	Sazonal			Interanual			Interdecadal			Avalt	Clas
	RMSE_P C	Corre l	Aval s	Corre l	DIST	Aval	Correl	DIST	Aval		
giss_e2h_r1i1p1	1,172	0,938	0,927	0,892	0,012	0,921	0,579	0,620	0,530	0,792	1
giss_e2r_r3i1p1	1,408	0,966	0,950	0,948	0,060	0,920	-0,283	0,897	0,360	0,743	2

giss_e2h_r2i1p1	1,224	0,933	0,914	0,891	0,071	0,826	-0,356	1,210	0,466	0,735	3
giss_e2r_r2i1p1	1,494	0,966	0,942	0,787	0,017	0,772	-0,389	1,027	0,378	0,697	4
ipsl_cm5a_lr_r2i1p1	2,396	0,972	0,860	0,899	0,039	0,888	-0,637	1,091	0,323	0,690	5
giss_e2r_r5i1p1	1,458	0,963	0,941	0,799	0,083	0,684	0,305	0,565	0,416	0,681	6
giss_e2r_r1i1p1	1,427	0,966	0,949	0,864	0,193	0,600	0,355	0,679	0,481	0,676	7
canesm_r5i1p1	1,325	0,941	0,917	0,897	0,099	0,792	0,062	0,505	0,311	0,673	8
giss_e2h_r5i1p1	1,179	0,938	0,927	0,741	0,138	0,522	-0,037	1,204	0,569	0,673	9
IncM4_r1i1p1	1,053	0,934	0,931	0,951	0,142	0,796	-0,729	1,049	0,275	0,667	10
giss_e2h_r3i1p1	1,223	0,932	0,912	0,827	0,182	0,568	0,351	0,519	0,412	0,631	11
canesm_r4i1p1	1,187	0,954	0,953	0,653	0,144	0,396	-0,597	1,590	0,544	0,631	12
canesm_r2i1p1	1,298	0,946	0,929	0,783	0,292	0,337	0,777	0,550	0,567	0,611	13
hadgem2_es_r1i1p1	1,070	0,960	0,975	0,728	0,079	0,597	-0,628	0,922	0,255	0,609	14
canesm_r1i1p1	1,228	0,941	0,926	0,651	0,139	0,400	0,702	0,390	0,475	0,600	15
ipsl_cm5a_lr_r4i1p1	2,280	0,972	0,872	0,576	0,199	0,206	0,259	1,285	0,701	0,593	16
cnrm_cm5_r1i1p1	2,068	0,679	0,399	0,877	0,050	0,841	0,692	0,508	0,521	0,587	17
giss_e2r_r4i1p1	1,427	0,968	0,953	0,634	0,152	0,357	-0,431	0,947	0,331	0,547	18
canesm_r3i1p1	1,443	0,939	0,902	0,885	0,331	0,411	-0,301	0,834	0,327	0,547	19
ipsl_cm5a_lr_r3i1p1	2,447	0,975	0,860	0,815	0,169	0,571	-0,643	0,795	0,197	0,543	20
giss_e2h_r4i1p1	1,200	0,936	0,921	0,601	0,183	0,266	-0,482	1,083	0,371	0,519	21
ipsl_cm5a_lr_r1i1p1	5,996	0,905	0,382	0,875	0,067	0,812	0,136	0,420	0,300	0,498	22

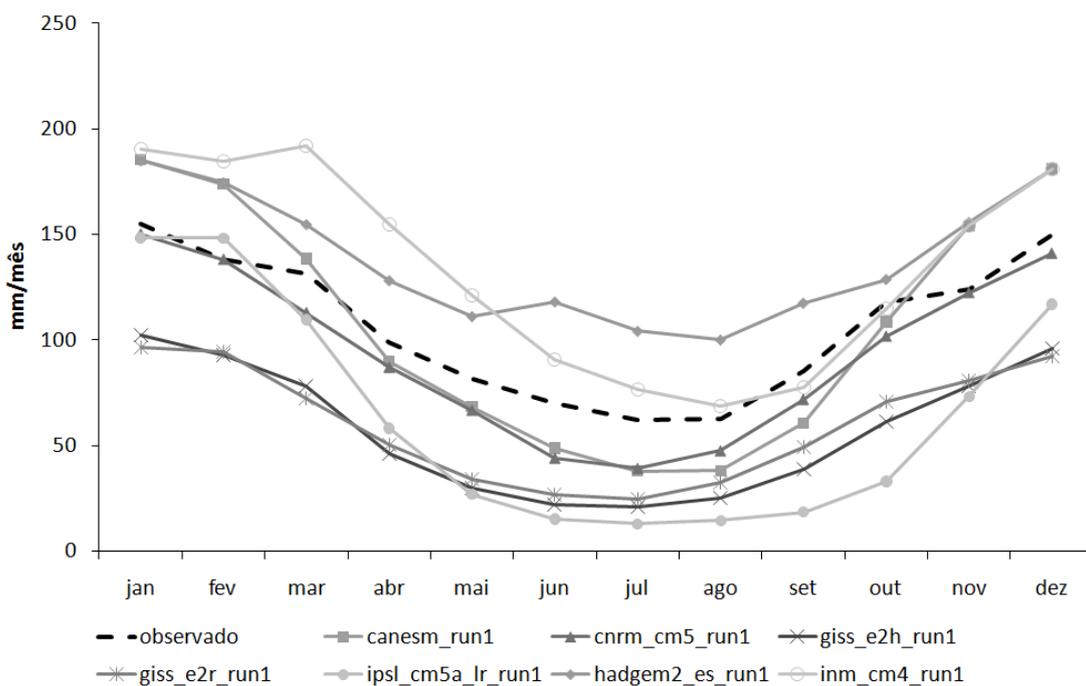
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Bacia da Prata

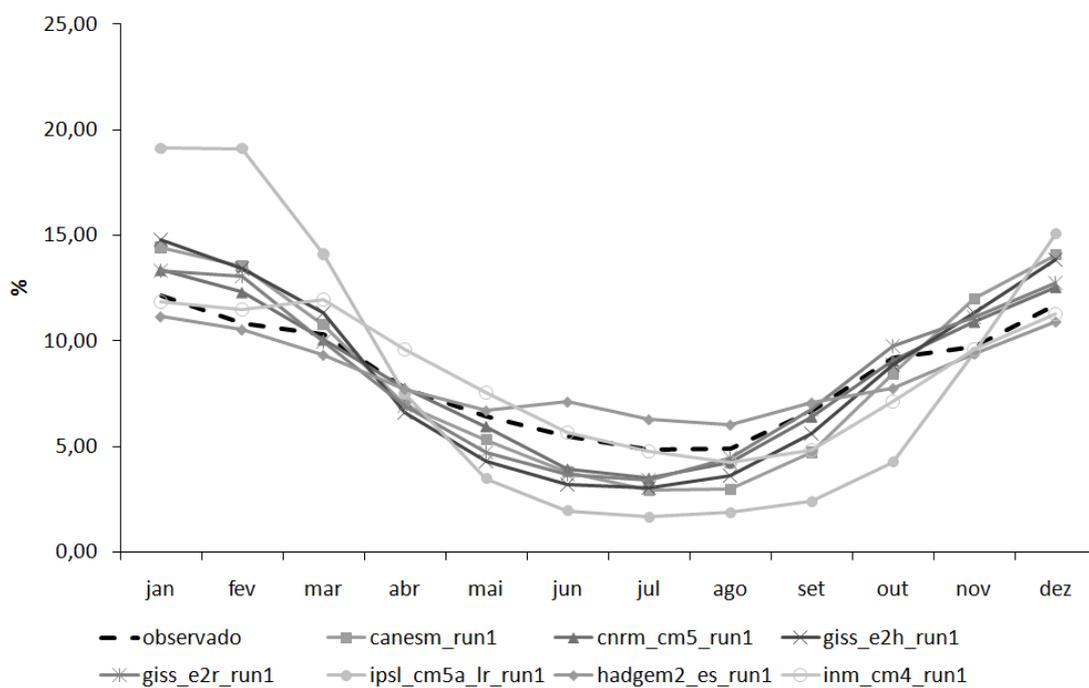
A Figura 6 mostra as climatologias dos modelos do CMIP5 (apenas a rodada 1 de cada modelo) em comparação com o observado sobre a região da bacia da Prata, conforme indicado na grade 3 da Figura 1. Os modelos representam bem a climatologia observada, o que fica evidente na Figura 3a e nas correlações mostradas na Tabela 3.

O modelo HADGEM2_ES superestima a precipitação climatológica em todos os meses, resultando em um total anual 30% acima do observado. Além disso, apresenta erros na distribuição sazonal da precipitação, subestimando a contribuição percentual das chuvas no primeiro e último trimestre do ano para o total anual e superestimando-a nos demais períodos do ano. Os modelos GISS_E2R, GISS_E2H e IPSL_CM5_LR subestimam a precipitação climatológica em todos os meses, resultando em totais anuais respectivamente 46%, 43% e 39% abaixo do observado. Além disso, o modelo IPSL_CM5A_IR apresenta erros de fase na distribuição anual da precipitação, superestimando a contribuição percentual das chuvas nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março e subestimando-a nos demais meses.

Figura 154-Climatologia dos Modelos do CMIP5 para século XX (1901-1999) para bacia da Prata: (a) Quantidade de precipitação por mês; (b) Percentual de chuva por mês.



(a)



(b)

Fonte:Elaborada pelo próprio autor.

Na Tabela 3 são mostrados os índices estatísticos RMSE_PC, CORREL e AVAL dos modelos do CMIP5 em ordem de classificação para bacia da Prata, para α_c igual a 0,5. Todos os modelos indicaram correlações superiores a 0,90 e erro quadrático inferior a 5% em relação ao percentual de chuva mensal. O modelo CNRM_CM5 apresentou correlação superior a 0,99 e RMSE_PC inferior a 1%, o que o classifica como o melhor modelo para região da bacia da Prata, segundo a avaliação proposta neste trabalho (usando α_c igual a 0,5), seguido pelos modelos GISS_E2R e GISS_E2H. O modelo IPSL_CM5A apresentou correlação ligeiramente inferior aos demais modelos, associada a um RMSE_PC elevado (superior a 4%). Isto levou esse modelo a apresentar AVAL aproximadamente igual a 0 (zero), indicando que o mesmo possui maior dificuldade de representar a sazonalidade da precipitação na bacia da Prata. A rodada ipsl_cm5a_lr_r1i1p1 possui dificuldade de representação dos padrões de variação, tanto na Prata, quanto na região amazônica, sendo o pior classificado, segundo a avaliação proposta nesse trabalho, nas duas regiões. Em contraste, o modelo CNRM_CM5_r1i1p1 apresentou a melhor a avaliação geral para o rio da Prata.

Tabela 38-Modelos do CMIP5, CORREL, RMSE_PC, RMSE, AVAL e classificação para $\alpha_c = \alpha_r = 0,5$ para a bacia da Prata.

Models	Sazonal			Interanual			Interdecadal			Avalt	Clas
	RMSE_PC	Correl	Avals	Correl	DIST	Aval	Correl	DIST	Aval		
cnrm_cm5_r1i1p1	0,946	0,990	0,992	0,873	0,191	0,703	0,312	0,301	0,877	0,857	1
giss_e2h_r2i1p1	1,735	0,989	0,870	0,885	0,197	0,711	0,456	0,160	0,979	0,853	2
giss_e2r_r4i1p1	1,273	0,980	0,873	0,797	0,019	0,794	0,281	0,627	0,752	0,806	3
canesm_r4i1p1	1,887	0,983	0,807	0,712	0,099	0,596	0,513	0,343	0,936	0,780	4
giss_e2r_r5i1p1	1,225	0,981	0,889	0,712	0,060	0,639	0,466	0,661	0,809	0,779	5
giss_e2h_r5i1p1	1,819	0,991	0,872	0,749	0,070	0,676	0,295	0,539	0,788	0,779	6
giss_e2h_r4i1p1	1,694	0,985	0,849	0,727	0,053	0,666	0,150	0,389	0,787	0,767	7
hadgem2_es_r1i1p1	0,965	0,964	0,814	0,664	0,006	0,635	0,334	0,729	0,736	0,729	8
canesm_r1i1p1	1,817	0,985	0,827	0,721	0,059	0,651	-0,011	0,611	0,651	0,709	9
canesm_r2i1p1	1,916	0,985	0,813	0,919	0,345	0,595	0,328	0,814	0,705	0,704	10
giss_e2r_r1i1p1	1,246	0,979	0,870	0,682	0,151	0,500	0,027	0,420	0,732	0,701	11
canesm_r3i1p1	1,998	0,981	0,778	0,765	0,328	0,414	0,240	0,260	0,865	0,686	12
giss_e2h_r3i1p1	1,716	0,989	0,874	0,568	0,026	0,489	-0,129	0,509	0,643	0,669	13
giss_e2r_r2i1p1	1,234	0,988	0,934	0,673	0,134	0,507	-0,816	0,454	0,410	0,617	14
giss_e2r_r3i1p1	1,227	0,976	0,857	0,683	0,114	0,541	-0,839	0,588	0,355	0,584	15
canesm_r5i1p1	1,897	0,985	0,819	0,559	0,025	0,480	-0,850	0,542	0,367	0,555	16
giss_e2h_r1i1p1	1,801	0,989	0,857	0,661	0,172	0,450	-0,836	0,852	0,265	0,524	17
ipsl_cm5a_lr_r4i1p1	4,357	0,918	0,006	0,945	0,231	0,753	0,109	0,452	0,750	0,503	18

ipsl_cm5a_lr_r3i1p1	4,334	0,917	0,003	0,788	0,011	0,791	0,074	0,570	0,696	0,497	19
ipsl_cm5a_lr_r2i1p1	4,338	0,920	0,025	0,859	0,285	0,582	-0,086	0,417	0,691	0,433	20
IncM4_r1i1p1	1,175	0,912	0,432	0,734	0,462	0,226	0,020	0,798	0,597	0,419	21
ipsl_cm5a_lr_r1i1p1	4,337	0,917	0,004	0,766	0,106	0,658	-0,353	1,598	0,182	0,281	22

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

CONCLUSÕES

A avaliação proposta neste trabalho identificou os melhores e piores modelos na representação dos padrões de variação da precipitação no século XX para o Nordeste Setentrional do Brasil, Amazônia e bacia da Prata. Essas informações podem ser usadas por cientistas e gestores na análise das projeções de mudanças climáticas sobre essas regiões o século XXI e seus impactos. Em particular, os resultados deste trabalho podem ser utilizados na avaliação do possível impacto das mudanças no clima sobre as vazões e evapotranspiração nessas regiões, utilizando o maior número de modelos possível para tratar e dimensionar a incerteza existente nessas projeções.

Quanto à avaliação sazonal dos modelos do CMIP5 listados, algumas observações são destacadas:

- Os modelos globais do CMIP5 analisados apresentam correlações elevadas em relação à climatologia observada no período de 1901 a 1999 para as regiões do Nordeste Setentrional do Brasil, bacia da Prata e Amazônia, mostrando que os modelos são capazes de capturar os padrões de variações sazonais;
- A avaliação feita com os dados médios apontou o modelo CANESM como aquele com mais altos valores de AVALs para o Nordeste Setentrional Brasileiro, seguido pelo modelo HADGEM2_ES. O modelo CNRM_CM5 apresentou o maior AVAL para região da Prata, seguido pelos modelos GISS_E2R e GISS_E2H. Já para a Amazônia, o modelo HADGEM2_ES é o melhor classificado, segundo o método de avaliação deste trabalho.
- Os modelos apresentaram GISS_E2H e INM_CM4 correlações sazonais ligeiramente inferiores aos demais no Nordeste Setentrional do Brasil. Dessa forma, mostram-se inferiores aos outros modelos do CMIP5 na representação da climatologia média sobre a região.
- O modelo IPSL_CM5A apresenta AVALs aproximadamente igual a 0 (zero) na bacia da Prata, indicando que o mesmo possui dificuldade de representar a sazonalidade nesta região.

- O modelo CNRM_CM5 apresentou correlação sazonal de aproximadamente 0,70 na região amazônica, inferior aos demais na representação da sazonalidade nessa região.

Quanto às avaliações interdecadal e interanual dos modelos IPCC algumas observações são destacadas:

- A maioria dos modelos analisados capta os padrões de variação interanual, com algumas rodadas dos modelos globais do IPCC apresentando valores bastante elevados de correlação em relação à precipitação observada durante o século XX. Porém, o mesmo não acontece com a avaliação interdecadal, para a qual a maioria dos modelos mostra muita dificuldade;
- As rodadas do modelo ipsl-cm5a-lr_r1i1p1 não representa apropriadamente a variabilidade plurianual na Amazônia e na bacia da Prata, o mesmo acontecendo com as rodadas do modelos GISS_E2H em relação ao Nordeste setentrional.

A avaliação geral apontou como melhores simulações do clima presente sobre o Nordeste setentrional as rodadas do modelo CANESM. Para a bacia da Prata as rodadas do modelo francês CNRM_CM5_r1i1p1 apresentaram altos valores de AVALg. Para a Amazônia destacam-se as rodadas do modelo GISS-E2-R_r1i1p1. Estes modelos podem ser considerados como uma boa opção para avançar na investigação dos efeitos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos na América do Sul.