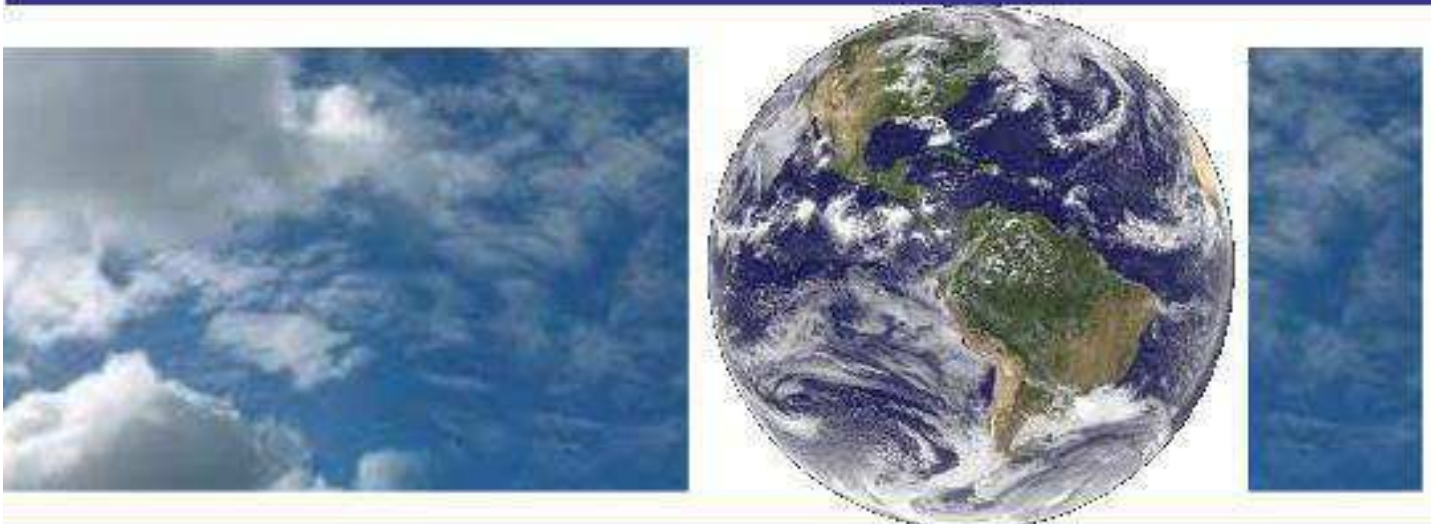


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

METEOROLOGIA



TESE DE DOUTORADO

Edvânia Pereira dos Santos

**Variabilidade Espaço-Temporal de Chuvas Extremas
na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco: uma
aplicação conjunta do Índice RAI (Rainfall Anomaly
Index) e Ondaletas**

Campina Grande, Agosto de 2016



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**Variabilidade Espaço-Temporal de Chuvas Extremas na Bacia
Hidrográfica do Rio São Francisco: uma aplicação conjunta do Índice RAI
(Rainfall Anomaly Index) e Ondaletas**

EDVÂNIA PEREIRA DOS SANTOS

**CAMPINA GRANDE – PB
AGOSTO DE 2016**

Variabilidade espaço-temporal de chuvas extremas na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco: Uma Aplicação conjunta do índice RAI (RainfallAnomaly Index) e Ondaletas

Tese apresentada ao Curso de Doutorado em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para a obtenção do título de Doutor em Meteorologia.

Área de Concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas.

Orientadora: Profa. Dra. Magaly de Fátima Correia.

CAMPINA GRANDE – PB
AGOSTO DE 2016

S237v

Santos, Edvânia Pereira dos.

Variabilidade espaço-temporal de chuvas extremas na bacia hidrográfica do rio São Francisco : uma aplicação conjunta do índice RAI (Rainfall Anomaly Index) e ondaletas / Edvânia Pereira dos Santos. - Campina Grande, 2018.

151 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2016.

"Orientação: Profa. Dra. Magaly de Fátima Correia".

Referências.

1. Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. 2. RAI (Rainfall Anomaly Index). 3. Transformada de Ondaletas. I. Correia, Magaly de Fátima. II. Título.

CDU 556.51(043)


FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO BIBLIOTECÁRIO GUSTAVO DINIZ DO NASCIMENTO CRB - 15/515

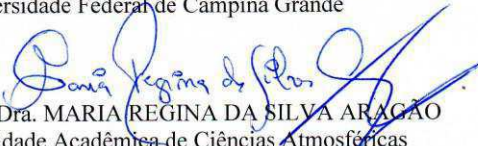
EDVÂNIA PEREIRA DOS SANTOS


VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DE CHUVAS EXTREMAS NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO: UMA APLICAÇÃO CONJUNTA DO
ÍNDICE RAI (Rainfall Anomaly Index) E ONDALETAS


TESE APROVADA EM 26/08/2016

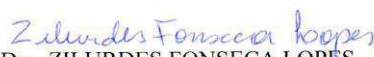
BANCA EXAMINADORA


Profa. Dra. MAGALY DE FATIMA CORREIA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Profa. Dra. MARIA REGINA DA SILVA ARAGÃO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Profa. Dra. CÉLIA CAMPOS BRAGA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. LINCOLN ELOI DE ARAÚJO
Departamento de Engenharia e Meio Ambiente
Centro de Ciências Aplicadas e Educação
Universidade Federal da Paraíba


Profa. Dra. ZILURDES FONSECA LOPES
Agência Pernambucana de Águas e Clima
Gerência de Meteorologia e Mudanças Climáticas.

Dedicatória

Dedico este trabalho a Maria, mãe de Jesus, minha maior intercessora. Aos meus pais, pelo apoio e amor incondicional.

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar, a Deus, minha maior fortaleza. Por Ele aprendi a enfrentar os obstáculos e a prosseguir com meus sonhos e objetivos.

Aos meus pais, que são exemplo de vida e dedicação. A simplicidade que os cerca me foi inspiração para não desistir nunca!

À minha orientadora, DraMagaly de Fátima Correia, que me apoiou desde a graduação, acreditando no meu potencial. Neste tempo foi construída uma relação de amizade, e pessoalmente, foi um período de grande aprendizado. A “mãezona” que foi firme quando necessitei, e ao mesmo tempo atenciosa e compreensiva. Muito obrigada por toda paciência e apoio em todo esse tempo que trabalhamos juntas.

À professora Dra Regina, pelo zelo e exemplo de pesquisadora, que serve de inspiração para todos os que a conhecem.

Aos professores e funcionários do Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande, pelo apoio, exemplo e dedicação interina. A todos tenho imenso apreço.

À equipe da Biblioteca Central da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) pela presteza no atendimento.

Ao CNPQ pelo auxílio financeiro que possibilitou a realização desta pesquisa.

Ao INMET e a ANA pela contribuição e disponibilização de dados indispensáveis à realização desta pesquisa.

À Fabrício Daniel dos Santos Silva pela importante colaboração na realização deste trabalho.

Aos amigos conquistados dentro dos corredores da universidade, principalmente aos que estiveram no mesmo âmbito de trabalho: Samira, Pollyanna Kelly, Leonardo Fagner, Fernanda, Milla, Rafaella Vilar, e a tantos outros que foram chegando e saindo, mas sempre na lembrança de experiências inesquecíveis.

À APAC (Agência Pernambucana de Águas e Clima), pela oportunidade de aprendizado, favorecendo o amadurecimento necessário para a conclusão deste trabalho. Aos colegas e amigos conquistados dentro da empresa, muito obrigada. Ao gerente, Patrice Rolando de Oliveira, pela compreensão e apoio de sempre. Aos amigos companheiros de profissão: Roni Guedes, Vinicius, Thiago, Hailton, Zilurdes, Fabiano, Romilson, Aparecida e Roberto Carlos.

Aos amigos de todas as horas: Josicleide, Aline, Rubistenia, Fátima, Rodrigo, Tany (mesmo distante) que tanto torceram e me apoiaram nos momentos em que mais precisei. As palavras não são suficientes para agradecer tamanho carinho e amizade. Aos sacerdotes e amigos, Monsenhor Lourildo e Pe Hachid, tão especiais e tão queridos, a quem pude contar com a oração e apoio sempre! Muito obrigada.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	21
2. OBJETIVOS.....	24
2.1 Objetivo Geral.....	24
2.2 Objetivos Específicos	24
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
3.1 Bacia Hidrográfica do São Francisco	25
3.2 Sistemas Atmosféricos Atuantes na Bacia Hidrográfica do São Francisco	27
3.2.1 Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).....	27
3.2.2 Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN).....	28
3.2.3 Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).....	29
3.2.4 Sistemas Frontais (SF).....	30
3.2.5 Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL)	30
3.3 Impactos Ocasionalados pelas Atividades Antrópicas e Efeitos Climáticos na Região da BHSF.....	31
3.4 O Índice RAI (Rainfall Anomaly Index)	32
3.5 Regressão Linear para preenchimento de falhas.....	33
3.6 Aplicação da Análise Multivariada na Meteorologia	34
3.7 Transformada de Ondaleta (TO).....	35
4. MATERIAL E MÉTODOS	37
4.1 Dados	37
4.1.1 Dados observacionais	37
4.1.2 Dados de precipitação em pontos de grade	38
4.2 Métodos	40
4.2.1 Preenchimento de Falhas - Regressão Linear Múltipla.....	40
4.2.2 Consistência dos dados.....	40
4.2.3 RAI (Rainfall Anomaly Index).....	42
4.2.4 Influência do ENOS (El Nino-Oscilação SUL) e de anos neutros	43
4.2.5 Análise de Agrupamento (AA).....	44
4.1.1 Transformada de Ondaleta (TO).....	45
5. RESULTADOS.....	47

5.1	Análise de Regressão Linear Múltipla – Preenchimento de Falhas.....	47
5.2	Regiões homogêneas de precipitação da Bacia Hidrográfica do São Francisco	48
5.3	Estudos de Casos	50
5.3.1	Análise da precipitação no ano de 2001	50
5.3.2	Análise da precipitação no ano de 2007	62
5.3.3	Análise da Precipitação para o ano 2008.....	72
5.3.4	Análise da precipitação no ano de 2012.....	83
5.3.5	Análise da precipitação no ano de 2014	93
5.4	Transformada de Ondaleta (TO).....	103
5.4.1	Transformada de Ondaleta aplicada aos valores do RAI-1, RAI-3, RAI-6 e RAI-12 para o Grupo 1 - Alto São Francisco.....	104
5.4.2	Transformada de Ondaleta aplicada aos valores do RAI-1, RAI-3, RAI-6 e RAI-12 para o Grupo 2 - Médio São Francisco.	108
5.4.3	Análise de Ondaleta aplicada aos valores do RAI-1, RAI-3, RAI-6 e RAI-12 para o Grupo 3 – Submédio São Francisco.	112
5.4.4	Análise de Ondaleta aplicada aos valores do RAI-1, RAI-3, RAI-6 e RAI-12 para o Grupo 4 – Baixo São Francisco.....	115
5.4.5	Análise de Ondaleta aplicada aos valores das cotas de Três Marias no ASF e Sobradinho no MSF.	119
6.	CONCLUSÕES	124
6.1	Preenchimento de falhas de dados de precipitação.....	124
6.2	Utilização do Índice RAI nas diferentes escalas.....	124
6.3	Transformada de Ondaleta aplicada aos valores do RAI nas diferentes escalas.	125
6.4	Transformada de Ondaleta aplicada aos valores das Cotas de Três Marias e Sobradinho.	126
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF) evidenciando a localização e divisão das sub-bacias do Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco. A localização da BHSF no território brasileiro é vista em destaque no canto inferior direito. Fonte: RIMA, 2004.....	25
Figura 4.1: a) Localização das estações pluviométricas utilizadas neste estudo na BHSF. Os pontos em azul são referentes às 31 estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os pontos em preto são referentes às 94 estações provenientes da Agência Nacional das Águas (ANA), situadas na Bacia Hidrográfica do São Francisco; no canto inferior direito se encontra o mapa do Brasil com a localização da BHSF; b) Reservatório de Sobradinho Situado no Médio São Francisco; c) Reservatório de Três Marias situado no Alto São Francisco.....	38
Figura 4.2: Exemplos de resultados da análise de consistência de dados do posto Y, tendo como base o posto X (totais precipitados acumulados). Fonte: Paz (2004).....	41
Figura 5.1: Curvas de dupla massa para a verificação da consistência das séries históricas de precipitação (mm) observadas de postos pertencentes aos Estados de Minas Gerais (MG), Bahia (BA), Pernambuco (PE) e Alagoas (AL), situados na área da Bacia Hidrográfica do São Francisco.....	48
Figura 5.2: Espacialização das estações presentes na Bacia Hidrográfica do São Francisco por regiões homogêneas (Grupos) de precipitação. Grupo 1 – Alto São Francisco (ASF); Grupo 2 – Médio São Francisco (MSF); Grupo 3 – Submédio São Francisco (SSF); Grupo 4 – Baixo São Francisco (BSF).....	49
Figura 5.3: Histogramas da distribuição temporal da chuva por regiões pluviometricamente homogêneas utilizando a série histórica dos dados de 1961 a 2014: a) Grupo 1 – Alto São Francisco (ASF); b) Grupo 2 – Médio São Francisco (MSF); c) Grupo 3 – Submédio São Francisco (SSF); d) Grupo 4 – Baixo São Francisco (BSF).....	50
Figura 5.4: Histogramas de precipitação por Grupos comparando a média histórica (em azul) de 1961 a 2014 com o a média da precipitação observada (em vermelho) no ano de 2001.....	51
Figura 5.5: RAI-1 (um mês) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referentes ao ano de 2001.....	52

Figura 5.6: Distribuição espacial do RAI-1(um mês) na BHSF para os meses de janeiro a junho do ano de 2001.....	53
Figura 5.7: Médias pentadais da temperatura de brilho (K) obtida do satélite GOES 8 para: (a) 11 a 15/01/2001, (b) 16 a 20/01/2001, (c) 21 a 25/01/2001 e (d) 26 a 31/01/2001 (Fonte: CPTEC/INPE).....	54
Figura 5.8: Média das linhas de corrente referentes ao mês de janeiro: a) 850 hPa; b) 200 hPa. Fonte: CPTEC/INPE.....	55
Figura 5.9: RAI-3 (três meses) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2001.....	56
Figura 5.10: Distribuição espacial do RAI-3 (três meses) na BHSF para os períodos de novembro2000/janeiro2001 a abril/junho2001.....	57
Figura 5.11: RAI-6 (seis meses) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2001.....	59
Figura 5.12: Distribuição espacial do RAI-6 (seis meses) na BHSF para os períodos de agosto de 2000/ janeiro de 2001 a janeiro de 2001/junho do ano de 2001.....	60
Figura 5.13: Valores das cotas máximas mensais (barras azuis) para 2000 e 2001 e média histórica das cotas máximas mensais (pontos vermelhos) para os reservatórios de Três Marias (ASF) (período de 1998 a 2015) e Sobradinho (MSF) (período de 1981 a 2015). a) Três Marias (ano 2000 e média histórica); b) Três Marias (ano 2001 e média histórica); c) Sobradinho (ano 2000 e média histórica); d) Sobradinho (ano 2001 e média histórica).....	62
Figura 5.14: Histogramas de precipitação por Grupos, comparando a média histórica (em azul) de 1961 a 2014 com a média da precipitação observada (em vermelho) no ano de 2007.....	63
Figura 5.15: RAI-1 (um mês) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2007.....	64
Figura 5.16: Distribuição espacial do RAI-1 (um mês) na BHSF para os meses de janeiro a junho do ano de 2007.....	64
Figura 5.17: Pêntadas de temperatura de brilho média (K) para o mês de fevereiro/2007, Satélite GOES 8. (Fonte: CPTEC/INPE)	65
Figura 5.18: Linhas de corrente referentes ao mês de fevereiro: a) 850 hPa; b) 200 hPa. Fonte: CPTEC/INPE.....	66
Figura 5.19: RAI-3 (três meses) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2007.....	67

Figura 5.20: Distribuição espacial do RAI-3 (três meses) na BHSF para os períodos de novembro de 2006/ janeiro de 2007 a abril/junho de 2007.....	68
Figura 5.21: Linhas de corrente referentes aos meses de novembro a) 850 hPa; b) 200 hPa; e dezembro a) 850 hPa; b) 200 hPa de 2006. Fonte: CPTEC/INPE.....	69
Figura 5.22: RAI-6 (seis meses) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2007.....	70
Figura 5.23: Distribuição espacial do RAI-6 (seis meses) na BHSF para os períodos agosto2006/janeiro2007 até janeiro/junho2007.....	71
Figura 5.24: Valores das cotas máximas mensais (barras azuis) e média histórica das cotas máximas mensais (pontos vermelhos) para os reservatórios de Três Marias (período de 1998 a 2015) e Sobradinho (período de 1981 a 2015), nos anos de 2006 e 2007. a) Três Marias (ano 2006 e média histórica); b) Três Marias (ano 2007 e média histórica); c) Sobradinho (ano 2006 e média histórica); d) Sobradinho (ano 2007 e média histórica).....	72
Figura 5.25: Histogramas de precipitação por Grupos, comparando a média histórica (em azul) de 1961 a 2014 com a média da precipitação observada (em vermelho) no ano de 2008.....	73
Figura 5.26: RAI-1 (um mês) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2008.....	74
Figura 5.27: Distribuição espacial do RAI-1 (um mês) na BHSF para os meses de janeiro a junho do ano de 2008.....	75
Figura 5.28: Pêntadas de temperatura de brilho média (K) para o mês de Janeiro/2008, Satélite GOES 8. (Fonte: CPTEC/INPE).....	76
Figura 5.29: Linhas de corrente referentes ao mês de fevereiro: a) 850 hPa; b) 200 hPa. Fonte: CPTEC/INPE.....	76
Figura 5.30: Pêntadas de temperatura de brilho média (K) para o mês de Abril/2008, Satélite GOES 8. (Fonte: CPTEC/INPE).....	77
Figura 5.31: RAI-3 (três meses) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2008.....	78
Figura 5.32: Distribuição espacial do RAI-3 (três meses) na BHSF para os trimestres referentes aos meses de novembro2007/janeiro2008 a abril/junho2008.....	79
Figura 5.33: RAI-6 (seis meses) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2008.....	81

Figura 5.34: Distribuição espacial do RAI-6 (seis meses) na BHSF para os semestres referentes aos períodos agosto2007/janeiro2008 a janeiro/junho2008.....	82
Figura 5.35: Valores das cotas máximas mensais (barras azuis) com a média histórica das cotas máximas mensais (pontos vermelhos) para os reservatórios de Três Marias (período de 1998 a 2015) e Sobradinho (período de 1981 a 2015), nos anos de 2007 e 2008. a) Três Marias (ano 2007 e média histórica); b) Três Marias (ano 2008 e média histórica); c) Sobradinho (ano 2007 e média histórica); d) Sobradinho (ano 2008 e média histórica).....	83
Figura 5.36: Desvio de precipitação (em mm) em relação à média climatológica para os meses de outubro, novembro e dezembro de 2007. Fonte: CPTEC/INPE.....	83
Figura 5.37: Histogramas de precipitação por Grupos comparando a média histórica (em azul) de 1961 a 2014 com a média da precipitação observada (em vermelho) no ano de 2012.....	84
Figura 5.38: RAI-1 (um mês) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2012.....	85
Figura 5.39: Distribuição espacial do RAI-1 (um mês) na BHSF para os meses de janeiro a junho do ano de 2012.....	86
Figura 5.40: Precipitação total nos meses de janeiro e fevereiro de 2012 no Brasil. Fonte: Modificado de CPTEC/INPE.....	87
Figura 5.41: Anomalias de Linhas de Corrente no Nível de 200hPa, referentes aos meses de janeiro e fevereiro de 2012.....	87
Figura 5.42: RAI-3 (três meses) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referentes ao ano de 2012.....	88
Figura 5.43: Distribuição espacial do RAI-3 (três meses) na BHSF referente aos períodos novembro2011/janeiro2012 a abril/junho2012.....	89
Figura 5.44: Temperatura de Brilho média obtida do Satélite GOES 12 para os meses de novembro e dezembro de 2011. Fonte: CPTEC/INPE.....	89
Figura 5.45: RAI-6 (seis meses) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2012.....	90
Figura 5.46: Distribuição espacial do RAI-6 (seis meses) na BHSF referentes aos períodos agosto2011/janeiro2012 a janeiro/junho2012.....	91
Figura 5.47: Valores das cotas máximas mensais (barras azuis) com a média histórica das cotas máximas mensais (pontos vermelhos) nos para os reservatórios de Três Marias (período de 1998 a 2015) e Sobradinho (período de 1981 a 2015), nos anos de 2011 e 2012. a) Três	

Marias (ano 2011 e média histórica); b) Três Marias (2012 e média histórica); c) Sobradinho (ano 2011 e média histórica); d) Sobradinho (ano 2012 e média histórica).....	92
Figura 5.48: Histogramas de precipitação por Grupos comparando a média histórica (em azul) de 1961 a 2014 com a média da precipitação observada (em vermelho) no ano de 2014.....	94
Figura 5.49: RAI-1 (um mês) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2014.....	94
Figura 5.50: Distribuição espacial do RAI-1 (um mês) na BHSF para os meses de janeiro a junho do ano de 2014.....	96
Figura 5.51: Linhas de corrente referentes ao mês de janeiro de 2014: a) 850 hPa; b) 200 hPa. Fonte: CPTEC/INPE.....	96
Figura 5.52: RAI-3 (três meses) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referentes ao ano de 2014.....	97
Figura 5.53: Distribuição espacial do RAI-3 (três meses) na BHSF para os períodos novembro2013/janeiro2014 a abril/junho2014.....	98
Figura 5.54: Pêntadas de temperatura de brilho média (K) para o mês de dezembro/2013, Satélite GOES 13. FONTE: CPTEC/INPE.....	99
Figura 5.55: RAI-6 (seis meses) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2014.....	100
Figura 5.56: Distribuição espacial do RAI-6 (seis meses) na BHSF referentes aos períodos agosto2013/janeiro2014 a janeiro/junho2014.....	101
Figura 5.57: Valores das cotas máximas mensais (barras azuis) com a média histórica das cotas máximas mensais (pontos vermelhos) nos para os reservatórios de Três Marias (período de 1998 a 2015) e Sobradinho (período de 1981 a 2015), nos anos de 2013 e 2014. a) Três Marias (ano 2013 e média histórica); b) Três Marias (ano 2014 e média histórica); c) Sobradinho (ano 2013 e média histórica); d) Sobradinho (ano 2014 e média histórica).....	103
Figura 5.58: Espectro de Ondaletas da Série RAI-1 referentes às estações pertencentes ao Grupo 1 (ASF) da BHSF. a) RAI-1 - Grupo 1; b) BHSF com destaque a região do ASF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potencia Global (EPG).....	105
Figura 5.59: Espectro de Ondaletas da Série RAI-3 referentes às estações pertencentes ao Grupo 1 (ASF) da BHSF. a) RAI-3 – Grupo 1; b) BHSF com destaque a região do ASF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potencia Global (EPG).....	106

Figura 5.60: Espectro de Ondaletas da Série RAI-6 referentes às estações pertencentes ao Grupo 1 (ASF) da BHSF. a) RAI-6 – Grupo 1; b) BHSF com destaque a região do ASF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potência Global (EPG).....	107
Figura 5.61: Espectro de Ondaletas da Série RAI-12 referentes às estações pertencentes ao Grupo 1 (ASF) da BHSF. a) RAI-12 – Grupo 1; b) BHSF com destaque a região do ASF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potencia Global (EPG).....	108
Figura 5.62: Espectro de Ondaletas da Série RAI-1 referentes às estações pertencentes ao Grupo 2 (MSF) da BHSF. a) RAI-1 – Grupo 2; b) BHSF com destaque a região do MSF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d)Espectro de Potencia Global (EPG).....	109
Figura 5.63: Espectro de Ondaletas da Série RAI-3 referentes às estações pertencentes ao Grupo 2 (MSF) da BHSF. a) RAI-3 – Grupo 2; b) BHSF com destaque a região do MSF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e c) Espectro de Potencia Global (EPG).....	110
Figura 5.64: Espectro de Ondaletas da Série RAI-6 referentes às estações pertencentes ao Grupo 2 (MSF) da BHSF. a) RAI-6 – Grupo 2; b) BHSF com destaque a região do MSF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potencia Global (EPG).....	111
Figura 5.65: Espectro de Ondaletas da Série RAI-12 referentes às estações pertencentes ao Grupo 2 (MSF) da BHSF. a) RAI-12 – Grupo 2; b) BHSF com destaque a região do MSF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potencia Global (EPG).....	111
Figura 5.66: Espectro de Ondaletas da Série RAI-1 referentes às estações pertencentes ao Grupo 3 (SSF) da BHSF. a) RAI-1 – Grupo 3; b) BHSF com destaque a região do SSF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potencia Global (EPG).....	113
Figura 5.67: Espectro de Ondaletas da Série RAI-3 referentes às estações pertencentes ao Grupo 3 (SSF) da BHSF. a) RAI-3 – Grupo 3; b) BHSF com destaque a região do SSF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potencia Global (EPG).....	114
Figura 5.68: Espectro de Ondaletas da Série RAI-6 referentes às estações pertencentes ao Grupo 3 (SSF) da BHSF. a) RAI-6 – Grupo 3; b) BHSF com destaque a região do SSF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potencia Global (EPG).....	114
Figura 5.69: Espectro de Ondaletas da Série RAI-12 referentes às estações pertencentes ao Grupo 3 (SSF) da BHSF. a) RAI-12 – Grupo 3; b) BHSF com destaque a região do SSF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potencia Global (EPG).....	115
Figura 5.70: Espectro de Ondaletas da Série RAI-1 referentes às estações pertencentes ao Grupo 4 (BSF) da BHSF. a) RAI-1 – Grupo 4; b) BHSF com destaque a região do BSF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potencia Global (EPG).....	116

Figura 5.71: Espectro de Ondaletas da Série RAI-3 referentes às estações pertencentes ao Grupo 4 (BSF) da BHSF. a) RAI-3 – Grupo 4; b) BHSF com destaque a região do BSF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potencia Global (EPG).....	117
Figura 5.72: Espectro de Ondaletas da Série RAI-6 referentes às estações pertencentes ao Grupo 4 (BSF) da BHSF. a) RAI-6 – Grupo 4; b) BHSF com destaque a região do BSF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potencia Global (EPG).....	118
Figura 5.73: Espectro de Ondaletas da Série RAI-12 referentes às estações pertencentes ao Grupo 3 (BSF) da BHSF. a) RAI-12 – Grupo 4; b) BHSF com destaque a região do BSF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potencia Global (EPG).....	118
Figura 5.74: Espectro de Ondaletas referente aos valores das Cotas do reservatório de Três Marias, situado no ASF. a) Cotas Três Marias, b) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e c) Espectro de Potencia Global (EPG).....	120
Figura 5.75: Espectro de Ondaletas referente aos valores das Cotas do reservatório de Sobradinho, situado no MSF. a) Cotas Sobradinho, b) Espectro de Potência de Ondaleta e c) Espectro de Potencia Global.....	122
Figura 5.76: Comparação das cotas dos reservatórios do Rio São Francisco nos anos de 2001, 2014 e 2015. a) Três Marias; b) Sobradinho.....	123

LISTA DE TABELA

Tabela 4.1: Períodos com condições de El Niño, La Niña e Neutras no Oceano Pacífico Tropical, na região do Niños 3.4, entre 1961 e 2015. (Fonte: CDC – NOAA).....	151
---	-----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA – Análise de Agrupamento

ACP – Análise de Componentes Principais

AL – Alagoas

ANA – Agência Nacional das Águas

ASAS – Alta Subtropical do Atlântico Sul

ASF – Alto São Francisco

BHSF – Bacia Hidrográfica do São Francisco

BSF – Baixo São Francisco

CBHSF – Comitê da Bacia Hidrográfica do São Francisco

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

DOL's – Distúrbios Ondulatórios de Leste

EN – El Niño

ENOS – El Niño Oscilação sul

GSOD – Global Surface Summary of Day

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

IOS - Índice de Oscilação Sul

LN – La Niña

MG – Minas Gerais

MSF – Médio São Francisco

NCEP – National Centers for Environmental Predictions

NCAR – National Center for Atmospheric Research

NEB – Nordeste Brasileiro

OMM - Organização Mundial de Meteorologia

PCD's – Plataforma de Coleta de Dados

PE - Pernambuco

RAI – Rainfall Anomaly Index

SE – Sergipe

SEB – Sudeste do Brasil

SF – Sistemas Frontais

SPI – Standardized Precipitation Index

SSF – Submédio São Francisco

TO – Transformada de Ondaleta

UDEL – Universidade de Delaware

VCAN's – Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis

ZCAS – Zona da Convergência do Atlântico Sul

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

RESUMO

A Bacia Hidrográfica do São Francisco tem um importante papel na economia das regiões Sudeste e Nordeste do país, pois a maior parte de suas águas são destinadas a geração de energia elétrica e irrigação. Devido ao aumento da demanda pela água, juntamente com os episódios de seca sofridos nas últimas décadas (2001-2015), houve uma mudança significativa no comportamento e gerenciamento dos recursos hídricos. Esse comportamento vem sendo mais evidente principalmente a partir do ano 2012, devido à seca que levou à diminuição do nível dos rios e reservatórios ao longo da Bacia. O uso do RAI (Rainfall Anomaly Index) nas escalas um mês, três meses, seis meses e doze meses, mostrou sua eficiência no monitoramento dos recursos hídricos e identificação das áreas atingidas pela seca, como também permitiu encontrar padrões de comportamento atmosféricos nos anos analisados, indicando características recorrentes, como a atuação de VCAN's. Os estudos foram concentrados nos anos 2001, 2007, 2008, 2012 e 2014. Os resultados mostraram que a atuação dos VCAN's (Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis) tem um papel significativo no comportamento das chuvas, necessitando ter uma maior atenção no acompanhamento do surgimento, intensificação, deslocamento e região de atuação desses sistemas. O uso da TO (Transformada de Ondaleta) aplicadas aos valores do RAI reforçou os resultados encontrados, mostrando que a variabilidade intrasazonal, além de ser modulada por eventos de menor frequência (escala anual e decadal), necessita ser monitorada com a mesma importância. A TO aplicada aos valores das cotas de Sobradinho e Três Marias mostrou que não apenas os fatores climáticos têm influenciado na diminuição do volume dos reservatórios, como também o aumento da demanda e a mudança no controle desses recursos principalmente nos últimos anos.

Palavras-chave: Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, RAI, Transformada de Ondaletas.

ABSTRACT

The San Francisco Basin has an important role in the economy of Southeast and Northeast regions of Brazil. Most of its water is aimed to generate electricity and irrigation. Due to the increasing water demand, along with recent episodes of drought (2001-2014), there was a significant change in behavior and management of water resources. This behavior has been evident mainly since 2012, due to drought which led to significant decrease in the level of rivers and reservoirs along the basin. The use of the RAI (Rainfall Anomaly Index) in monthly, quarterly, semiannual and annual scales showed its efficiency in the monitoring of water resources and identification of areas affected by drought, but also allowed to find patterns of atmosphere's behavior in the analyzed years, indicating characteristics applicants with Upper Tropospheric Cyclonic Vortices (UTCV) performance. The studies covered the years 2001, 2007, 2008, 2012 and 2014. The results showed that the performance of UTCV plays a significant role in the behavior of rains, needing to have a greater focus on monitoring the emergence, intensification, displacement and region of operation of these systems. The use of WT (Wavelet Transform) applied to the RAI values reinforced the findings, showing that the intra-seasonal variability is modulated by lower frequency events (annual and decadal scale) and needs to be monitored with the same importance. However, it is necessary to make a more detailed investigation using the WT at a higher resolution, in order to have a better understanding of key atmospheric variables that affect the rainfall regime in the studied region. The WT applied to the values of the quotas from Sobradinho and Três Marias showed that not only climatic factors have influenced the decrease in the volume of the reservoirs, as well as the increased demand and the change in control of these resources especially in recent years.

Keywords: Hydrographic Basin of the São Francisco River, RAI, Wavelet Transform.

1. INTRODUÇÃO

A Bacia Hidrográfica do São Francisco (BHSF) tem um papel importante nas regiões Nordeste e Sudeste do Brasil, sendo a única Bacia Hidrográfica localizada totalmente em território nacional. Está inserida em sua maior parte dentro da região Semiárida, entretanto, tem o uso de suas águas explorado na geração de energia elétrica, abastecimento de água e irrigação, influenciando de forma significativa na economia do país. Com seu grande potencial hidrológico, é responsável por aproximadamente 90% da geração de Energia Elétrica da Região Nordeste (SUASSUNA, 2000). Contudo, cerca de 70% da vazão natural média do rio São Francisco é proveniente do estado de Minas Gerais, sendo o Alto São Francisco (ASF) representado 42% da vazão total (MINISTÉRIO DO MEIO, 2006; LOPES, 2014).

No que diz respeito à irrigação, na BHSF encontra-se o Vale do São Francisco, um dos maiores polos de produção e exportação de frutas no país, que também está inserida em uma região semiárida e com estiagens recorrentes. Esta região é também vulnerável à ocorrência de inundações associadas com a atuação de sistemas meteorológicos intensos que podem ocasionar o desenvolvimento de cheias e inundações, causando prejuízos nas atividades econômicas da região (DINIZ *et al.*, 2011).

Devido a tantas atividades provenientes de suas águas, a previsão e o monitoramento de forma continuada de eventos extremos são de grande importância para os diversos projetos de gerenciamento de recursos hídricos existentes na BHSF, propiciando um controle bem mais eficiente de seus recursos, a fim de definir as regras de operação e utilização dos rios e reservatórios. Muitos avanços foram feitos nas últimas décadas a fim de conhecer os principais mecanismos responsáveis pelos eventos extremos e, conseqüentemente, melhorar o uso de suas águas. Entretanto, apesar dos avanços e muitos estudos mostrarem que os eventos extremos no semiárido podem ocorrer também com influência de padrões de teleconexões de diferentes escalas de tempo e espaço, ainda há um senso comum que tanto as secas como eventos extremos de cheias são associados apenas a episódios de El Niño Oscilação Sul (ENOS) (MELO, 1999; GALVÍNCIO & SOUZA, 2002; ARAÚJO *et al.*, 2013; ARAGÃO, 1986).

Conhecer os diversos fatores climáticos que influenciam na precipitação, vem a facilitar um melhor gerenciamento dos recursos hídricos. Além dos fatores

meteorológicos, os fatores antrópicos muitas vezes são desconsiderados, o que acarreta uma maior dificuldade em verificar qual melhor medida a ser tomada na ocorrência de eventos extremos, a fim de minimizar os impactos sociais e econômicos, causando maiores prejuízos.

A partir do ano 2000 a BHSF passou por situações conflitantes, e as medidas antes tomadas para o gerenciamento de seus recursos até então vêm sendo modificadas para atender as demandas dos usos múltiplos de suas águas. Em 2001, em que ocorreu uma das maiores crises energéticas que assolou o país, o reservatório de Sobradinho chegou a 5% do seu volume útil, fazendo com que medidas fossem tomadas para racionar os recursos hídricos na Bacia. As barragens de Três Marias e Sobradinho tiveram uma diminuição significativa em seu volume nesses anos. Após isso, houve episódios de eventos extremos em 2007/2008 forçando ainda mais mudanças no gerenciamento destes recursos na Bacia (GURJÃO *et al.*, 2012).

Em 2013, devido à diminuição das chuvas e uma das maiores secas já registradas nos últimos 30 anos, em que já se tinha indícios da seca que devastava o país, se estendendo até os dias atuais, a Agência Nacional das Águas (ANA) autorizou a redução, em caráter emergencial da vazão em todo vale a jusante das barragens de Sobradinho e Xingó, porém, nos anos 2014 e 2015 a situação piorou. Em 2014, foi o ano em que as principais nascentes do rio, no ASF, secaram, em especial na Serra da Canastra (MG). No segundo semestre de 2015 a vazão em Sobradinho foi diminuída de 900 m³/s para aproximadamente 800 m³/s (CBHSF, 2015). Três Marias e Sobradinho tiveram uma diminuição nos seus volumes ainda maiores do que as registradas no ano de 2001. No Semiárido Nordestino, a situação foi agravada pela atuação El Niño, e os modelos globais já mostravam a evolução para El Niño forte no final de 2015 e início de 2016 (NOAA, 2015), e conseqüentemente, este cenário afeta diretamente a evolução dos Sistemas Atmosféricos atuantes durante o período chuvoso da Bacia Hidrográfica. Diante disso, é necessário conhecer as regiões que são mais propícias a ocorrências de eventos extremos que vêm a diminuir o aporte hídrico na Bacia, para que possam assegurar medidas preventivas e os impactos econômicos e sociais sofridos por esses fatores climáticos sejam minimizados.

Com o objetivo de verificar a influência dos fenômenos de grande escala no comportamento dos eventos extremos na BHSF, este trabalho utiliza o Rainfall Anomaly Index (RAI), desenvolvido por ROOY (1965). Na metodologia utilizada neste trabalho, buscou-se desenvolver o RAI em diferentes escalas (RAI-1, RAI-3, RAI-6,

RAI-12), como já é feito com outros índices, a exemplo do SPI e SPEI, que são usados como indicadores para monitoramento das secas na Região Nordeste (MONITOR DE SECAS DO NORDESTE). Tais escalas tem o intuito de verificar efeitos diretos sobre áreas atingidas pelos eventos extremos, em especial, eventos de secas, que podem ser definidos, segundo PIRES (2003), como seca meteorológica, agrícola, hidrológica, econômica, de acordo com sua duração e os impactos provocados em determinada região. Nesse sentido, as escalas utilizadas neste trabalho permitem assim observar o comportamento das chuvas com o objetivo de verificar indícios com meses de antecedência de possível diminuição dos recursos hídricos, identificando as regiões e períodos de ocorrência de secas hidrológicas e meteorológicas.

Por ter uma grande extensão territorial e uma variabilidade de precipitação nas diferentes regiões da BHSF, foi investigado neste estudo, a partir da Transformada de Ondaleta (TO) aplicada aos valores do RAI nas diferentes escalas, os principais fatores que interferiram no comportamento das chuvas, em especial a partir da década de 2000. A TO também foi aplicada aos valores das cotas de Sobradinho e Três Marias, e os resultados comparados, a fim de verificar a relação entre os fatores climáticos e antrópicos no gerenciamento dos recursos hídricos nos principais reservatórios da BHSF.

Os resultados mostraram através da utilização do RAI nas escalas acima citadas, que é possível fazer o monitoramento dos eventos de estiagem e cheias com eficiência utilizando o índice como importante indicador, como também foi possível ter conhecimento da variabilidade atmosférica que está relacionada ao desenvolvimento dos sistemas atmosféricos de pequena escala. Através da TO, foi verificado que o comportamento da chuva nos anos que tiveram atuação de fenômeno ENOS não foi semelhante nas diferentes regiões da BHSF, e que a partir do ano 1990, os valores positivos do índice foram menores do que nos anos anteriores, mostrando uma pequena mudança de comportamento da precipitação em relação à média. A BHSF, no entanto, devido à atividade antrópica ter aumentado, apresentou uma maior vulnerabilidade nos períodos analisados quando a TO foi aplicada as valores das cotas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é caracterizar e comparar a variabilidade temporal e espacial da precipitação através da Transformada de Ondaleta (TO) aplicada ao RAI em diferentes escalas de tempo nas diferentes regiões pluviometricamente homogêneas da Bacia Hidrográfica do São Francisco, a fim de investigar quais os principais fatores responsáveis pelos eventos extremos, em especial a escassez hídrica.

2.2 Objetivos Específicos

1. Aplicar a técnica de Análise de Agrupamento (AA) para identificar as regiões com regimes homogêneos de precipitação na BHSF.
2. A partir do RAI em diferentes escalas, verificar e quantificar a intensidade, duração e severidade de eventos extremos na BHSF, como também o impacto desses eventos no controle de reservatórios, identificando a melhor escala para o monitoramento.
3. Aplicar a TO aos valores do RAI nas diferentes escalas de tempo com o objetivo de identificar as causas de variabilidade climática e comparar o comportamento atmosférico nas diferentes regiões da BHSF em anos importantes sob o ponto de vista hidrológico.
4. Aplicar a TO aos valores de cota de Três Marias e Sobradinho com o objetivo de comparar e identificar as causas da variabilidade de ambos os reservatórios.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Bacia Hidrográfica do São Francisco

A Bacia Hidrográfica do São Francisco abrange 639.000 km² de área de drenagem, e seu curso principal tem uma extensão de 2.700 km. Sua área corresponde a aproximadamente 8% do território nacional. Situada entre as latitudes de 7°00' a 21°00'S e longitudes de 35°00' a 47°40'W, estando inserida nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste do Brasil (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2004). Sua nascente está situada na Serra da Canastra em Minas Gerais, com o escoamento no sentido Sul-Norte pelos estados da Bahia e Pernambuco, chegando ao Oceano Atlântico na divisa entre Alagoas e Sergipe. Abrange parte de seis estados e o Distrito Federal (SANTOS, 2012), com 507 municípios, sendo dividida em Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco (Figura 3.1).



Figura 3.1: Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF) evidenciando a localização e divisão das sub-bacias do Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco. A localização da BHSF no território brasileiro é vista em destaque no canto inferior direito. Fonte: RIMA, 2004.

A irrigação representa 79% da vazão retirada do total estimado para a Bacia no Médio, Submédio e Baixo São Francisco. Até o ano 2000 a irrigação representava 69% da vazão retirada. O acréscimo apresentado atualmente foi mais significativo no Alto São Francisco (230%), quando comparado ao Médio e Baixo São Francisco (203% e 109% respectivamente). No Submédio São Francisco (SSF), a demanda de água para irrigação aumentou apenas 18% entre 2000 e 2010. Em 2013, a área irrigada teve um aumento de cerca de 134% em relação ao apresentado no ano de 2004. A maior parte dessa área fica situada no extremo oeste baiano e no Vale Franciscano na Bahia, o que equivale a 40%. (CBHSF, 2015a).

Possui um leito com declive bastante acentuado, com elevações variando de 400 a 1000m, favorecendo um alto potencial de geração de energia hidrelétrica. A região Sudeste, no estado de Minas Gerais (MG), é responsável por parte do abastecimento energético da região, com a usina de Três Marias e, na região Nordeste com as usinas de Itaparica, Sobradinho e Paulo Afonso na Bahia (SOUZA, 2012). O Alto São Francisco (ASF) e parte do Médio São Francisco (MSF), localizados no estado de MG são responsáveis por cerca de 70% do escoamento total do rio São Francisco.

O trecho Semiárido da Bacia Hidrográfica é composto por rios intermitentes e apresenta um problema crítico em relação à época de secas. Sem períodos de grandes enchentes, a população ocupa com mais facilidade áreas de várzeas de inundação para cultivos e habitações, ocasionando impactos severos sobre os moradores em épocas de cheias (GONDIM FILHO *et al.*, 2004).

Devido às ocupações e às diversas atividades agrícolas nas proximidades do curso principal do Rio São Francisco e seus afluentes, o controle de enchentes é feito aproveitando as barragens das usinas hidrelétricas. Portanto, são formados reservatórios capazes de amortecer o volume de água, fazendo com que a vazão seja menor à jusante do Rio (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2004; GONDIN FILHO *et al.*, 2004; CORREIA & SILVA DIAS, 2003).

O ASF e parte do MSF da BHSF estão no Sudeste do Brasil (SEB), inseridos no Estado de MG, correspondendo a 36,8% da área total da Bacia. A maior parte da área se encontra no Estado da Bahia (BA), compreendendo em torno de 48,2% (CGEE/ANA, 2012). O SSF e BSF estão inseridos nos Estados de Pernambuco (PE), Alagoas (AL) e Sergipe (SE).

3.2 Sistemas Atmosféricos Atuantes na Bacia Hidrográfica do São Francisco

Em virtude da grande abrangência territorial e estar situada nas regiões Sudeste e Nordeste do país, a BHSF recebe recarga de água proveniente de precipitação durante quase todo o ano, sendo suas características sazonais bastante variáveis, com regime pluviométrico influenciado por vários sistemas atmosféricos de diferentes escalas que são: A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN's), a Zona de Convergência do Atlântico Sul, os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL's) e os Sistemas Frontais (SF).

3.2.1 Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)

Na zona equatorial, em que os ventos alísios dos Hemisférios Norte e Sul convergem, é conhecida como Zona de Convergência Intertropical, sendo observada ao redor do globo. É uma região em que os ventos são mais calmos e as precipitações mais intensas. Nessa região, o ar é quente e úmido e ocorre intensa formação de nuvens convectivas profundas (FEDOROVA, 2001).

Existem muitos fatores atmosféricos que têm influência na posição e intensidade da ZCIT, e a região em que está inserida ocorre uma interação de várias características atmosféricas e oceânicas em posições latitudinais próximas. Além da confluência dos Ventos Alísios e Cavado Equatorial, verifica-se a máxima Temperatura da Superfície do Mar (TSM), máxima convergência de massa e máxima cobertura de nuvens convectivas (FERREIRA, 1996).

A ZCIT é considerada como o principal sistema produtor de chuva na região equatorial, e no Brasil, sua precipitação é responsável pela recarga de água de diversas Bacias nas regiões Norte e Nordeste. Em imagens de satélite é identificada por uma banda de nebulosidade, com característica convectiva, aproximadamente zonal, se estendendo ao longo da faixa equatorial do Globo. No Oceano Atlântico, a ZCIT tem um deslocamento norte-sul e sua posição atinge as latitudes em torno de 15°N-20°N nos meses de agosto e setembro, e em torno de 2°S-5°S no outono do Hemisfério Sul nos meses de março-abril (MELO *et al.* 2002).

Em anos com valores de precipitação acima da média climatológica no Nordeste do Brasil, está relacionada à posição mais ao sul da ZCIT, atuando principalmente em conjunto com outros sistemas atmosféricos importantes como a Zona de Convergência

do Atlântico Sul (ZCAS) e os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) (CAVALCANTI *et al.*, 2009). Nesse sentido, a ZCIT atua em algumas áreas do SSF e BSF.

A intensidade e a distribuição espacial da precipitação na região semiárida da BHSF, onde está localizada a represa de Sobradinho, são influenciadas por, pelo menos, dois sistemas meteorológicos importantes: A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN).

3.2.2 Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN)

Os VCAN's são sistemas meteorológicos formados por centros de pressão relativamente baixa na alta troposfera, na extremidade equatorial dos cavados oceânicos tropicais. Dependendo da instabilidade atmosférica, a profundidade do sistema pode atingir os níveis médios. São sistemas semi-estacionários e podem durar dias. Em imagens de satélite, podem ser identificados pela nebulosidade em forma de arco que se estende na periferia do Vórtice, indicando a existência de movimento ascendente na periferia e subsidente no centro.

A classificação dos VCAN's depende da sua origem, ou seja, são conhecidos como Palmén quando originados em latitudes extratropicais, e Palmer quando originados em latitudes tropicais. No Brasil, os VCAN's ocorrem na primavera, verão e outono, no período de outubro a abril, com máxima frequência no mês de janeiro (MELLO *et al.*, 1996). Os de origem tropical atuam com maior frequência entre dezembro a fevereiro, e têm um tempo médio de vida de 4 a 11 dias (CAVALCANTI *et al.*, 2010).

A atuação na região Nordeste ocorre devido à penetração desse sistema no continente. SANTOS (2005) fez um estudo de caso, com o objetivo de investigar as principais características dinâmicas e termodinâmicas de um VCAN, e verificou que vários sistemas de escala sinótica estão envolvidos na formação, desenvolvimento, intensificação e trajetória do mesmo. De acordo com KOUSKY & GAN (1981), a formação clássica desses sistemas está associada diretamente a formação em Altos níveis da Alta da Bolívia (AB) e ao deslocamento dos Sistemas Frontais para latitudes baixas desenvolvendo um Cavado em altos níveis com profundidade significativa, atingindo a costa do Nordeste do Brasil (NEB).

Os VCAN's são conhecidos como sistemas produtores de chuva, principalmente no interior do NEB, porém estudos mostram que os VCAN também podem inibir o desenvolvimento de nuvens profundas e precipitação na área influenciada pela

circulação do seu centro, local de ocorrência de movimentos subsidentes (SANTOS, 2005; SILVA, 2007; GURJÃO, 2012). Ramirez (1996) observou que em anos de El Niño os vórtices apresentam maior extensão vertical do que em anos de La Niña.

3.2.3 Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é caracterizada por uma banda de nebulosidade com orientação noroeste-sudeste, e atua nas regiões Norte, Centro-Oeste, Sudeste, e parte do Nordeste, atingindo também o Oceano Atlântico, dependendo da sua posição (CAVALCANTI *et al.*, 2010), geralmente originária na Amazônia. A ZCAS foi assim denominada por KODAMA (1992) ao estudar as características comuns das chamadas Zonas de Precipitação Subtropicais (ZPS).

Seu aparecimento está associado a um escoamento convergente de umidade na baixa troposfera em direção a latitudes altas, que, quando combinado com o jato subtropical em altos níveis, intensifica a frontogênese, influenciando na geração da instabilidade convectiva. Em altos níveis, observa-se a circulação anticiclônica (Alta da Bolívia) e um cavado quase estacionário sobre o Nordeste do Brasil.

CARVALHO *et al.*, (2004) utilizaram a análise fatorial para identificar as diversas características entre os episódios de ZCAS, como intensidade, ZCAS Oceânica e Continental. Os estudos mostraram que sua persistência média, ou seja, o número de dias consecutivos de uma determinada categoria é acima de três dias, porém o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) parece modular o número de eventos persistentes. A ZCAS oceânica tende a ser mais persistente em anos sob condições neutras e frias do Oceano Pacífico Tropical. O contrário ocorre para a ZCAS continental. A frequência de eventos intensos e essa persistência diminuem no período de dezembro a fevereiro, o mesmo ocorre para ZCAS oceânicas. A frequência maior de ZCAS continental ocorre no mês de janeiro. PALLOTTA & NAKAZATO (2010) verificaram que, depois de confirmado a formação do sistema, o mesmo pode persistir por dez dias ou mais.

A ZCAS atua de setembro a fevereiro na América do Sul, e seu aparecimento é marcado por precipitação intensa. É um sistema produtor de chuvas muito importante na região na BHSF por garantir o abastecimento em toda extensão do Rio. DA SILVA *et al.* (2001), após estudar a influência da ZCAS na BHSF, verificaram que é o principal mecanismo dinâmico produtor de precipitação atuando de novembro a março no ASF e MSF.

3.2.4 Sistemas Frontais (SF)

O Sistema Frontal (SF) é composto por um centro de baixa pressão em superfície (ciclone), uma frente quente e uma frente fria, podendo ser classificadas como frente quente, frente fria, frente estacionária ou frente oclusa. A velocidade do seu deslocamento depende da sua inclinação. Quanto maior a inclinação da superfície frontal, maior é a velocidade de deslocamento. (ANDRADE, 2005)

Frente é uma zona de transição entre duas massas de ar com características físicas distintas, com fortes gradientes de temperatura e umidade. Os Sistemas Frontais, ou Zonas Frontais são identificados pela baixa pressão, vorticidade máxima ciclônica ao longo da frente, fortes gradientes horizontais de temperatura, umidade e movimento vertical, forte cisalhamento vertical e horizontal do vento e a rápida mudança na cobertura de nuvens e precipitação (ANDRADE, 2005).

No Hemisfério Sul, os Sistemas Frontais deslocam-se de Oeste para Leste. Atuam o ano todo no Brasil, nas regiões Sul, Centro-Oeste, Sudeste e podem avançar para latitudes mais baixas, atingindo o Norte e o Nordeste (BARBOZA & CORREIA, 2005). Seu período principal de atuação nessas últimas regiões é de novembro a fevereiro. Isso explica o fato de a penetração de sistemas frontais, ter um papel importante na precipitação também no Nordeste, mais ao sul (KOUSKY, 1979).

3.2.5 Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL)

Os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL's) são sistemas de baixa pressão que se propagam na baixa troposfera de leste para oeste, sendo possível identificá-los entre a superfície e 700hPa. Essas ondas são sistemas atmosféricos responsáveis pela maior parte da precipitação no período chuvoso na parte Leste do Nordeste do Brasil, pois modulam a convecção em grande parte dos eventos provenientes do Oceano Atlântico. Sua área de atuação abrange principalmente entre os Estados do Rio Grande do Norte até o norte da Bahia, entre os meses de maio a agosto. São responsáveis pela precipitação na área do Baixo São Francisco (ARAÚJO, 2006; SANTOS, 2012). SANTOS *et al.* (2010) observaram através da Análise de Componentes Principais que existe uma forte correlação entre a chuva e a atuação dos DOL no Baixo São Francisco (BSF) nos meses de fevereiro, março e abril, e são sistemas responsáveis por grandes volumes de precipitação, podendo causar cheias e inundações nas áreas atingidas por esses sistemas.

3.3 Impactos Ocasionados pelas Atividades Antrópicas e Efeitos Climáticos na Região da BHSF.

A precipitação, dentro do ciclo hidrológico, é o principal componente responsável pela manutenção da vazão mínima (ou vazão ecológica) de uma bacia hidrográfica. O estudo da variabilidade da precipitação na região da BHSF é importante para a compreensão da ocorrência de eventos extremos, causando impactos significativos sobre as áreas irrigadas e afetando diretamente as populações ribeirinhas.

A intensidade e a severidade dos eventos extremos variam no tempo e no espaço, sendo o seu grau de severidade em regiões povoadas relacionado às atividades antrópicas, como o desmatamento e crescimento urbano desordenado, aumentando a vulnerabilidade ambiental pela modificação do escoamento superficial, favorecendo a formação de enchentes nessas regiões (GONÇALVES *et al.*, 2008). Em eventos extremos relacionados à seca, a área espacial atingida pelo fenômeno é bem maior quando comparada às áreas afetadas por inundações ou chuvas acima da média, como também é maior o período de tempo de duração do fenômeno (SANTOS *et al.*, 2008; SANTOS, 2012). A agropecuária e o setor hidrelétrico são fortemente afetados devido à influência direta das chuvas no nível dos reservatórios das hidrelétricas responsáveis pela geração de energia e controle de cheias (GONÇALVES *et al.*, 2006).

Neste sentido, o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, destaca no Plano decenal de Recursos Hídricos, a existência de uma pressão antrópica gerando um processo contínuo de degradação da bacia, que tende a piorar os efeitos ocasionados por eventos extremos, em que os maiores responsáveis são o desmatamento e as queimadas, as atividades mineradoras e de garimpo, e o extrativismo para a produção de carvão (KOSMINSKY & ZUFFO, 2009).

Além desses efeitos, existem muitos fatores locais que podem influenciar e formar microclimas locais, a exemplo do que foi visto no estudo feito por CORREIA & SILVA DIAS (2003) no SSF. Foi observada a formação de uma brisa lacustre gerada no entorno do Lago de Sobradinho, sendo responsável pelo transporte de calor, umidade e formação de nuvens. O estudo mostrou também que a intensificação ou redução dos efeitos da brisa está diretamente ligada ao aumento ou diminuição da lamina d'água. MELO *et al.* (2011).

3.4 O Índice RAI (Rainfall Anomaly Index)

Vários órgãos responsáveis pelo monitoramento climático e do tempo em nível estadual e nacional no Brasil (INMET, INPE, APAC, FUNCEME), utilizam índices climáticos como uma ferramenta para auxiliar na determinação das regiões afetadas pela seca. O exemplo mais recente é o Monitor de Secas do Nordeste, que desde 2014, está fazendo o monitoramento da intensidade da seca na região, com apoio da Agência Nacional de Águas (ANA).

Em regiões delimitadas por bacias hidrográficas, faz-se necessário a utilização de índices específicos no controle de cheias e secas. Para a comprovação da eficiência de tais índices, técnicas estatísticas podem ser aplicadas, dando suporte no estudo da climatologia e hidrologia de região (SANTOS, 2012).

O RAI foi escolhido para o desenvolvimento deste estudo por ser um índice bastante utilizado em diversos estudos de secas hidrológicas e meteorológicas na região tropical, tendo sido desenvolvido por ROOY (1965). O uso deste índice permite comparar o desvio da precipitação em relação à condição climatológica da região estudada, ou seja, comparar a precipitação de um lugar determinado com a média dos dez valores extremos de anomalias positivas e negativas de precipitação (SANTOS, 2012).

Muitos pesquisadores têm utilizado o índice em estudos de secas em diversas regiões. Tanto na comparação com outros índices e sua utilização (KEYANTASH & DRACUP, 2002; HÄNSEL & MATSCHULLAT, 2006; FREITAS, 1998; LOUKAS *et al.*, 2003; FREITAS, 2004; FREITAS, 2005), como também com o objetivo de avaliar a eficiência do uso do RAI em determinadas regiões, como por exemplo na BHSF (GONÇALVES *et al.*, 2006; SANTOS *et al.*, 2008; SANTOS *et al.*, 2011; SANTOS, 2012). Muitos dos resultados mostraram uma alta correlação entre o RAI e o Índice de Precipitação Padronizada (“Standardized Precipitation Index – SPI”). Ambos usam dados apenas de precipitação para obtenção dos seus cálculos. De acordo com estudos feitos por REPELLI *et al.* (1998), o índice é apropriado para o monitoramento de regiões semiáridas e tropicais.

Para determinar a classificação da precipitação anual do rio Paraíba e, a partir da metodologia de FREITAS (2004, 2005), ARAÚJO *et al.* (2009) utilizaram o índice para classificar anos secos e úmidos a partir de uma escala pré-definida, e concluíram que o RAI pode ser utilizado como uma ferramenta para o monitoramento, podendo gerar

prognósticos e diagnósticos climáticos na Bacia Hidrográfica que foi estudada. DA SILVA (2009) usou o RAI para analisar a variabilidade pluviométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú ressaltando a eficiência do índice cujo cálculo requer apenas dados de chuva. É evidente que para estudos de impactos ambientais, causados por eventos meteorológicos extremos, utilize-se de outras variáveis, porém, a utilização do RAI facilita o estudo diminuindo as inúmeras dificuldades encontradas na obtenção de séries de outras variáveis meteorológicas de boa qualidade, que coincidem com a série de dados de chuva (SANTOS, 2012).

DINIZ (2007) utilizou o RAI, aplicado a totais mensais de precipitação referentes a 15 estações situadas no Submédio São Francisco, como também a totais diários coletados nas estações de Bebedouro (PE). Através deste estudo, foi possível determinar o impacto ambiental decorrente da intensidade e extensão da área afetada pelos eventos meteorológicos extremos nesta região da BHSF.

3.5 Regressão Linear para preenchimento de falhas

A grande dificuldade na utilização dos dados meteorológicos, em especial de dados hidrológicos, como precipitação, vazão e cota, está na qualidade dos dados. São diversos os motivos pelos quais ocorrem falhas nestes dados, por exemplo, a falha nos mecanismos de registros, que podem ocorrer em dados provenientes de Plataforma de Coleta de Dados (PCD's); ausência de observador quando se trata de coleta manual desses dados, e estes dependem de voluntários, ou também encerramento nas observações em determinada estação meteorológica (OLIVEIRA *et al.*, 2010).

Para conhecer os diversos parâmetros climatológicos de uma determinada região, ou até mesmo de uma bacia hidrográfica, é necessária uma continuidade nos dados, sem falhas. A maioria dos dados pluviométricos disponíveis nas diversas regiões do país apresenta falhas consideráveis, com meses e até anos, em ausência de dados de precipitação. Dados incoerentes para a realidade climática da região também são muito comuns, devido muitas vezes à falha humana, e para isso é necessário que o estudioso ou observador possa identificar o tipo de falha a fim de corrigi-lo usando técnicas estatísticas adequadas para cada tipo de dado.

Existem diversos tipos de técnicas de preenchimento de dados, em especial, dados hidrológicos. OLIVEIRA *et al.*, (2010) fizeram uma comparação com alguns tipo de metodologias de preenchimento de falhas com dados de precipitação, que são Regressão Linear, Ponderação Regional com base em Regressões Lineares, Ponderação

Regional e Vetor Regional. O método que apresentou o melhor resultado para o preenchimento de falhas de dados hidrológicos foi o de Regressão Linear Múltipla e Regressão Potencial Múltipla (OLIVEIRA *et al.*, 2010; LOPES, 2014).

Todas essas técnicas utilizadas para preenchimento de dados hidrológicos necessitam de estações meteorológicas próximas e com características climáticas e geográficas semelhantes (LEIVAS *et al.*, 2005). As estações disponíveis, muitas vezes, também aparecem com o mesmo tipo de falha, ou os mesmos anos com falhas, impossibilitando a utilização das mesmas para o preenchimento. Os dados hidrológicos são disponibilizados por agências e entidades governamentais.

Uma alternativa é utilizar dados de reanálise para preenchimento de falhas. NETO *et al.* (2005), verificaram que os dados de precipitação de reanálise são muito próximos, por exemplo, dos valores encontrados com dados disponibilizados pela ANA, em que usou tanto os dados da ANA quanto dados de reanálises do NCEP/NCAR para testar o comportamento do modelo hidrológico MGB-IPH.

3.6 Aplicação da Análise Multivariada na Meteorologia

A técnica de Análise Multivariada tem sido bastante explorada em estudos sobre o comportamento hidrológico de diversas localidades (SANTOS *et al.*, 2010; GUEDES *et al.*, 2010; DINIZ, 2007; BONACCORSO *et al.*, 2003). SANTOS (2012) aplicou a técnica de Análise de Componentes Principais a valores do RAI (Rainfall Anomaly Index), na região da BHSF, com o objetivo de encontrar padrões atmosféricos que pudessem explicar o comportamento de eventos extremos de chuva e enchentes nas diferentes regiões da Bacia Hidrográfica. Os resultados mostraram que a atuação conjunta de sistemas atmosféricos transientes de diferentes escalas é responsável pela organização da convecção, precipitação intensa e formação de cheias e inundações no Submédio da bacia hidrográfica, assim como também, as grandes cheias tiveram origem de precipitações provenientes do Alto e Médio São Francisco.

SANTOS *et al.* (2010a), utilizaram a técnica da Análise de Componentes Principais (ACP) com o objetivo de analisar o comportamento espaço-temporal da precipitação na região do Submédio São Francisco. Verificaram através dos resultados, que as três primeiras CP's retidas explicaram cerca de 60% da variância total dos dados de precipitação da região. Os fatores mostraram uma relação significativa entre os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) e a Zona de Convergência Intertropical

(ZCIT) para o desenvolvimento das chuvas intensas e consequentemente, inundações ocorridas à jusante do reservatório de Sobradinho nos meses de Janeiro e Abril de 1985.

DINIZ *et al.*, (2011) utilizaram a ACP com o objetivo de determinar a contribuição relativa das variáveis atmosféricas em diversas escalas para chuvas ocorridas no mês de abril de 1985, que resultaram em inundações na área do Submédio do São Francisco. Baseando-se em dados de superfície e altitude coletados em Petrolina – PE e dados de reanálise do National Centers for Environmental Predictions (NCEP), a técnica estatística foi aplicada a fim de determinar as escalas dominantes na ocorrência deste evento. Os resultados mostraram que as escalas sinóticas e sub-sinóticas tiveram uma maior contribuição no período analisado.

SANTOS *et al.*, (2010b) aplicaram a ACP em Portugal, a dados calculados do índice de precipitação padronizada, SPI (Standardized Precipitation Index), a fim de caracterizar os eventos de seca no país. A técnica foi aplicada em diferentes escalas temporais, designadas 1, 6 e 12 meses consecutivos. Os resultados mostraram três regiões diferentes espacialmente bem definidas com diferentes padrões temporais de seca.

LANA *et al.*, (2001) também utilizaram ACP aplicando ao índice de precipitação padronizada (SPI), em escala mensal, com o objetivo de detectar quais os padrões espaciais e temporais responsáveis por episódios de seca e excessos de chuva na região da Catalunha (Espanha). Os resultados mostraram que os períodos de seca geralmente ocorrem em áreas maiores e são mais intensas do que os períodos úmidos.

BONACCORSO *et al.*,(2003) realizaram um estudo na área da Sicília para o período de 1926 a 1996 utilizando reanálises do NCEP/NCAR de dados de precipitação. Os autores aplicaram a ACP aos valores calculados também do índice de precipitação padronizada (SPI) para avaliar a variabilidade de secas a longo prazo. A aplicação de rotações ortogonais aos padrões das componentes possibilitou encontrar três áreas de variabilidade climática independentes sugerindo que diferentes fatores físicos atuam na região.

3.7 Transformada de Ondaleta (TO)

Vários estudos foram feitos com o objetivo de relacionar os eventos extremos de seca e de precipitação ocorridos no Brasil com padrões de teleconexões (SANTOS, 2011; DA SILVA *et al.*, 2011; DA SILVA *et al.*, 2013; DA SILVA *et al.*, 2010; CERQUEIRA, 2010; DA SILVA *et al.*, 2009; SILVA, 2010). A Transformada de

Ondaleta tem sido mais utilizada pela sua eficiência em captar sinais de fenômenos não estacionários. BARBOSA & BLITZKOW (2008) afirmam que a Transformada de Ondaleta (TO) tornou-se uma ferramenta comum para análise de variações de energia em uma série temporal, pela decomposição em tempo, frequência e espaço. Já a Transformada de Fourier é limitada em determinar variações de frequência de forma simultânea.

SANTOS (2011) utilizou a técnica de TO aplicando a valores obtidos de SPI (Standardized Precipitation Index), na parcela da Bacia Hidrográfica de São Francisco, situada no Estado de Minas Gerais, com o objetivo de identificar os principais fatores de teleconexões responsáveis pelas secas nessa região. Verificou que não foram encontradas evidências do aumento da frequência das secas em função das mudanças climáticas, como também não identificou mudanças na intensidade das secas. Para o autor, tais mudanças sentidas na última década podem estar relacionadas ao aumento da demanda de água, que geram escassez hídrica mais frequente, associadas também à difusão da informação.

CERQUEIRA (2010) aplicou a TO a dados de precipitação do Estado da Paraíba e encontrou padrões de teleconexões significativos relacionados aos eventos de chuvas no Estado. DA SILVA *et al.*(2011) aplicou ondaleta a dados de precipitação na Bacia Hidrográfica do São Francisco, no Alto e Submédio, e verificou que a escala dominante nessas duas regiões é a de 11 anos. Em todos os trabalhos verificados, a utilização da técnica foi eficiente na determinação de ciclos com o objetivo de identificar padrões de teleconexão.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Dados

4.1.1 Dados observacionais

Neste trabalho foram utilizados dados de precipitação provenientes de 125 estações pluviométricas, localizadas na Bacia Hidrográfica do São Francisco, sendo 31 do INMET e 94 da ANA conforme distribuição espacial apresentada na Figura 4.1a, com totais mensais referentes ao período de 1961 a 2014. Também foram utilizados dados de Cota da estação Fluviométrica de Sobradinho no período de 1981 a 2015 e da estação fluviométrica de Três Marias no período de 1998 a 2015, também disponibilizados pela ANA, cujas localizações dos reservatórios são apresentadas na Figura 4.1(b e c). Os dois reservatórios foram escolhidos pela importância na geração de energia e controle dos recursos hídricos da BHSF.

O conjunto de dados foi utilizado nos cálculos do RAI (Rainfall Anomaly Index) nas escalas de um mês (RAI-1), três meses (RAI-3), seis meses (RAI-6) e 12 meses (RAI-12), sendo constituídos de totais mensais de precipitação no período de 1961 a 2014. As diferentes escalas foram utilizadas com o objetivo de avaliar a influência das chuvas no controle e monitoramento dos reservatórios com enfoque especial para Três Marias, localizado no Alto São Francisco, e Sobradinho, no Médio do São Francisco. Os dados fluviométricos dos reservatórios também foram utilizados para aplicação da Transformada de Ondaleta, também com objetivo de comparar valores das cotas com os valores observados no RAI em anos específicos.

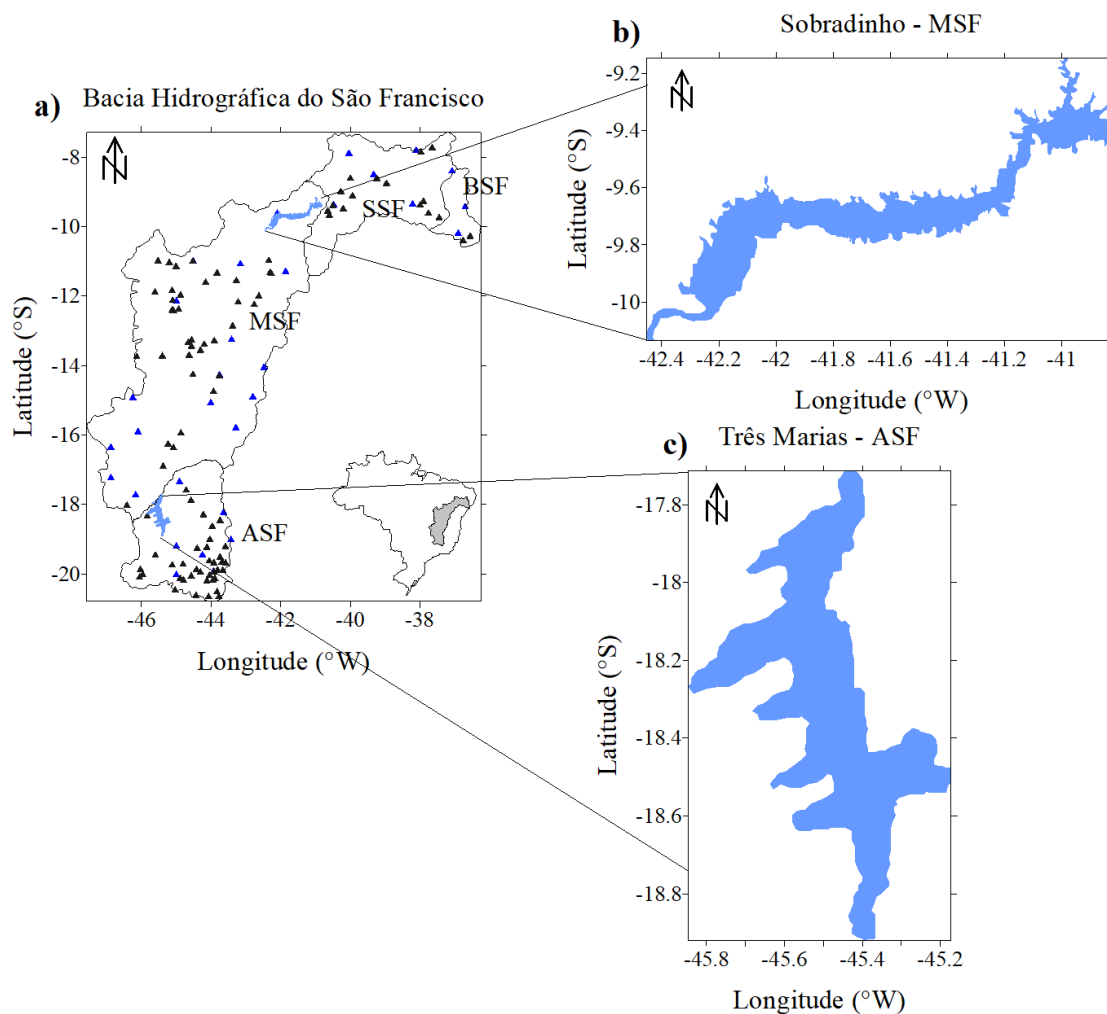


Figura 4.1: a) Localização das estações pluviométricas utilizadas neste estudo na BHSF. Os pontos em azul são referentes às 31 estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os pontos em preto são referentes às 94 estações provenientes da Agência Nacional das Águas (ANA), situadas na Bacia Hidrográfica do São Francisco; no canto inferior direito se encontra o mapa do Brasil com a localização da BHSF; b) Reservatório de Sobradinho Situado no Médio São Francisco; c) Reservatório de Três Marias situado no Alto São Francisco.

4.1.2 Dados de precipitação em pontos de grade

Muitas das séries de dados de precipitação de estações utilizadas neste trabalho (ANA e INMET) continham falhas significativas, com ausência de registros em anos consecutivos. Utilizar séries com um número menor de anos do que é exigido pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM), ou seja, no mínimo trinta anos, para um estudo climatológico, comprometeria os objetivos da pesquisa. Foram necessários procedimentos alternativos para complementar a análise em questão.

Dentre as diversas técnicas utilizadas para preenchimento de falhas de dados hidrológicos, em especial, dados de precipitação, foi escolhida a Regressão Linear Múltipla, baseada no estudo feito por OLIVEIRA *et al.*, (2010). As técnicas utilizadas para preenchimentos de dados hidrológicos, em especial de dados de precipitação, necessitam de estações próximas, que tenham características semelhantes no comportamento da precipitação, entre eles, a sazonalidade, relevo e altitude (LEIVAS *et al.*, 2005).

A priori, foi feito o preenchimento de algumas estações usando apenas dados observados de precipitação de uma estação mais próxima, com características climáticas semelhantes. Porém, a grande dificuldade encontrada é que as estações vizinhas ou com características parecidas, também continham os mesmos tipos de falhas, para o mesmo período ou mesmo para períodos mais longos, não permitindo o preenchimento adequado. Isso acarretaria na disponibilidade de um número menor de estações, não abrangendo uma área efetivamente representativa da BHSF, necessária para realização deste estudo.

A solução encontrada foi utilizar os dados de reanálise da Universidade de Delaware (UDEL) para então preencher as falhas de todas as estações utilizadas neste estudo, a fim de unificar o preenchimento das mesmas e se obter uma distribuição homogênea, com séries contínuas com período igual para todas as estações, o que facilitaria na obtenção dos resultados buscados neste trabalho. Os dados de precipitação de reanálise são dados em grade com resolução de 0,5° de latitude e longitude, centrados em 0,25°, . Os dados de precipitação foram compilados a partir de dados atualizados, provenientes das seguintes fontes: Global Historical Climatology Network dataset GHCN2; uma versão do Daily Global Historical Climatology Network (GHCN-Daily)(Menne *et al.*, 2012); um arquivo proveniente do Atmospheric Environment Service/Environment Canada; Dados do Hydrometeorological Institute in St. Petersburg, Russia (courtesy of Nikolay Shiklomanov). GC-Net data (Steffen *et al.*, 1996); registros da estação da Groelândia (Automatic Weather Station Project); dados diários para a Índia do National Center for Atmospheric Research (NCAR); Arquivo de Sharon Nicholson de dados de precipitação africanos (2001); Webber e Willmotts (1998) registros da América do Sul mensais estação de precipitação e por fim, os registros diários do Global Surface Summary of Day (GSOD). Os dados filtrados para o Brasil contêm séries de precipitação mensal com início em janeiro de 1900 a dezembro de 2014. Esses dados foram atualizados até o ano de 2014 e disponibilizados no mês de

maio de 2015. Os valores mensais de precipitação são obtidos a partir de arquivos contendo observações diárias. Os dados observados são filtrados para remover valores irreais, ou meses e anos duplicados nos registros.

4.2 Métodos

4.2.1 Preenchimento de Falhas - Regressão Linear Múltipla

De acordo com BERTONI & TUCCI (2007), as metodologias por eles citadas para o preenchimento de falhas devem ser usadas para preencher dados mensais ou anuais de precipitação. Segundo TUCCI (2002) e BERTONI & TUCCI (2007), o método de preenchimento de falhas pela regressão linear é mais aprimorado em comparação com a ponderação regional. Neste método se emprega a regressão linear simples ou múltipla, correlacionando-se um posto que contenha série de dados com falhas (variável dependente), e um ou mais postos vizinhos sem falhas (variável independente), ou seja:

$$P_x = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i + P_i \quad (4)$$

Em que:

a_0 e a_i = coeficientes de ajuste do modelo linear a serem estimados.

P_x = precipitação mensal ou anual da estação a ter a falha na série preenchida (mm).

P_i = precipitação mensal ou anual da estação vizinha de ordem “i” para o ano em que se verificou a falha (mm).

Os dados com falhas foram submetidos à Regressão Linear Múltipla, utilizando quatro pontos de grade dos dados de reanálise provenientes da UDEL mais próximos da estação a ser preenchida.

4.2.2 Consistência dos dados

Após o preenchimento, é necessário realizar a consistência dos dados. Para verificar a homogeneidade da série foi aplicado o método da Dupla Massa, muito utilizado no Brasil, indicado para séries mensais e anuais (LOPES, 2014; OLIVEIRA, 2010; BERTONI & TUCCI, 2007), desenvolvido por U.S. Geological Survey (TUCCI, 2000). O Método Dupla Massa consiste na comparação dos valores acumulados (mensais, anuais) da estação a ser preenchida, denominada estação Y, com os valores da estação de referência (ou estações de referência), que no caso da utilização de mais de

uma estação, é feita a média dos diversos postos vizinhos. Neste trabalho, as estações de referência utilizadas foram os dados de reanálise.

A declividade da reta gerada determina o fator de proporcionalidade entre as séries. Algumas possibilidades de não alinhamento são obtidas, como indicadas na Figura 4.2. Mudança de declividade (Figura 4.2b) ocorre devido a alterações nas condições climáticas ou condições físicas do local, mudança do observador, ou erros sistemáticos. Alinhamento dos pontos em retas paralelas (Figura 4.2c) ocorre quando existem erros de transcrição de um ou mais dados de precipitação, ou ainda pela ocorrência de eventos extremos de chuva dentro de um ano, podendo ser a ocorrência entre postos de diferentes regimes pluviométricos. Pontos em forma dispersa (Figura 4.2d) indica que os postos possuem regimes pluviométricos distintos, não devendo ser usados para preenchimento das falhas.

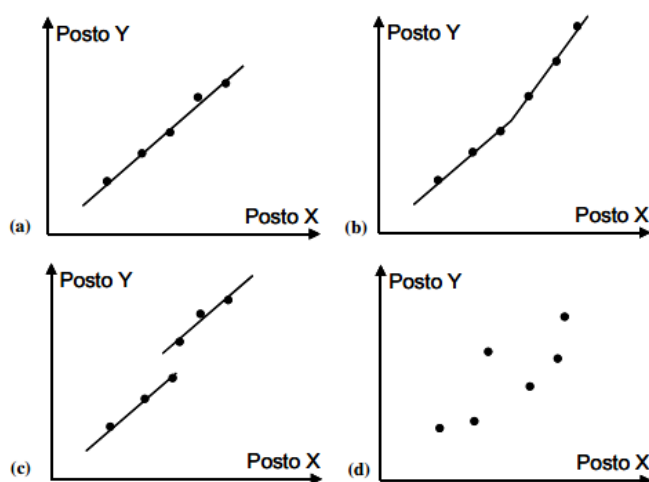


Figura 4.2: Exemplos de resultados da análise de consistência de dados do posto Y, tendo como base o posto X (totais precipitados acumulados). Fonte: Paz (2004).

O principal objetivo é verificar se ocorreu alguma mudança brusca no comportamento das variáveis ao longo do tempo, no local da observação, como também certificar a consistência do preenchimento das falhas utilizando os dados de reanálise. Os dados foram utilizados em escala mensal, então, devem-se acumular esses valores para cada posto. Foram feitos gráficos com os valores correspondentes ao posto consistido no eixo das ordenadas, e no eixo das abscissas, os valores correspondentes a um ou mais postos confiáveis, adotados como base de comparação. Neste caso, foi feita a média dos valores de precipitação dos pontos utilizados dos dados de reanálise provenientes da UDEL. As figuras de consistência dos dados são apresentadas no Apêndice I.

4.2.3 RAI (Rainfall Anomaly Index)

A avaliação do grau de severidade e duração da seca meteorológica e hidrológica, no presente estudo foi feita com base no Índice de Anomalia de Precipitação, RAI (Rainfall Anomaly Index), desenvolvido por ROOY (1965). O RAI foi calculado usando dados mensais de precipitação das séries temporais da precipitação da ANA e do INMET indicados na Figura 4.1a. Os valores do índice RAI foram obtidos a partir das seguintes equações:

$$RAI = 3 \left[\frac{(N - \bar{N})}{(\bar{M} - \bar{N})} \right], \text{ para anomalias positivas } ((N - \bar{N}) > 0); \quad (1)$$

$$RAI = -3 \left[\frac{(N - \bar{N})}{(\bar{X} - \bar{N})} \right], \text{ para anomalias negativas } ((N - \bar{N}) < 0) \quad (2)$$

Em que:

N = precipitação total medida (anual, mensal);

\bar{N} = precipitação total média da série histórica (anual, mensal);

\bar{M} = média dos **dez maiores** totais de precipitação da série histórica;

\bar{X} = média dos **dez menores** totais de precipitação da série histórica.

O cálculo do índice foi feito em diferentes escalas temporais, com o objetivo de verificar sua eficiência na identificação de eventos extremos de precipitação, em especial, nos tipos de seca, tanto na determinação da área atingida, quanto quantificar a intensidade e duração de tais eventos na BHSF. Nesse sentido, este estudo tem o objetivo de verificar as escalas que podem melhorar o monitoramento de eventos extremos de diferentes períodos de tempo, e consequentemente utilizar tais escalas para controle de reservatórios, destacando o reservatório de Três Marias situado no ASF e Sobradinho, no MSF, facilitando ações mitigadoras e prevenção de seus efeitos para a população. As escalas utilizadas foram um mês (RAI-1), três meses (RAI-3), seis meses (RAI-6) e doze meses (RAI-12).

O cálculo do RAI para escalas superiores a mensal requer a utilização de valores obtidos em meses anteriores. Por exemplo, no cálculo do RAI na escala de três meses (RAI-3), para janeiro de 2001, deve-se utilizar para obtenção dos valores do índice, acumulados de precipitação dos meses de novembro e dezembro de 2000 e do mês de janeiro de 2001. Na escala de seis meses, deve-se utilizar os acumulados de precipitação referentes aos meses de agosto, setembro, outubro, novembro, dezembro do ano 2000 e do mês de janeiro de 2001, e assim por diante. Dessa forma é possível

avaliar a associação entre a evolução temporal e espacial do RAI com padrões atmosféricos dominantes e seu impacto no volume dos reservatórios na BHSF, observado a partir da escala de seis meses.

4.2.4 Influência do ENOS (El Niño-Oscilação SUL) e de anos neutros

O monitoramento de eventos extremos, mesmo com os avanços em muitos estudos, é relacionado na maioria dos casos a ocorrência do ENOS (MELO, 1999; GALVÍNCIO & SOUSA, 2002). A influência do ENOS na variabilidade do regime hidrológico da BHSF já foi discutida em diversos estudos. SANTOS (2012) selecionou os episódios de 1982/1983 e 1984/1985 para discutir essa variabilidade. A atuação do El Niño registrada em 1982/1983, um dos mais fortes do século XX, resultou numa das secas mais severas já registradas no NEB. O grau de severidade do fenômeno foi estimado em função da extensão da área afetada e dos prejuízos econômicos causados pela escassez de chuva na região. O período de 1984/1985 sob influência do La Niña, foram observadas chuvas em toda a bacia hidrográfica com registros de cheias em janeiro de 1985. A ocorrência de enchentes na área do Submédio da BHSF motivou a escolha desse mês como um dos períodos essenciais das análises apresentadas neste trabalho. SILVA (2013), encontrou uma relação positiva em seus estudos mostrando que em anos de El Niño, existe um aumento das cotas nos reservatórios do Rio São Francisco, devido ao aumento de chuvas no Alto São Francisco.

Os eventos de precipitação extrema escolhidos neste estudo incluem períodos sobre a influência do ENOS e fases neutras. Para isso, serão utilizados os valores trimestrais das anomalias de TSM da região do Niño 3.4 (5°N-5°S, 120°W-170°W). Um evento é considerado como El Niño (EN) ou La Niña (LN) cinco trimestres consecutivos com anomalias abaixo de -0,5° C para La Niña e acima de +0,5° C para El Niño. Valores desses índices, denominados Índices de Oscilação Sul (IOS), referentes a cada trimestre são apresentados na Tabela 4.1, localizada no Anexo 1.

Neste trabalho o enfoque foi dado aos anos de 2001, 2007, 2008, 2012 e 2014, considerados anos críticos sob o ponto de vista hidrológico na BHSF. Os anos de 2001 e 2014 foram anos de racionamento de recursos hídricos, em que os níveis dos reservatórios de Três Marias e Sobradinho chegaram a valores extremamente baixos. Sobradinho atingiu 5% do seu volume útil no ano de 2001, e esse valor foi ainda menor no ano de 2014 (4,5%). SILVA *et al.* (2011) e SANTOS (2012) mostraram em seus estudos na BHSF que em anos de atuação do El Niño propicia anos mais chuvosos no

ASF, favorecendo o aumento das cotas dos reservatórios ao longo do rio. O ano de 2015 foi um ano sob atuação do fenômeno com intensidade forte, no entanto, os valores das cotas de Sobradinho não foram altos, quando comparado com o ano de 1983, em que o reservatório chegou a sua capacidade máxima (CORREIA & SILVA DIAS, 2003).

4.2.5 Análise de Agrupamento (AA)

A Análise de Agrupamento (AA) ou Clusters Analysis, é uma técnica estatística multivariada, que tem o objetivo de organizar elementos em grupos, que podem ser de observações ou variáveis, baseados em informações quanto a sua proximidade. Os elementos do mesmo grupo são similares da mesma maneira que são dissimilares dos elementos presentes nos demais grupos (MATOS, 2007). O grupo resultante de cada classificação deve exibir um alto grau de homogeneidade interna e alta heterogeneidade externa (CORRAR *et al.*, 2014).

Há diversos tipos de algoritmos que vêm sendo estudados para proceder a AA, porém, duas mais comuns são utilizadas. O método hierárquico tem início com uma matriz de distâncias entre objetos, que são unidos quando estão próximos. Os grupos são formados por um processo de aglomeração ou divisão. Os principais métodos hierárquicos são: Single Linkage (Ligação Simples), baseado na distância mínima; Complete Linkage, que é baseado na distância máxima; Average Linkage, que da mesma forma que os anteriores é a distância de todos os indivíduos de um grupo em relação a todos de outro; Ward's Method, que baseia-se na medida da soma total dos quadrados dos desvios de cada objeto em relação à média do conglomerado, o qual o objeto foi inserido e o Centroid Method, em que a distância entre os grupos é a distância entre seus centróides.

O método não hierárquico é feito a partir da definição de um número de grupos inicialmente. A classificação dos indivíduos irá depender das características numéricas de similaridade ou dissimilaridade.

Para a determinação das regiões homogêneas de precipitação na BHSF, neste trabalho foi utilizada a técnica de agrupamento no modo hierárquico de Ward, em que a partição dos grupos é feita a partir de um mínimo de grupos pré-definidos, em que a medida de distância utilizada é o método Euclidiano. Na entrada foram utilizados os dados de precipitação das estações apresentadas na Figura 4.1a.

A função da distância Euclidiana é dada pela equação 3:

$$d_{ij} = \left\{ \sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2 \right\}^{1/2} \quad (3)$$

Em que:

x_{ik} é o valor da variável X_k para o objeto i ;

x_{jk} é o valor da mesma variável para o objeto j ;

4.1.1 Transformada de Ondaleta (TO)

A grande maioria das observações e análises de processos físicos na natureza é feita a partir de séries temporais. A Análise de Ondaleta ou Transformada de Ondaleta (TO) consiste em decompor uma série de dados no tempo em outra função espectral, com o objetivo principal de analisar essa série em função do tempo com sinais de frequência distintos, de diferentes escalas temporais, em que não seria possível observar através da série obtida com os dados originais. A vantagem da TO, é que a nova função é formada pela mesma série de dados.

A Ondaleta é baseada em sinais, no caso da Meteorologia, sinais atmosféricos de diversas escalas e, através desses sinais, é possível verificarem uma série temporal um ciclo, com início, maturação e duração. Para dados ambientais, o tipo de ondaleta utilizada é a Morlet. A ondaleta Morlet pode sofrer variações bruscas em um curto tempo no espaço (SILVA, 2009).

As séries submetidas à TO são compostas de valores do RAI provenientes de grupos homogêneos do ponto de vista climático, na BHSF. Esse procedimento teve o objetivo de identificar a escala dominante dos sistemas meteorológicos que atuam na Bacia no período determinado da série.

Em cada grupo ou região pluviometricamente homogênea encontrada a partir da técnica de Análise de Agrupamentos, foi feita uma média regional dos valores de precipitação para cada ano, incluindo todas as estações referentes a cada Grupo. A partir dos valores médios, foi calculado o valor do RAI para a região, ou seja, para cada Grupo pluviometricamente homogêneo.

Posteriormente, foi aplicada a TO aos valores obtidos do índice nas escalas mensal (RAI-1), trimestral (RAI-3), semestral (RAI-6) e anual (RAI-12) a fim de investigar e identificar possíveis tendências e variações em diferentes períodos: sazonais, interanuais, variações aleatórias.

A importância do método é identificar quais os principais sinais da variabilidade temporal que se perpetuam podendo influenciar diretamente no regime hidrológico da bacia, a partir dos dados de precipitação, bem como observar se estes sinais tiveram um comportamento diferente no decorrer dos anos nas diferentes regiões

pluviometricamente homogêneas da BHSF. Verificar quais os anos que, apresentando maior variabilidade espacial e temporal, tiveram maior influência na ocorrência de eventos extremos, em especial, os eventos de seca hidrológica, que afetaram diretamente diversos setores da economia na Bacia, sendo considerados anos críticos.

De acordo com SILVA, (2009) a ondaleta está relacionada a um conjunto de funções, formada por pequenas ondas, sendo geradas por dilatações e translações de uma função de variável real $t - \psi(t)$, que pode ser qualquer variável em relação ao tempo, também conhecida como ondaleta-mãe, ou seja, é uma série composta por muitas variações, que unidas, irão formar a ondaleta-mãe. Matematicamente a função ondaleta numa escala a e posição b , pode ser escrita como:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(t - \frac{b}{a}\right) \quad (1)$$

Em que, a e b são valores reais, com $a > 0$ e $a \neq 0$.

A transformada de ondaleta contínua da função no tempo $f(t)$ é dada por:

$$(W\psi f)(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f(t) \psi\left(t - \frac{b}{a}\right) dt \quad (2)$$

Em que $f(t)$ é a função da série temporal dos dados a serem analisados e o fator $\frac{1}{\sqrt{a}}$ constante de normalização da energia de cada ondaleta, mantendo a mesma energia da ondaleta principal, ou ondaleta-mãe.

Existem vários tipos de ondaleta, porém, para dados ambientais, a ondaleta Morlet é a utilizada por ter um comportamento semelhante aos ocorridos na atmosfera.

A ondaleta de Morlet é definida de acordo com a seguinte expressão:

$$\psi(t) = e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2}$$

Em que:

ω_0 = frequência adimensional.

i = parâmetro de dilatação e compressão da onda.

t = tempo

$e^{-t^2/2}$ = I: Envelope Gaussiano

Nesse sentido, é possível variar a escala da ondaleta modificando a sua largura. Para determinar os ciclos curtos ou longos, modifica-se o tipo de onda, ou seja, Morlet ou Gaussiana. (SILVA, 2009).

5. RESULTADOS

5.1 Análise de Regressão Linear Múltipla – Preenchimento de Falhas

No processo de preenchimento de falhas, utilizando a Regressão Linear, o conjunto de dados resultante foi submetido a testes de consistência através do Método de Dupla Massa, recomendado e utilizado para verificar a consistência de séries temporais (OLIVEIRA *et al.*, 2010; LOPES, 2014). A principal finalidade dessa técnica é observar e identificar a ocorrência de mudanças bruscas no comportamento da variável ao longo do tempo no local da observação.

A Figura 5.1 apresenta as curvas das duplas massas para os postos pluviométricos utilizando o método de Dupla Massa, de alguns postos situados na BHSF pertencentes aos Estados de Minas Gerais (MG), Bahia (BA), Pernambuco (PE) e Alagoas (AL). Os resultados das demais estações podem ser consultados no apêndice. Os resultados mostraram que o preenchimento foi satisfatório, não havendo alterações significativas nas retas, que pudessem ser atribuídas a qualquer mudança de variável ao longo do tempo ou no local da observação. Das 125 estações pluviométricas utilizadas neste trabalho, 96 delas foram submetidas ao preenchimento de falhas. A consistência de cada estação é apresentada no Apêndice I. Os alinhamentos não apresentaram mudança de declividade significativa, na forma dispersa, que impedisse o preenchimento das mesmas. Em todos os casos observa-se uma consistência das séries com altos coeficientes de determinação.

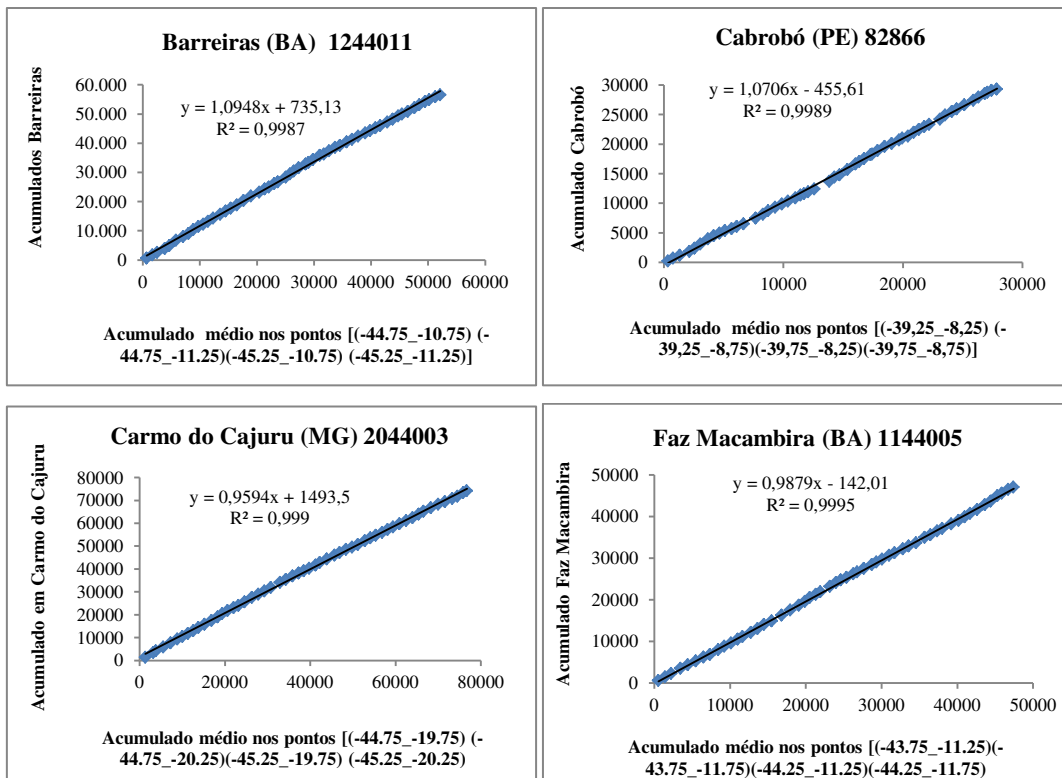


Figura 5.1: Curvas de dupla massa para a verificação da consistência das séries históricas de precipitação (mm) observadas de postos pertencentes aos Estados de Minas Gerais (MG), Bahia (BA), Pernambuco (PE) e Alagoas (AL), situados na área da Bacia Hidrográfica do São Francisco.

5.2 Regiões homogêneas de precipitação da Bacia Hidrográfica do São Francisco

Com a aplicação da AA, foram obtidas quatro regiões homogêneas de precipitação, em relação à variabilidade sazonal. A região denominada de Grupo 1 (Figura 5.2), compreende praticamente todo o Alto São Francisco (ASF) e a parte Sudoeste do Médio São Francisco (MSF). O período chuvoso compreende os meses de novembro a março (Figura 5.3a). O mês com maior quantidade de precipitação na região é o mês de dezembro, com uma média acumulada para a região de aproximadamente de 290 mm, seguido do mês de janeiro, com uma quantidade aproximada de 270 mm.

A região denominada Grupo 2, compreende o Médio São Francisco (MSF), inserida no Semiárido Nordeste, é caracterizada por um acumulado anual de precipitação extremamente baixo se comparado com o total anual registrado no ASF. O período mais chuvoso também compreendem os meses de novembro a março (Figura 5.3b). Esse resultado reflete o comportamento dos sistemas atmosféricos atuantes nessas

regiões, sendo os mesmos: ZCAS, VCAN's e SF. A diferença maior está na quantidade precipitada, em que no ASF é visível que o acumulado precipitado é maior do que nas demais regiões da Bacia.

A região representada pelas estações do Grupo 3, compreende a região do Submédio São Francisco (SSF). Os meses mais chuvosos vão de janeiro a abril (Figura 5.3c). Esse comportamento indica que os principais sistemas produtores de precipitação nessa região são ZCAS, VCAN's e a ZCIT. Verifica-se que o acumulado de precipitação mês a mês é menor nessa região, e que o mês de maior acumulado é março, com uma média aproximadamente de 100 mm.

O grupo 4 está representado pelas estações situadas no Baixo São Francisco (BSF), e os meses que compreendem o período chuvoso da região são de Abril a Agosto (Figura 5.3d). Os meses mais chuvosos são maio e junho, com acumulado médio de precipitação que ultrapassam 170 mm. O principal sistema produtor de chuva nessa região são os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL's).

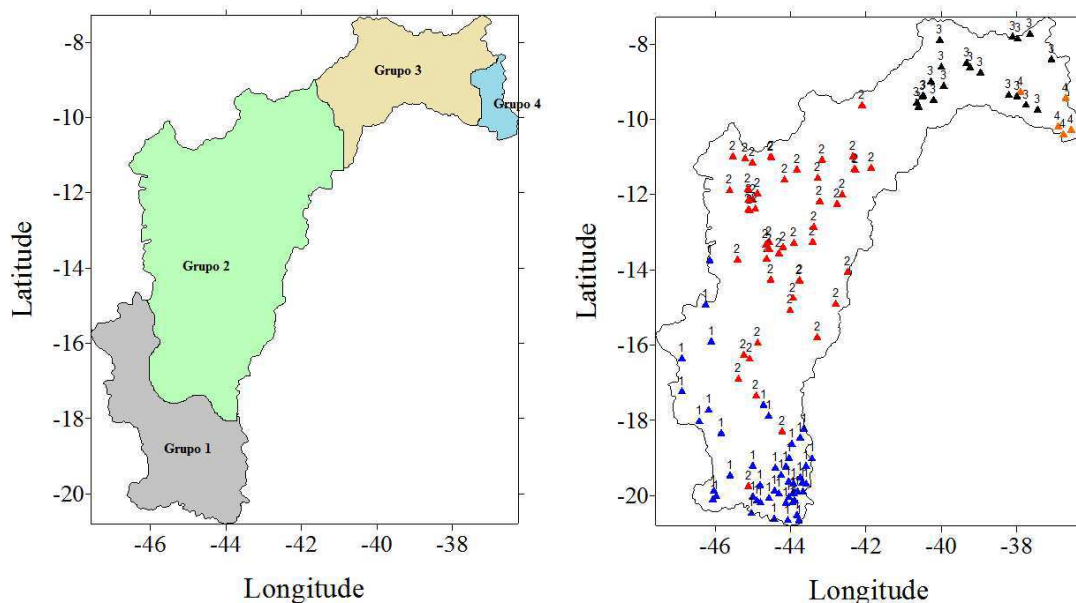


Figura 5.2: Espacialização das estações presentes na Bacia Hidrográfica do São Francisco por regiões homogêneas (Grupos) de precipitação. Grupo 1 – Alto São Francisco (ASF); Grupo 2 – Médio São Francisco (MSF); Grupo 3 – Submédio São Francisco (SSF); Grupo 4 – Baixo São Francisco (BSF).

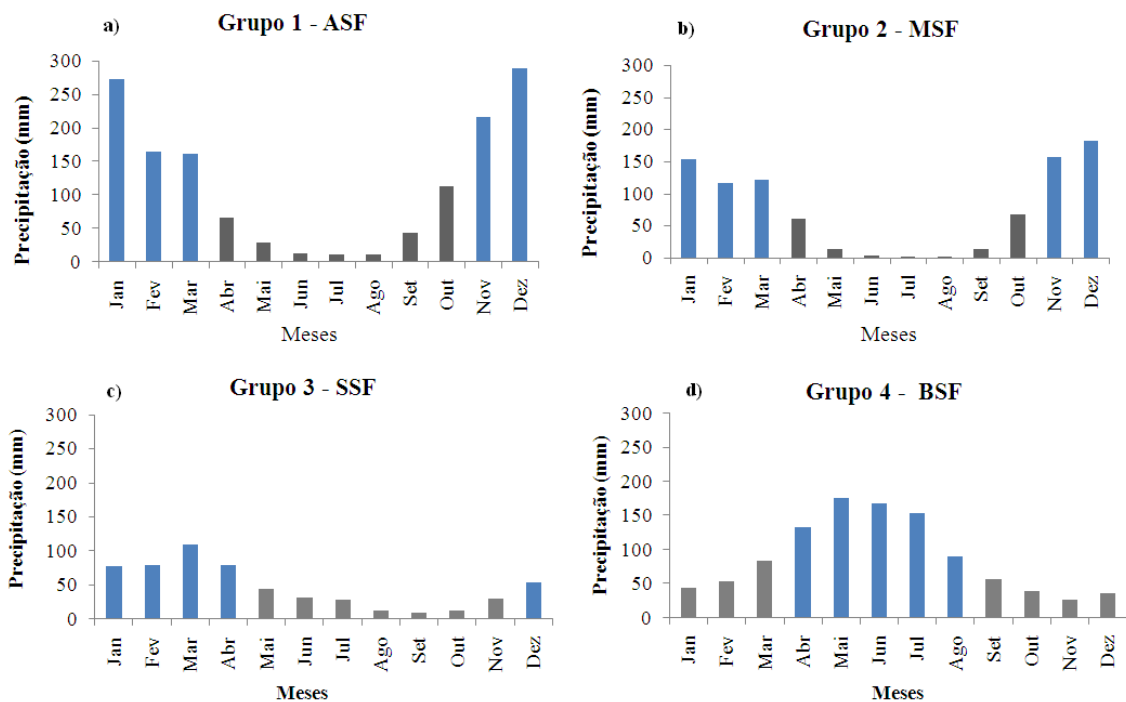


Figura 5.3: Histogramas da distribuição temporal da chuva por regiões pluviometricamente homogêneas utilizando a série histórica dos dados de 1961 a 2014: a) Grupo 1 – Alto São Francisco (ASF); b) Grupo 2 – Médio São Francisco (MSF); c) Grupo 3 – Submédio São Francisco (SSF); d) Grupo 4 – Baixo São Francisco (BSF).

5.3 Estudos de Casos

5.3.1 Análise da precipitação no ano de 2001

A importância do ano de 2001 neste estudo está relacionada ao déficit entre a geração e o consumo de energia elétrica, em que, na época, segundo BADERLIM (2004), culminou no maior racionamento de energia elétrica da história do país, em termos de abrangência e redução de consumo. Teve início em junho de 2001 e término em fevereiro de 2002, e acabou resultando em uma acentuada queda no consumo de energia elétrica, conseqüentemente, prejudicando diversos setores da economia brasileira.

Também foi um ano sem grandes influências do ENOS, em que o IOS indica ocorrência de La Niña até o mês de março. Nos demais meses do ano, o IOS obteve valores indicando neutralidade no Oceano Pacífico Tropical (Tabela 4.1). Vários estudos mostram que em anos sob efeitos do fenômeno La Niña ocorre diminuição das chuvas no Sul e Sudeste do Brasil. O contrário ocorre na região Nordeste, com o

favorecimento da precipitação acima da média climatológica. (ARAGÃO, 1998; CERQUEIRA, 2010; GRIMM, 2009).

5.3.1.1 Análise do RAI-1 (um mês) referente ao ano 2001

A ilustração conjunta da variabilidade entre a média climatológica e acumulado médio de precipitações mensais registradas em 2001 para cada região homogênea é apresentada na Figura 5.4. Os valores do RAI-1 obtidos para o ano de 2001 são ilustrados na Figura 5.5. É possível identificar no período de janeiro a março, as anomalias de precipitação no período chuvoso do ASF, MSF e SSF, são abaixo da média em praticamente todas as regiões, exceto o mês de março no SSF e BSF (Figura 5.5c, d).

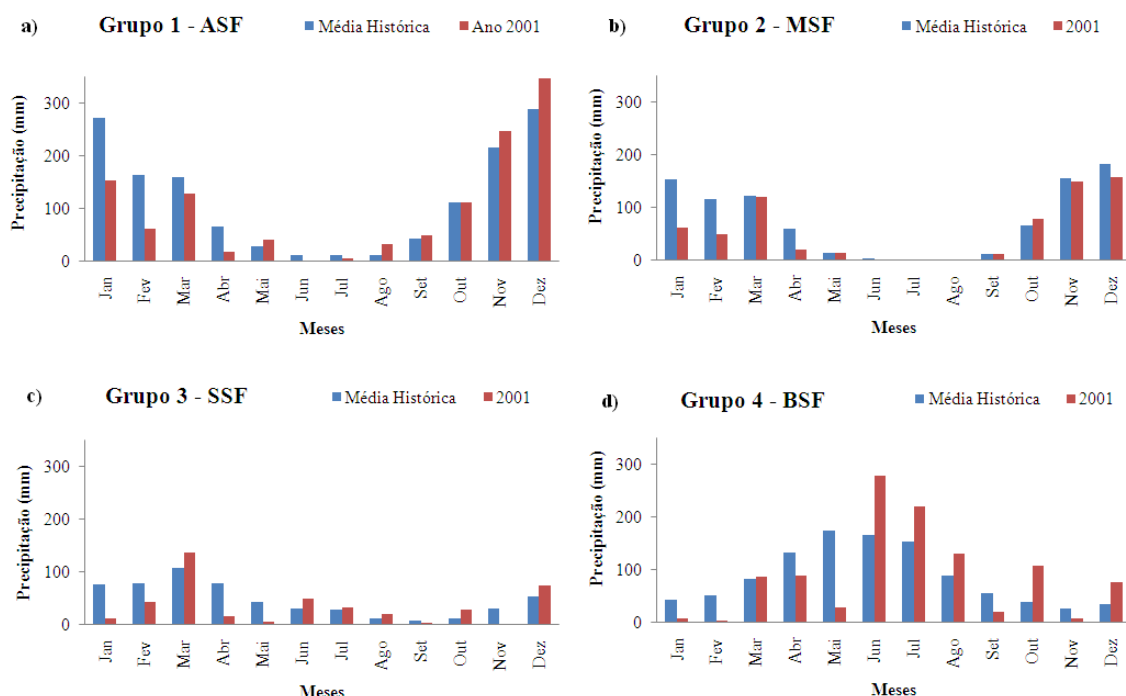


Figura 5.4: Histogramas de precipitação por Grupos comparando a média histórica (em azul) de 1961 a 2014 com o a média da precipitação observada (em vermelho) no ano de 2001.

Os valores do RAI-1 em cada Grupo homogêneo de precipitação da BHSF ilustrados na Figura 5.5 são negativos nos meses em que a precipitação média observada foi abaixo da média histórica, e valores positivos do índice aparecem nos meses em que a precipitação média observada foi acima da média histórica em cada região. O período chuvoso no ASF, MSF e SSF, mostra valores negativos do RAI de janeiro a abril de 2001. No período chuvoso do BSF, os valores do índice são positivos

nos meses de junho, julho e agosto. No período seco de todas as regiões, os meses em que a precipitação foi um pouco acima da média esperada, os valores do RAI apresentam anomalias positivas de chuva. Os valores positivos observados no mês de agosto no ASF, junho, julho e agosto no SSF, e também nos meses de outubro e dezembro no BSF, mostram valores acima de 1,5. A intensidade da anomalia tende a ser superestimada por se tratar de meses do período seco (SANTOS, 2012), no entanto, as chuvas foram acima da média. Esse comportamento ocorre devido à frequência maior de valores de precipitação iguais a zero (precipitação mínima), havendo uma tendência de superestimar os valores do RAI em meses secos.

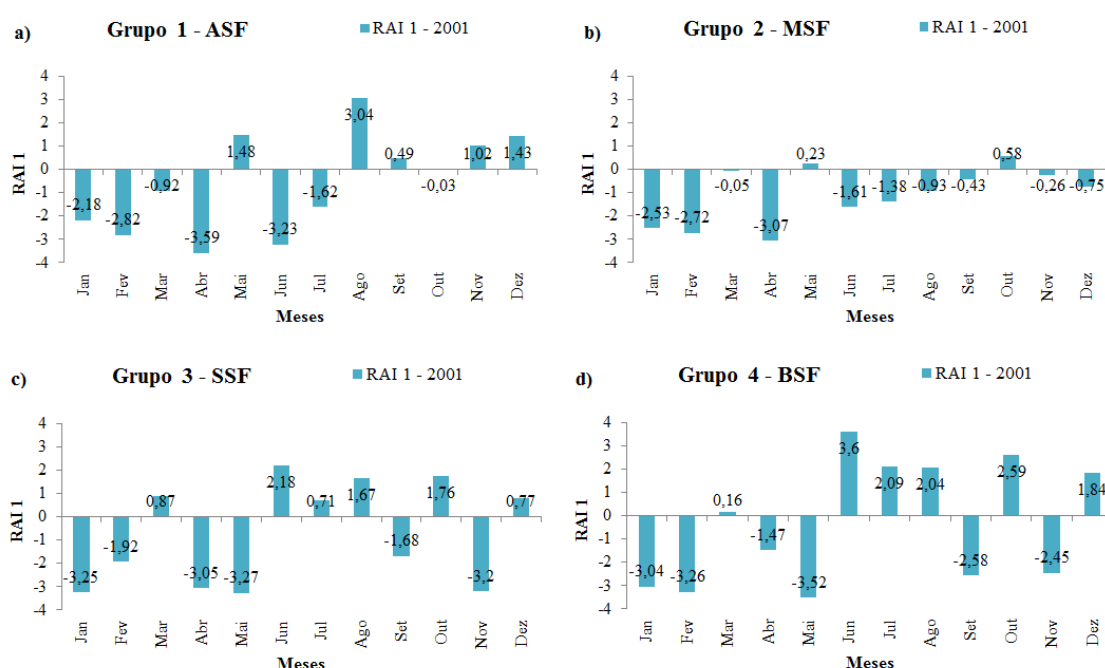


Figura 5.5: RAI-1 (um mês) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referentes ao ano de 2001.

A distribuição espacial do RAI-1 na BHSF é apresentada na Figura 5.6. As anomalias negativas são apresentadas na cor laranja e linhas tracejadas, e anomalias positivas são apresentadas na cor azul com linhas contínuas para os seis primeiros meses do ano de 2001. A escolha dos seis primeiros meses de cada ano neste estudo, ocorre devido a atuação da maioria dos Sistemas Meteorológicos responsáveis pela precipitação na BHSF atuarem durante estes meses. Verifica-se a predominância de valores negativos principalmente no ASF. Esse resultado indica precipitação abaixo da média histórica. No mês de março, os valores positivos do RAI-1 nas regiões a oeste do

MSF, no SSF e BSF indicam a ocorrência de chuvas acima da média histórica (Figura 5.6c, d).

No mês de maio, apesar de não fazer parte do período chuvoso no ASF, os valores positivos do RAI são predominantes. Esse resultado indica chuvas acima da média apesar da predominância de anomalias negativas no período analisado (janeiro a junho de 2001), conforme mencionado no parágrafo anterior. No mês de junho, os valores positivos são predominantes no BSF, ao sul do SSF e em uma pequena área a leste no MSF (Figura 5.6e, f).

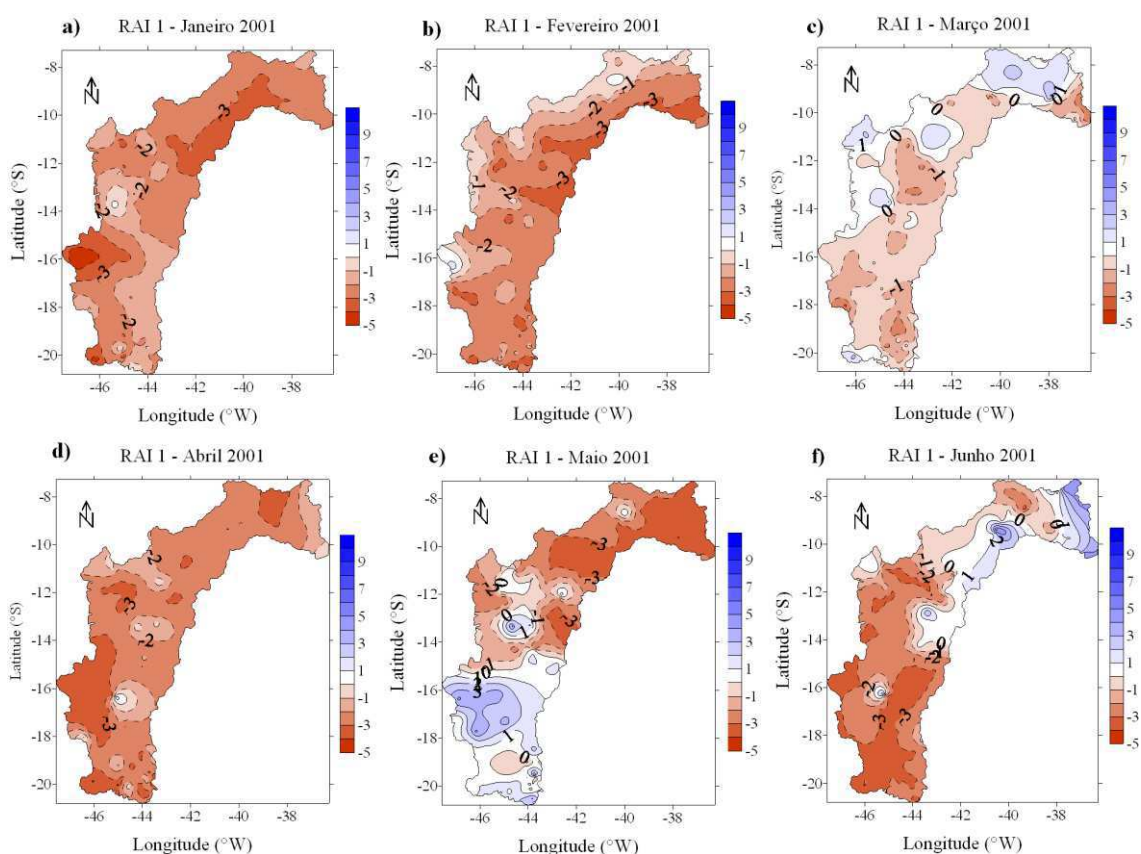


Figura 5.6: Distribuição espacial do RAI-1(um mês) na BHSF para os meses de janeiro a junho do ano de 2001.

O mês de janeiro, em particular, é caracterizado como chuvoso em praticamente todas as regiões da BHSF, em geral esse padrão é associado com a atuação de Vórtices Ciclônicos da Alta Troposfera. Particularmente em 2001, os VCAN's se posicionaram predominantemente no interior da região Nordeste. A influência conjunta de movimentos descendentes na área central do Sistema e da Alta Subtropical do Atlântico Sul, inibiu a ocorrência de precipitação. Na Figura 5.7 é possível identificar através das pântadas de temperatura de brilho, do Satélite GOES 8, a ausência de nebulosidade no interior do Nordeste, comum no centro dos VCAN's.

As linhas de corrente média para o mês de janeiro em 850 hPa e 200 hPa (Figura 5.8), verifica-se a predominância do Anticiclone em baixos níveis associado ao eixo do Cavado em altos níveis, desfavorecendo a ocorrência de nebulosidade, e consequentemente, de chuvas no período analisado. Essas condições atmosféricas também foram desfavoráveis à ocorrência de chuvas no Estado de Minas Gerais, em que a redução pluviométrica foi superior a 100 mm. Mesmo com a atuação de um caso de ZCAS no início do mês, de intensidade fraca, não foi suficiente para normalizar as chuvas na região Sudeste do Brasil (CLIMANÁLISE, 2001).

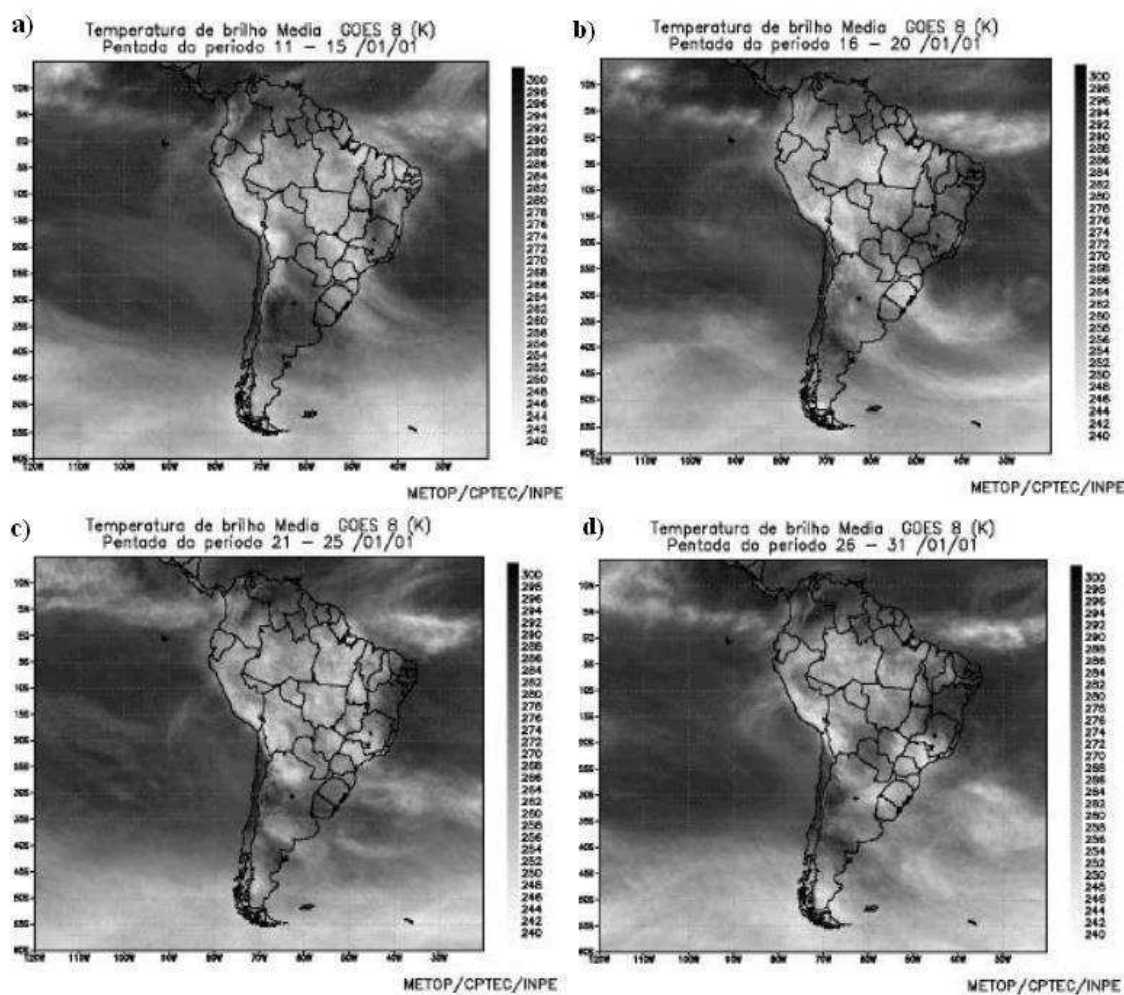


Figura 5.7: Médias pentadais da temperatura de brilho (K) obtida do satélite GOES 8 para: (a) 11 a 15/01/2001, (b) 16 a 20/01/2001, (c) 21 a 25/01/2001 e (d) 26 a 31/01/2001 (Fonte: CPTEC/INPE).

Nos meses de fevereiro, março e abril de 2001, a atuação de VCAN's e Cavados em altos níveis, centrados sobre a Bahia, inibiu a precipitação e boa parte da região Nordeste do Brasil (NEB). Houve um pequeno aumento da precipitação no Estado de Minas Gerais devido à atuação de Sistemas Frontais associados aos VCAN's, porém os

desvios ainda foram negativos em maior parte da região. O mesmo ocorreu no Sudeste, que, mesmo com a atuação de Frentes Frias no mês de abril, a intensidade das mesmas foram fracas e com deslocamento preferencial para o litoral, e as chuvas foram escassas no interior da região (CLIMANÁLISE, 2001).

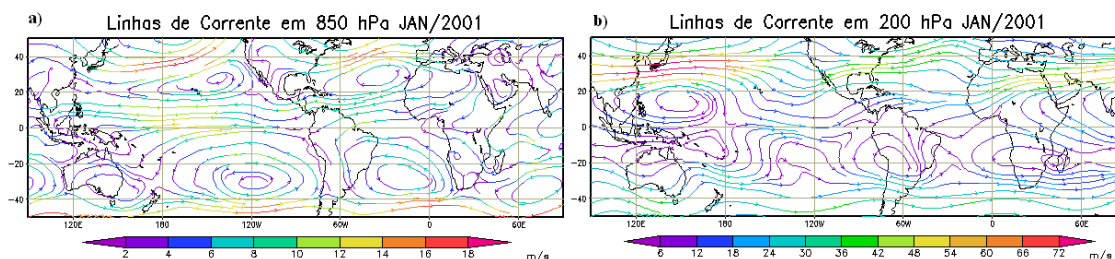


Figura 5.8: Média das linhas de corrente referentes ao mês de janeiro: a) 850 hPa; b) 200 hPa. Fonte: CPTEC/INPE.

A distribuição espacial do RAI-1 para o mês de maio de 2001 (Figura 5.6e) apresenta valores positivos em praticamente toda a Região inserida no Estado de Minas Gerais e em alguns poucos núcleos positivos no MSF, inseridos no Estado da Bahia. As chuvas excederam a média histórica em Minas Gerais e em São Paulo. Esse comportamento ocorreu devido à atuação de Sistemas Frontais e Sistemas de Baixa Pressão em superfície que atuaram na região. No oeste e extremo sul da Bahia, as chuvas estiveram ligeiramente acima da média (CLIMANÁLISE, 2001).

A Figura 5.6f apresenta valores positivos do RAI-1 no mês de junho em parte do MSF, SSF e praticamente todo o BSF. Em especial, no BSF, esses valores, indicam que a precipitação foi acima da média, e estão relacionados à atuação de sistemas de baixa pressão associadas à DOL's sobre o Oceano. Na Região Sudeste, predominaram valores abaixo da média histórica em toda região, assim o ASF mostra valores negativos do índice. Verifica-se que o índice na escala de um mês (RAI-1) reflete nitidamente o regime de chuvas na BHSF tanto na sua distribuição espacial (Figura 5.6) como em seus valores médios por região homogênea de precipitação (Figura 5.5).

5.3.1.2 Análise do RAI-3 (três meses) referente ao ano 2001

Nessa seção são apresentados os resultados das análises do RAI-3 separadamente para cada grupo de estações pluviometricamente homogêneas (Figura 5.9), como também sua distribuição espacial (Figura 5.10). Na Figura 5.9, os períodos de novembro-janeiro a abril-junho de 2001 apresentam em todas as regiões valores negativos do RAI-3, exceto no MSF e SSF, em que o período novembro-janeiro apresenta valores positivos. No ASF, valores positivos aparecem a partir do trimestre

junho-agosto. No MSF a predominância é de valores negativos do RAI-3 em praticamente todo o ano (Figura 5.9b). No BSF, o RAI-3 no período referente a junho-agosto (Figura 5.9d), apresenta valores positivos. Esse comportamento é repetido nos períodos trimestrais seguintes para a mesma região.

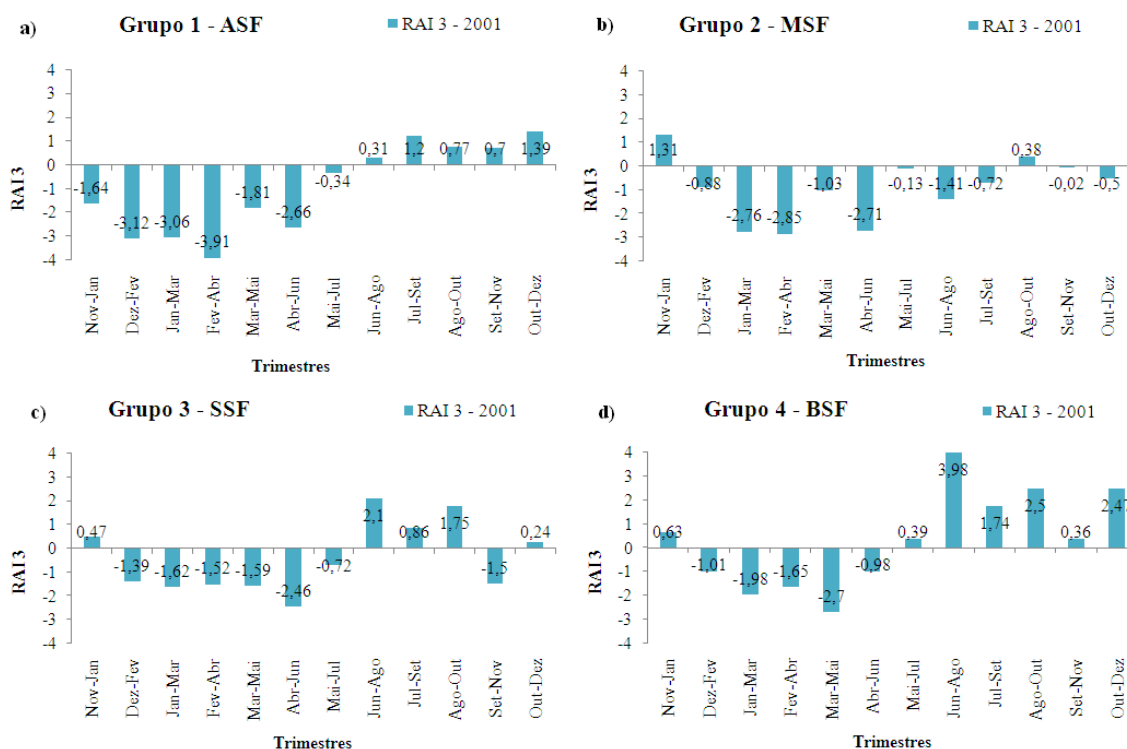


Figura 5.9: RAI-3 (três meses) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2001.

Na distribuição espacial do RAI-3, apresentada na Figura 5.10, observam-se anomalias negativas em praticamente toda a região do ASF, no trimestre de novembro2000/janeiro2001 (Figura 5.10a), sendo um período em que o acumulado de precipitação registrado neste trimestre foi favorável no MSF, SSF e BSF. Apesar dos valores positivos registrados na Figura 5.10a, é possível verificar que as anomalias negativas do RAI-3 persistem em praticamente toda a BHSF até período abril/junho2001 (Figura 5.10f). Esse comportamento é evidente em todos os trimestres analisados no ano de 2001 na região do ASF.

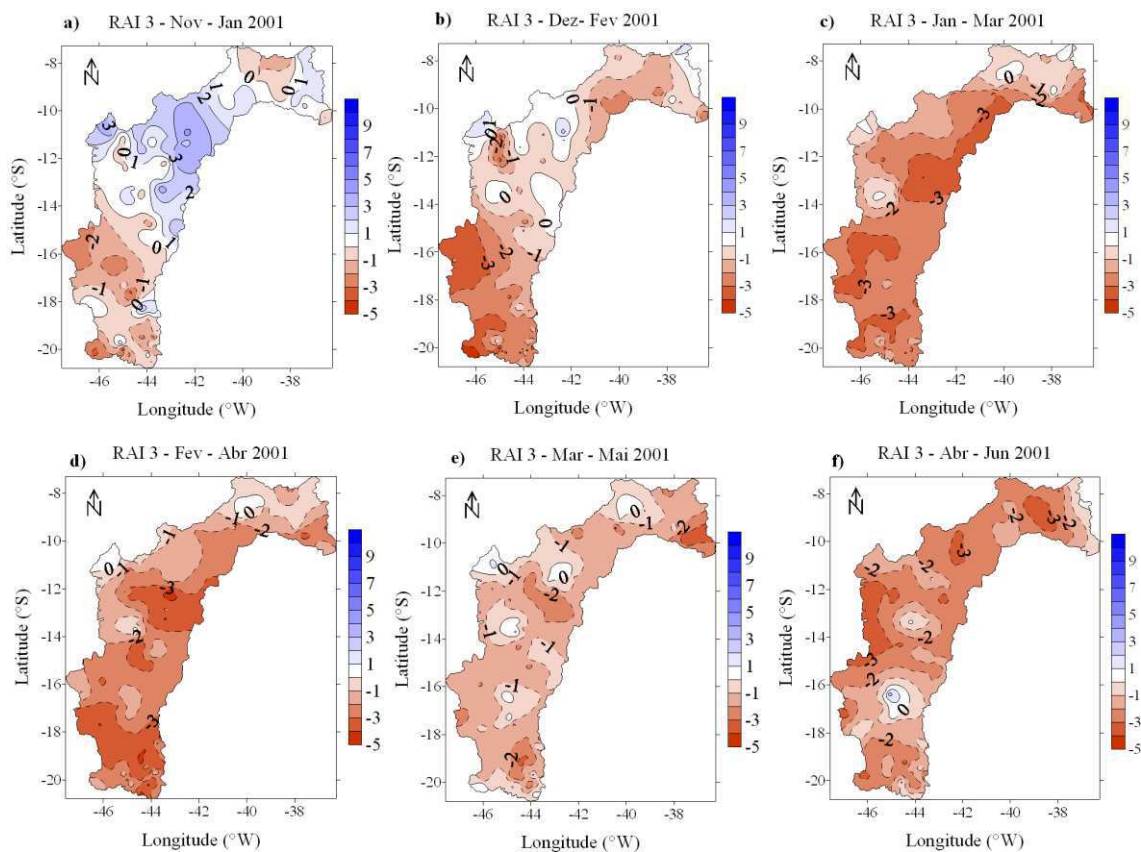


Figura 5.10: Distribuição espacial do RAI-3 (três meses) na BHSF para os períodos de novembro2000/janeiro2001 a abril/junho2001.

Apesar dos valores positivos observados, é possível verificar que estes valores do RAI-3 não são tão expressivos, alcançando um máximo de 3 apenas no período novembro2000/janeiro2001 (Figura 5.10a) . Os valores positivos são devidos às chuvas ocorridas no mês de dezembro, quando os valores chegaram a 400 mm no sul da Bahia, e os desvios de precipitação excederam 200mm (CLIMANÁLISE, 2000). Nos demais períodos, os valores positivos do RAI-3 alcançaram o limiar da ordem de 1, no entanto, concentrados em núcleos isolados. A área atingida pela escassez de chuvas foi bem mais extensa e, conseqüentemente, reflete a predominância de valores negativos do RAI-3, principalmente no ASF para maioria dos períodos analisados.

5.3.1.3 Análise do RAI-6 (seis meses) referente ao ano 2001

O RAI-6 para as regiões pluviometricamente homogêneas são apresentadas na Figura 5.11, e a distribuição espacial do RAI-6 é apresentada na Figura 5.12. A análise de anomalias de precipitação com base no acumulado de um período relativamente longo (seis meses) implica em incluir meses representativos dos períodos úmidos e secos. No entanto, a aplicação do RAI-6 é útil na avaliação da durabilidade de secas e

consequentemente de impactos potenciais na agricultura e abastecimento de água.

O uso dessa escala, em comparação com outros índices, em especial o SPI, sendo muito utilizado para o monitoramento de secas do Nordeste do Brasil, que é baseado no monitoramento de secas dos Estados Unidos (MONITOR DE SECAS DO NORDESTE), é útil para auxiliar o monitoramento de recursos hídricos. Em um período de seis meses, é possível identificar se o acumulado de precipitação na região teve um impacto positivo ou negativo no suprimento da demanda hídrica necessária em uma determinada região (GUEDES, 2016).

A evolução temporal do RAI-6 obtida para cada região homogênea é apresentada na Figura 5.11. Observa-se uma predominância de valores negativos em todas as regiões da BHSF. O ASF apresenta valores negativos mais altos no período de agosto/2000-janeiro/2001 até janeiro/julho de 2001 (Figura 5.11a). No BSF, os valores do índice tornam-se positivos a partir do período dezembro/2000/maio/2001 revelando um regime de chuvas totalmente diferente das demais regiões na bacia hidrográfica. Esse resultado é significativo do ponto de vista hidrológico para o ano de 2001 em especial. Comparando com as demais regiões da BHSF, o ASF é o que apresenta maior acumulado durante o ano, sendo o que maior contribui para manter a demanda de água em todo o curso principal do Rio. Valores negativos neste período e usando a escala de seis meses, mostram o quanto o déficit de precipitação foi intenso, fazendo com que os reservatórios mais importantes entrassem em colapso, havendo necessidade de racionamento a partir de junho de 2001.

Verifica-se um padrão de comportamento peculiar do RAI-6 quando comparado com os resultados obtidos com o RAI-1 e RAI-3. Embora com a análise para períodos curtos (RAI-1, RAI-3) seja possível identificar diferentes regimes de precipitação na BHSF, a ocorrência de períodos secos ou úmidos com maiores impactos de longo prazo só se torna mais evidente com a utilização do RAI-6. Episódios dessa natureza são indicativos claros de impactos potenciais na agricultura, geração de energia e abastecimento de água.

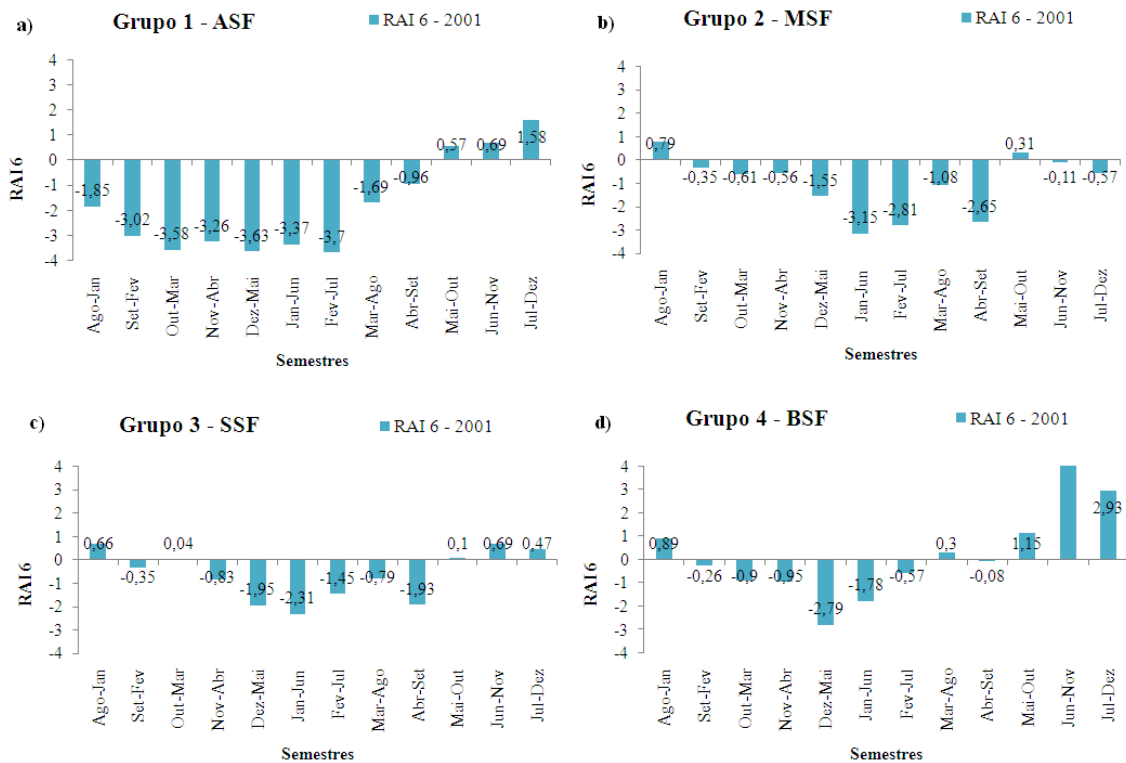


Figura 5.11: RAI-6 (seis meses) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2001.

A distribuição espacial do RAI-6 para o ano de 2001 é apresentada na Figura 5.12. Assim como é possível verificar os impactos de longo prazo utilizando as regiões homogêneas de precipitação, através da distribuição espacial, verifica-se exatamente as áreas onde esses impactos foram mais significativos do ponto de vista hidrológico. Os valores que representam as anomalias dos semestres de agosto2000/janeiro2001 até novembro2000/abril2001 (Figura 5.12a, b, c, d) indicam valores positivos do índice em parte do MSF, no SSF e BSF. Esses valores positivos, principalmente no MSF, indicam que as chuvas ocorridas ainda no ano 2000, foram acima da média. Essas chuvas ocorreram principalmente nos meses de novembro e dezembro de 2000. No ASF, em praticamente todos os períodos analisados do RAI-6, os valores são predominantes negativos, e são medidos em cada semestre seguinte, os valores mais intensos, com mínimos abaixo de -3 aparecem em áreas maiores. No semestre referente a janeiro-junho/2001 (Figura 5.12f), o RAI-6 apresenta valores negativos intensos em praticamente toda a BHSF. Esse resultado também é observado na evolução temporal apresentada na Figura 5.11.

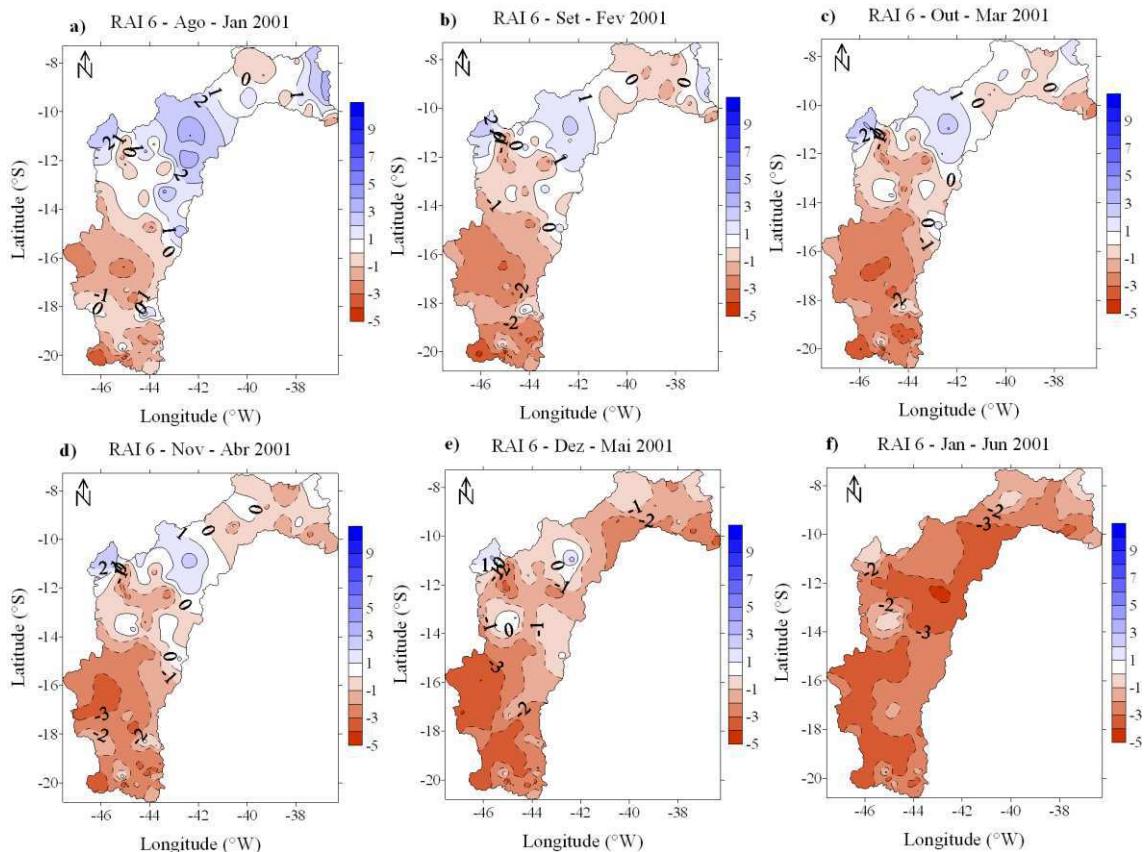


Figura 5.12: Distribuição espacial do RAI-6 (seis meses) na BHSF para os períodos de agosto de 2000/ janeiro de 2001 a janeiro de 2001/junho do ano de 2001.

A variação da cota máxima mensal da média histórica para os anos de 2000 e 2001 são apresentadas na Figura 5.13, referentes aos reservatórios de Sobradinho, situado no MSF (sua foz desagua no SSF) e Três Marias, localizado no ASF, no Estado de Minas Gerais. A sazonalidade é evidente nos dois casos com valores mais altos no período chuvoso das regiões do ASF e MSF (novembro a abril).

Ambos os reservatórios têm um comportamento parecido em relação à sazonalidade, tanto na observação de suas médias, como no aumento e diminuição de suas cotas nos dois anos analisados. O ASF, região do qual é proveniente a maior parte da vazão do Rio, tem seus meses mais chuvosos no período de novembro a fevereiro. No entanto, apenas nos meses de março, abril e maio, o reservatório de Três Marias alcança seu maior volume. Comportamento semelhante é observado no reservatório de Sobradinho.

Tanto em Sobradinho como em Três Marias, é possível identificar, que em 2000 os valores mensais das cotas já estavam abaixo da média histórica, e que foi agravado no ano de 2001 (Figura 5.13a-b). Em especial, em Sobradinho, os acumulados de chuvas referentes aos seis meses no RAI-6, terem sido acima da média, no MSF e SSF

nos períodos agosto2000/janeiro2001 até outubro2000/março2001 (Figura 5.12a, b, c), ainda não foi suficiente para aumentar de forma significativa o nível dos reservatórios. É interessante verificar também que as chuvas registradas no norte de Minas Gerais e em parte da Bahia no mês de dezembro de 2000 elevaram a cota de Sobradinho no mês de janeiro de 2001 (Figura 5.13c, d). Embora, as chuvas tenham sido reduzidas na área da represa no ano de 2001, a demanda d'água foi aumentada. Com isso, as cotas vão diminuindo no ano de 2001, chegando ao pico mínimo no mês de novembro. A diminuição ocorrida em Sobradinho, além de ter sido provocada pelo aumento da demanda d'água devido à seca registrada no ano de 2001, também é resultado da diminuição das cotas em Três Marias na mesma proporção.

A análise espacial do RAI-6 permite verificar as regiões atingidas pela seca, em que os valores negativos do índice chegam a -4, abrangendo áreas relativamente grandes em relação aos núcleos positivos extremos. Tanto os valores do RAI-3 como do RAI-6 não apresentam valores positivos extremos, quando comparados aos valores das regiões atingidas pelo déficit de precipitação.

O déficit de precipitação no ASF iniciou ainda no ano de 2000, já que os índices negativos englobam a precipitação ocorrida de agosto de 2000 a janeiro de 2001, já no primeiro período analisado. Em muitas áreas o impacto da seca pode ser prolongado, e isso vai depender também dos níveis dos reservatórios no momento em que o déficit de chuva ocorrer.

Diferente da escala de três meses, a escala de seis meses mostra um período maior com déficit de precipitação, ou seja, esse resultado indica os impactos causados, que em longo prazo, a precipitação detectada na escala trimestral não seria suficiente para identificar a manutenção do aporte hídrico dos reservatórios, por exemplo. Essa escala mostra com maior antecedência padrões em que a precipitação não seria suficiente para a demanda hídrica na Bacia no decorrer do tempo.

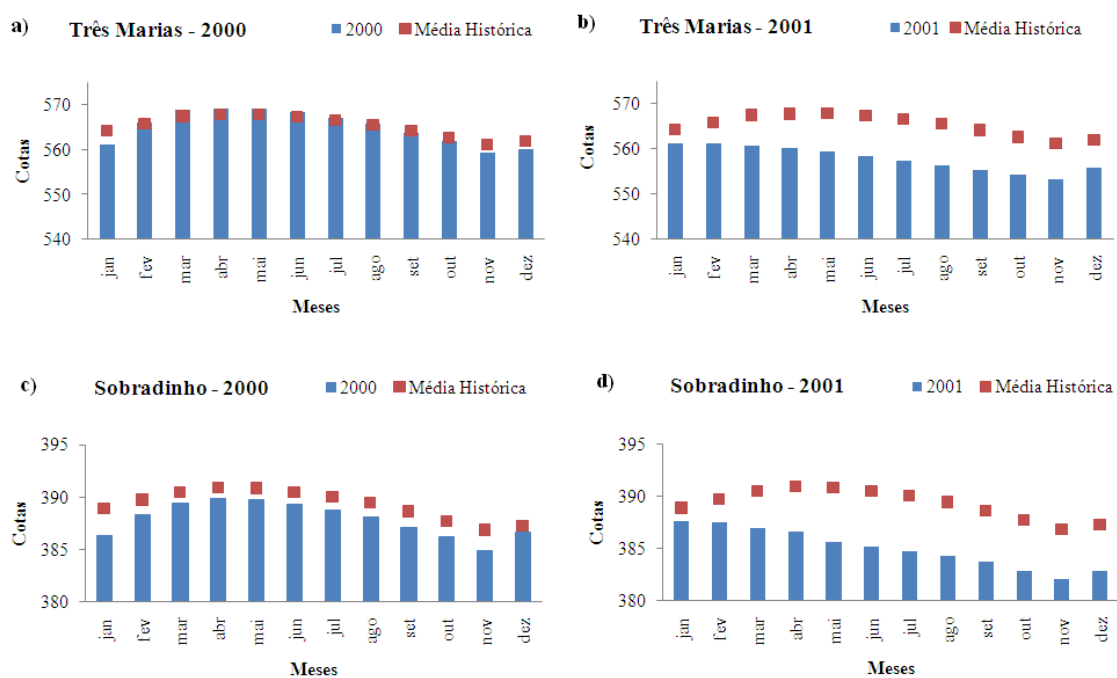


Figura 5.13: Valores das cotas máximas mensais (barras azuis) para 2000 e 2001 e média histórica das cotas máximas mensais (pontos vermelhos) para os reservatórios de Três Marias (ASF) (período de 1998 a 2015) e Sobradinho (MSF) (período de 1981 a 2015). a) Três Marias (ano 2000 e média histórica); b) Três Marias (ano 2001 e média histórica); c) Sobradinho (ano 2000 e média histórica); d) Sobradinho (ano 2001 e média histórica).

5.3.2 Análise da precipitação no ano de 2007

5.3.2.1 Análise do RAI-1 (um mês) para o ano 2007

A atmosfera no início de 2007 estava sob a influência do fenômeno El Niño. Na Tabela 4.1 são apresentados através dos valores o período de atuação do fenômeno. O biênio 2007/2008 foi caracterizado pela influência do fenômeno La Nina classificado pelo CPTEC como um episódio de forte intensidade (GURJÃO *et al.*, 2012). No entanto, no período chuvoso das regiões MSF e BSF os efeitos do fenômeno não foram percebidos já que não se encontrava em sua fase mais ativa.

A evolução temporal da precipitação média mensal para cada região homogênea da BHSF é apresentada na Figura 5.14. No ASF as chuvas se concentraram nos meses de janeiro e fevereiro com acumulados acima da média histórica da região. Nas regiões do MSF e SSF, os acumulados indicam precipitação abaixo da média histórica com exceção do mês de fevereiro para ambas as regiões. As anomalias de precipitação

(positivas e negativas) no período analisado são evidenciadas na evolução temporal e distribuição espacial do RAI-1 apresentadas nas Figuras 5.15 e 5.16.

No mês de fevereiro, as chuvas acima da média na região foram provenientes da atuação de VCAN's e a atuação da ZCIT mais ao sul da sua posição climatológica, favorecendo as chuvas na região Nordeste do Brasil. Na região Sudeste, a ZCAS associada ao VCAN's foram o principal sistema responsável pelos acumulados de precipitação acima da média.

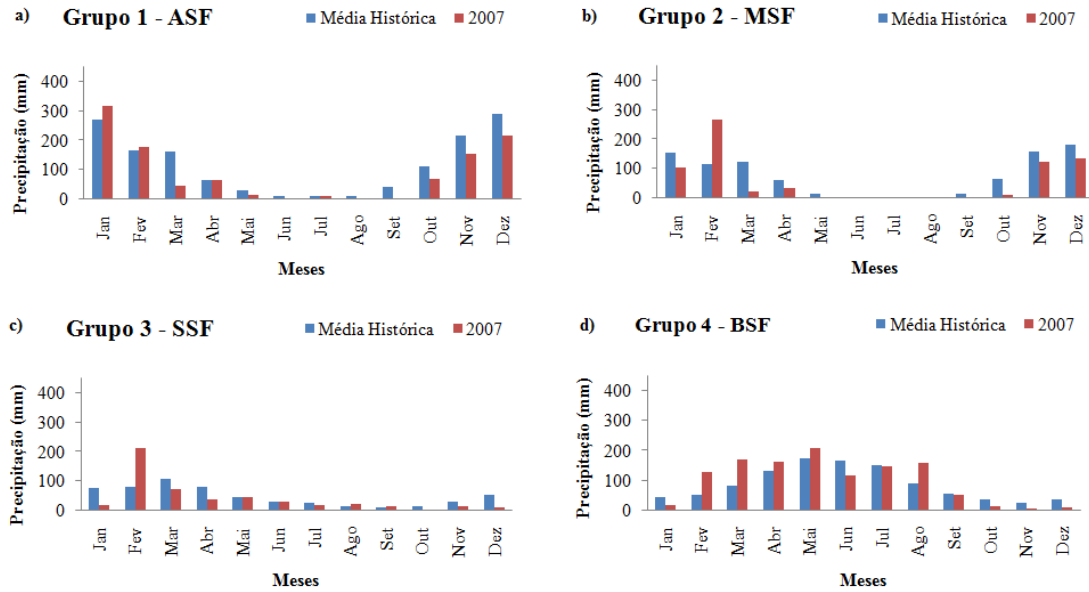


Figura 5.14: Histogramas de precipitação por Grupos, comparando a média histórica (em azul) de 1961 a 2014 com a média da precipitação observada (em vermelho) no ano de 2007.

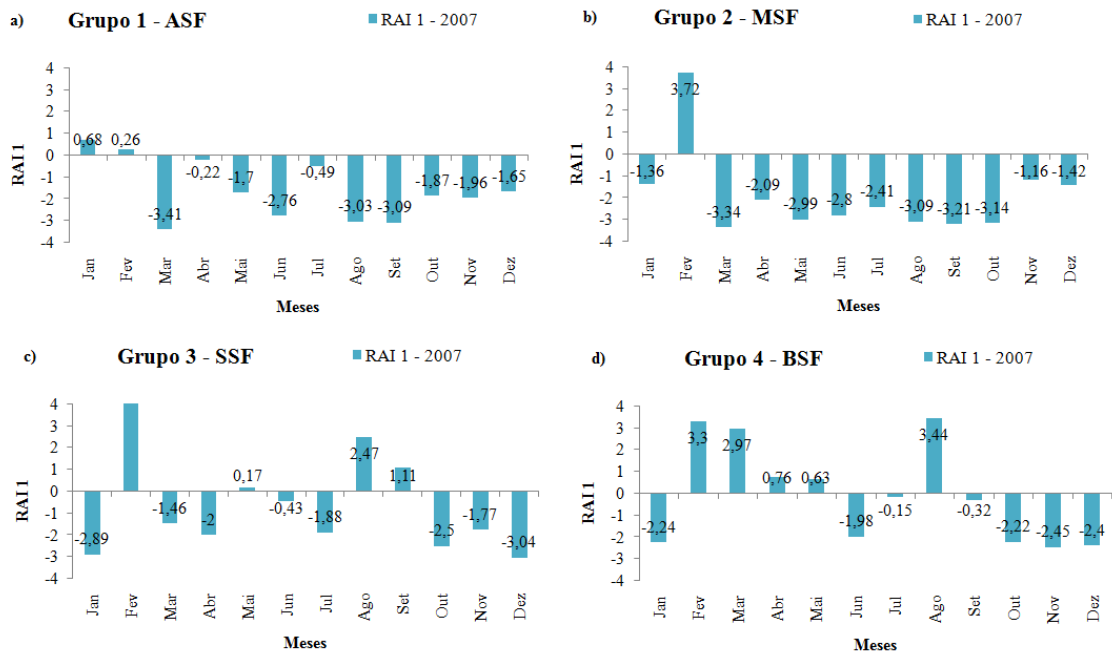


Figura 5.15: RAI-1 (um mês) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2007.

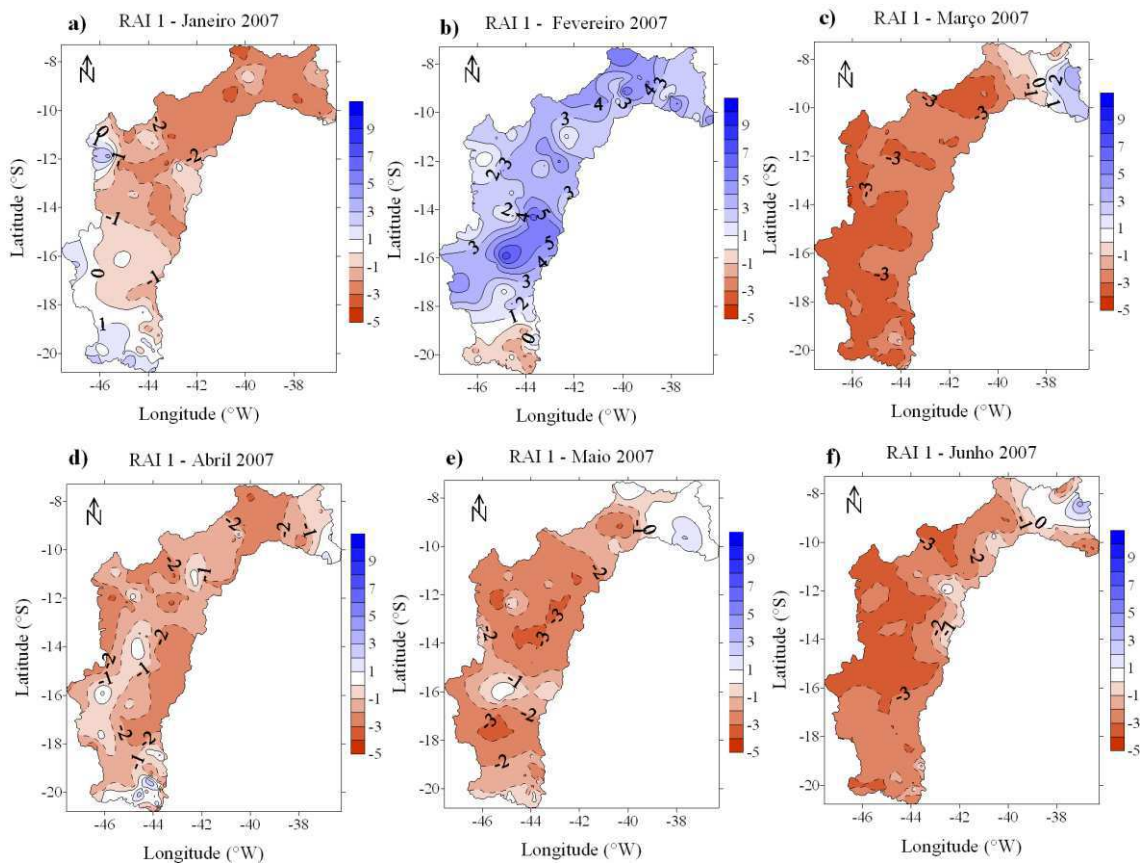


Figura 5.16: Distribuição espacial do RAI-1 (um mês) na BHSF para os meses de janeiro a junho do ano de 2007.

As imagens do Satélite GOES 8 com valores da de temperatura de brilho no mês de fevereiro, apresentadas na Figura 5.17, ilustram a alta atividade convectiva no período. Nos campos de linhas de corrente, para os níveis de 850hPa e 200hPa (Figura 5.18). Verifica-se nos baixos níveis o posicionamento mais ao Sul da ASAS (Alta Subtropical do Atlântico Sul). Esse posicionamento favorece o deslocamento da ZCIT mais ao sul da sua posição climatológica durante o mês de fevereiro. Em 200hPa, a média das linhas de corrente evidenciam um Cavado em Altos Níveis, com eixo centrado no Oceano Atlântico, na costa do Nordeste do Brasil, posicionamento esse que favorece o desenvolvimento de atividade convectiva no interior do Nordeste neste mês.

Nos meses de março e abril, a atuação de VCAN's e Cavados de Altos Níveis atuaram de maneira geral inibindo a precipitação no interior do Nordeste e em parte do Sudeste do país. Nos meses de maio e junho, no setor leste do Nordeste, a atuação de DOL's favoreceu o aumento da precipitação (CLIMANÁLISE, 2007). Valores positivos do RAI-1 são observados no BSF e na parte leste do SSF (Figuras 5.16e e 5.16f).

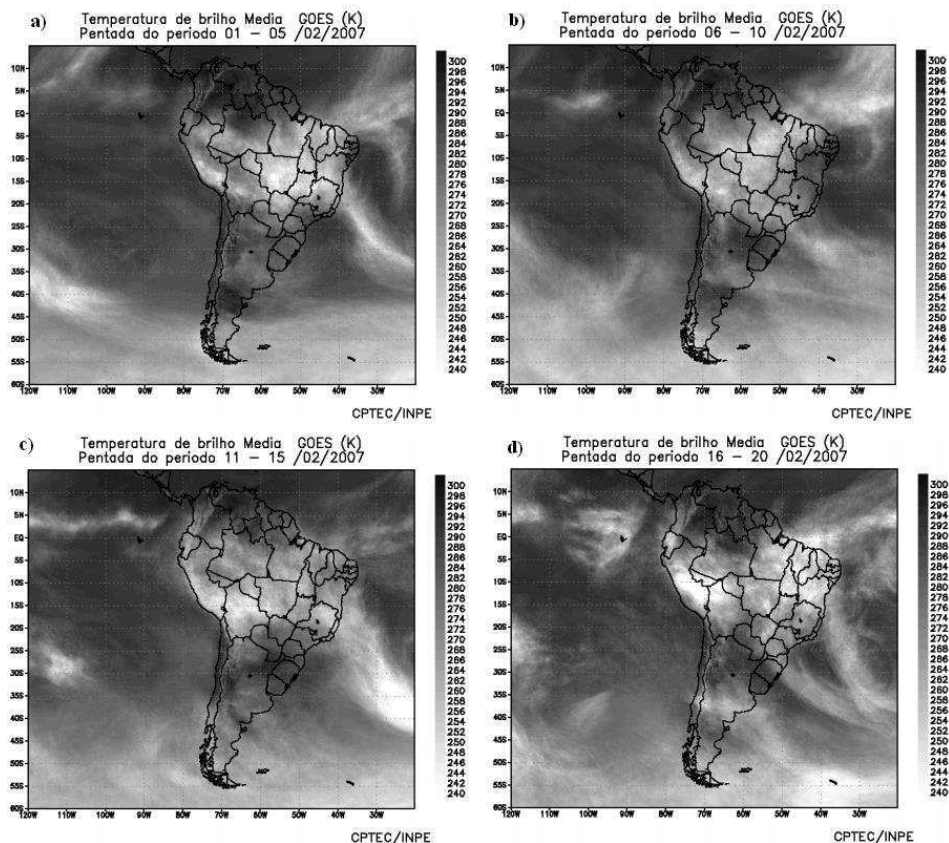


Figura 5.17: Pêntadas de temperatura de brilho média (K) para o mês de fevereiro/2007, Satélite GOES 8. (Fonte: CPTEC/INPE)

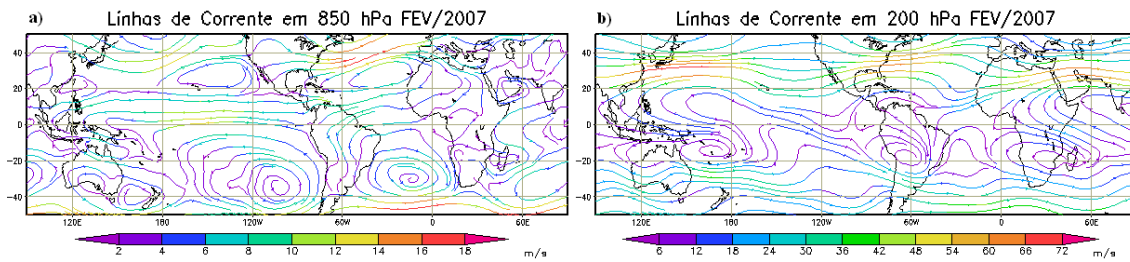


Figura 5.18: Linhas de corrente referentes ao mês de fevereiro: a) 850 hPa; b) 200 hPa. Fonte: CPTEC/INPE.

5.3.2.2 Análise do RAI-3 (três meses) para o ano 2007.

A evolução temporal do RAI-3, é apresentada na Figura 5.19 referentes ao período de novembro2006/janeiro2007 até outubro/dezembro2007. Observam-se valores positivos do índice nos trimestres novembro2006/janeiro2007 e dezembro2006/fevereiro2007 no ASF. No ASF e MSF os valores, a partir do trimestre janeiro/março2007 são predominantemente negativos. O SSF apresenta valores positivos nos trimestres dezembro2006/fevereiro2007 a fevereiro/abril2007. O BSF apresenta valores positivos nos trimestres denovembro2006/fevereiro2007 a março/maio2007 (Figura 5.19d), junho/agosto2007 e agosto/outubro2007. De maneira geral, as regiões responsáveis por levar uma demanda maior de água aos reservatórios ao longo do Rio, que são o ASF e o MSF, apresentaram valores negativos do RAI-3.

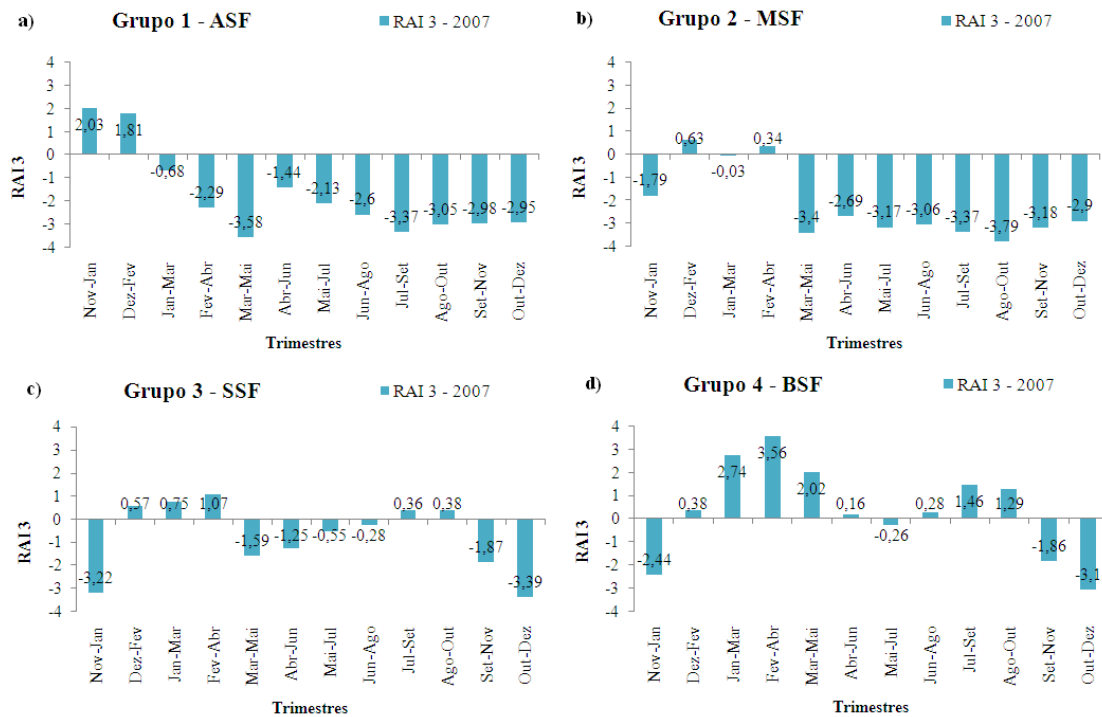


Figura 5.19: RAI-3 (três meses) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2007.

A distribuição espacial do RAI-3 para o ano de 2007 é apresentada na Figura 5.20. Comparando os valores médios do RAI-3 das regiões pluviometricamente homogêneas na Figura 5.19 com a distribuição espacial na Figura 5.20, verifica-se que o acumulado referente aos trimestres de novembro2006/janeiro2007 e dezembro2006/fevereiro2007 (Figura 5.20 a, b), apresentam anomalias positivas principalmente no ASF, indicando que o acumulado foi acima da média nessa região. A partir do trimestre de janeiro/março2007, apesar de alguns núcleos positivos, os valores negativos são predominantes em maior parte da BHSF (Figura 5.20c, d, e, f).

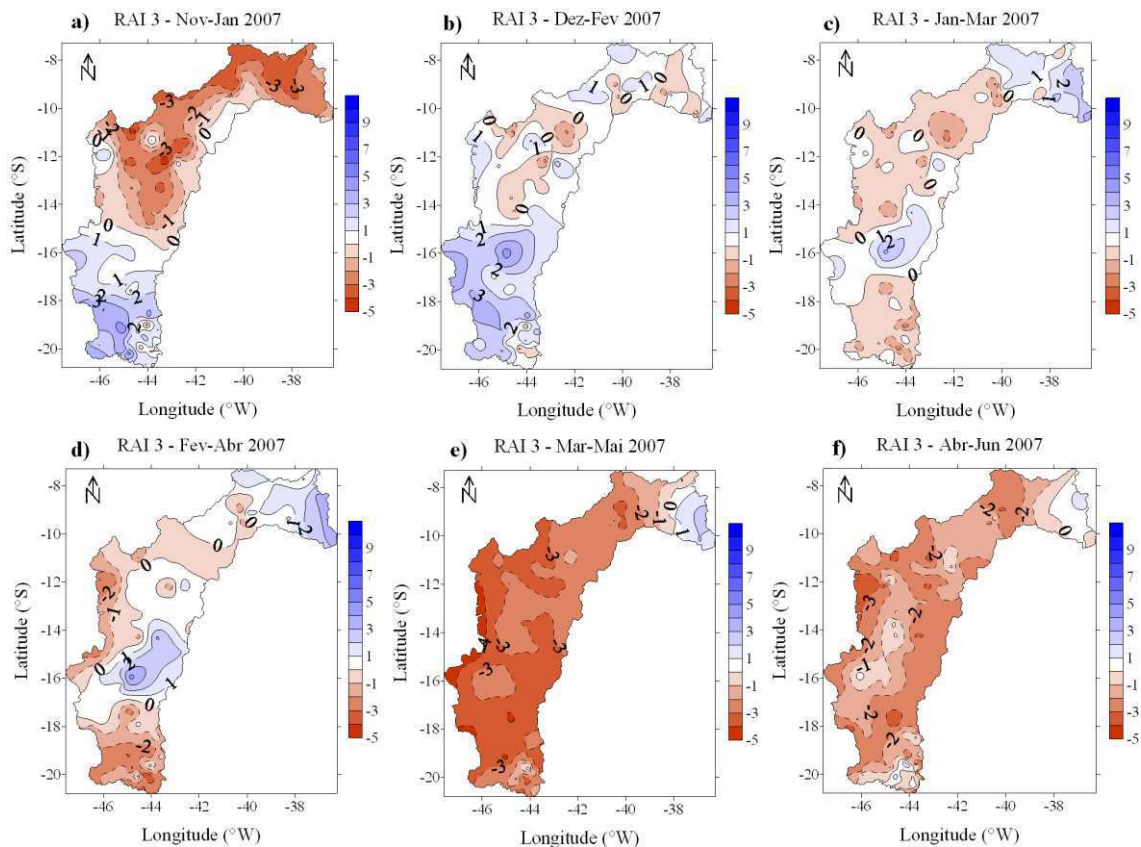


Figura 5.20: Distribuição espacial do RAI-3 (três meses) na BHSF para os períodos de novembro de 2006/ janeiro de 2007 a abril/junho de 2007.

Os acumulados evidenciados nos primeiros trimestres do ano de 2007, principalmente no ASF, estão associados às chuvas ocorridas no Sudeste do país nos meses de novembro a dezembro de 2006. As chuvas registradas em novembro estiveram associadas à atuação de SF juntamente com a ZCAS. Na região Nordeste além dos efeitos negativos pela atuação do El Niño, a influência da subsidência no centro dos VCAN's, no mês de dezembro, contribuiu para reduzir a atividade convectiva e consequentemente o desenvolvimento das nuvens.

No entanto, na região Sudeste, a atuação de VCAN's associados à ZCAS, favoreceu o surgimento de áreas de instabilidade e consequentemente, a ocorrência chuvas acima da média nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro. Na Figura 5.21, os campos de linha de corrente média nos meses de novembro e dezembro do ano de 2006, verifica-se no mês de novembro (Figura 5.21b) uma configuração da Alta da Bolívia bem definida, juntamente com um Cavado. O mesmo é observado no mês de dezembro, porém, com um leve deslocamento da Alta Subtropical do Atlântico Sul um pouco mais ao norte.

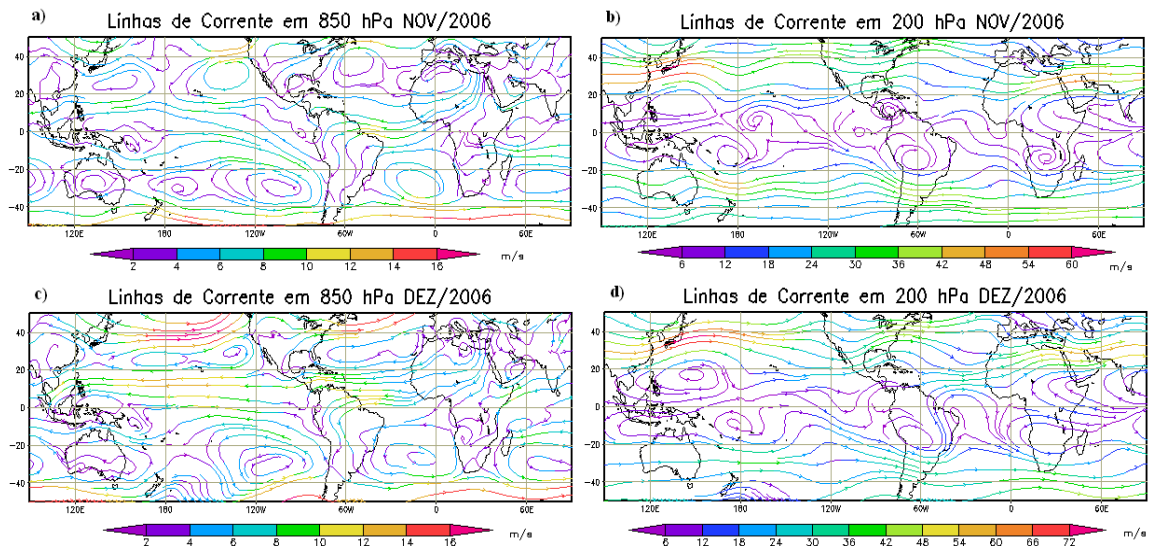


Figura 5.21: Linhas de corrente referentes aos meses de novembro a) 850 hPa; b) 200 hPa; e dezembro a) 850 hPa; b) 200 hPa de 2006. Fonte: CPTEC/INPE.

5.3.2.3 Análise do RAI-6 (seis meses) para o ano 2007

A evolução temporal do RAI-6 para o ano de 2007 nas diferentes regiões da BHSF, são apresentadas na Figura 5.22. No ASF (Figura 5.22a), os valores são positivos e acima de 2 nos semestres agosto2006/janeiro2007 e setembro2006/fevereiro2007. Nos três semestres seguintes os valores positivos caracterizam a persistência de chuvas acima da média, no entanto, mais fracas ($\text{RAI-6} < 1$). Nos semestres seguintes, na mesma região da Bacia, verifica-se que os valores negativos foram atingidos até o semestre julho/dezembro2007, que engloba o período seco da região.

Os valores, -0,92 (janeiro/junho) e de -2,6 (fevereiro/julho) do RAI-6 (Figura 5.22a) representam déficits significativos de precipitação no período úmido no ASF. Esse resultado indica uma alta probabilidade de armazenamentos de água insuficientes nos principais reservatórios da bacia hidrográfica (Três Marias e Sobradinho). Essa influência é claramente observada na evolução temporal das cotas máximas de Sobradinho apresentada na Figura 5.24d. Nos meses de novembro e dezembro de 2007 as cotas ficaram abaixo da média histórica.

No MSF, apenas os valores de anomalias de precipitação de seis meses referentes aos períodos setembro2006/fevereiro2007 e outubro2006/março2007 são positivos. De acordo com a ANA, no mês de março de 2007, o reservatório de Sobradinho atingiu 100% da sua capacidade de armazenamento, garantindo o

funcionamento de forma adequada das diversas atividades econômicas na região, como agricultura e irrigação (GURJÃO *et al.*, 2012). Esse resultado mostra que o RAI-6 conseguiu identificar o período em que o acumulado foi acima da média, tendo uma resposta nos valores das cotas de Sobradinho. Todos os demais semestres apresentam valores negativos nessa região da Bacia. O SSF apresenta valores negativos do RAI-6 em praticamente todo o ano (Figura 5.22c). Apenas o BSF apresenta valores positivos na maior parte do ano do RAI-6 (Figura 5.22d).

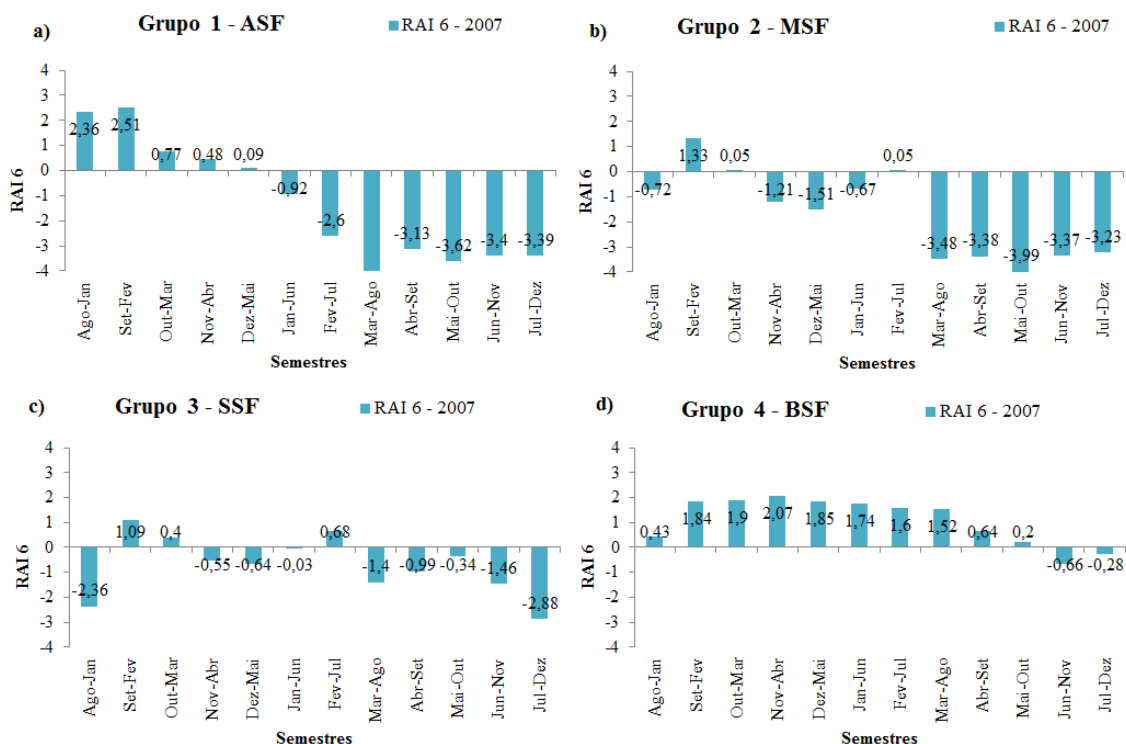


Figura 5.22: RAI-6 (seis meses) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2007.

A distribuição espacial do RAI-6, referentes aos acumulados de precipitação nos semestres de agosto2006/janeiro2007 a janeiro/junho2007 é apresentada na Figura 5.23. Verifica-se valores positivos em praticamente todo o ASF nos períodos de agosto2006/janeiro2007 a dezembro2006/maio2007. A partir do semestre referente a janeiro/junho2007 (Figura 5.23f), os valores são negativos em maior parte da Bacia, exceto no BSF e parte do MSF. Esse resultado é observado também por grupos, na Figura 5.22. Valores positivos do RAI-6 nos semestres setembro2006/fevereiro2007 e outubro2006/março2007 no MSF e SSF abrangem áreas significativas, quando comparados com os outros períodos, indicando o aumentando a disponibilidade de água necessária para a irrigação e outras atividades nessas regiões. O BSF apresentou valores

negativos em maior parte de sua área no período referente à agosto2006/janeiro2007. Nos demais períodos prevalecem anomalias positivas do RAI-6.

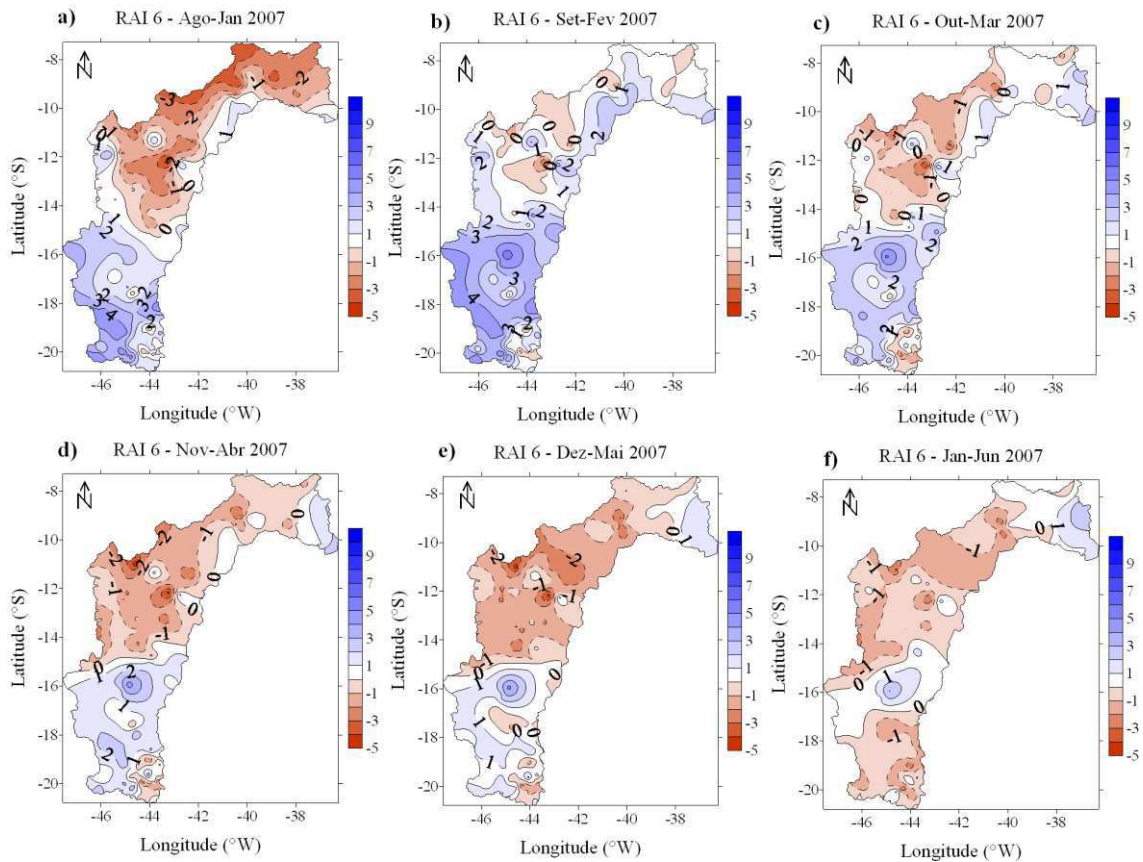


Figura 5.23: Distribuição espacial do RAI-6 (seis meses) na BHSF para os períodos agosto2006/janeiro2007 até janeiro/junho2007.

Analisando esses resultados, com os dados das cotas nos anos de 2006 e 2007 nos reservatórios de Três Marias e Sobradinho (Figura 5.24), verifica-se que em Três Marias, tanto no ano de 2006 quanto no ano 2007, os valores das cotas foram acima da média em praticamente todos os meses analisados. Porém, em Sobradinho no ano de 2006 o lago estava com seus valores significativamente altos, e esse comportamento permanece até o mês de julho de 2007. A partir de agosto, verifica-se uma queda acentuada nos valores das cotas do Lago de Sobradinho. Tal comportamento indica um aumento da demanda d'água como também diminuição do volume de água recebida no reservatório provenientes tanto da chuva, quanto a montante do reservatório. A diminuição das chuvas é verificada nos valores do RAI-6 negativos no ASF, MSF e SSF a partir do semestre fevereiro/julho2007 (Figura 5.22). Com a diminuição das chuvas também no ASF, para não comprometer o uso da água em Três Marias, principalmente para geração de energia, essa água foi retida no reservatório (GURJÃO *et al.*, 2012). Novamente, assim como no ano de 2001, o RAI-6 mostrou eficiência no monitoramento

dos recursos hídricos, a partir de valores de precipitação, em comparação com o volume dos reservatórios.

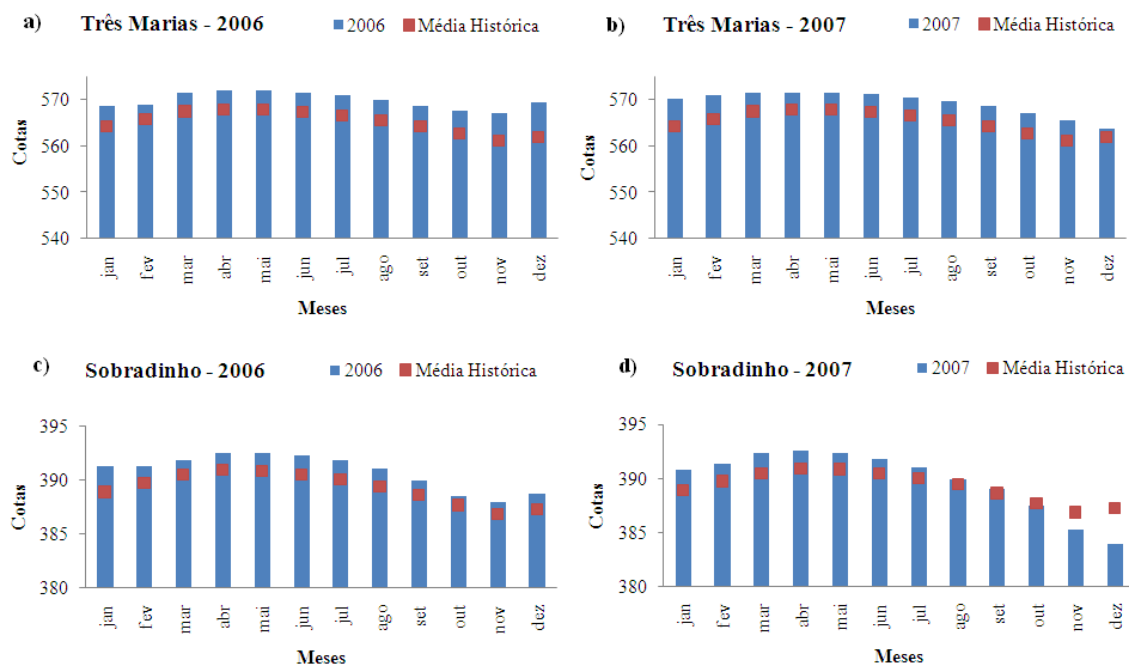


Figura 5.24: Valores das cotas máximas mensais (barras azuis) e média histórica das cotas máximas mensais (pontos vermelhos) para os reservatórios de Três Marias (período de 1998 a 2015) e Sobradinho (período de 1981 a 2015), nos anos de 2006 e 2007. a) Três Marias (ano 2006 e média histórica); b) Três Marias (ano 2007 e média histórica); c) Sobradinho (ano 2006 e média histórica); d) Sobradinho (ano 2007 e média histórica).

5.3.3 Análise da Precipitação para o ano 2008

5.3.3.1 Análise do RAI-1 (um mês) para o ano 2008

O ano de 2008 dá continuidade ao fenômeno La Niña de intensidade forte e perdurou até o meio do ano (Tabela 4.1). Em anos sob a influência desse fenômeno, há um favorecimento de chuvas acima da média na região Nordeste do Brasil. O contrário ocorre nas regiões Sul e Sudeste do país. Os histogramas de precipitação, que mostram em média o comportamento das chuvas para o ano de 2008 nas diferentes regiões da BHSF, são apresentados na Figura 5.25. Verifica-se chuvas abaixo da média nos meses de janeiro no MSF e SSF, período chuvoso de ambas as regiões. As chuvas acima da média ocorreram apenas no ASF. Nos meses de fevereiro, março e abril, as chuvas foram acima da média em praticamente todas as regiões da bacia hidrográfica, período em que estava sob influência da fase ativa do La Niña. Nos meses de maio a agosto, as

chuvas acima da média ocorreram no BSF, período chuvoso da região. No ASF, as chuvas ficaram dentro da média esperada no mês de novembro e acima da média no mês de dezembro, e de forma semelhante no MSF. No SSF e BSF, as chuvas foram abaixo da média nos meses seguintes. (Figura 5.25). Os valores do RAI-1 por grupo homogêneo de precipitação da BHSF ilustrados na Figura 5.26, que retratam o comportamento das chuvas apresentadas na Figura 5.25.

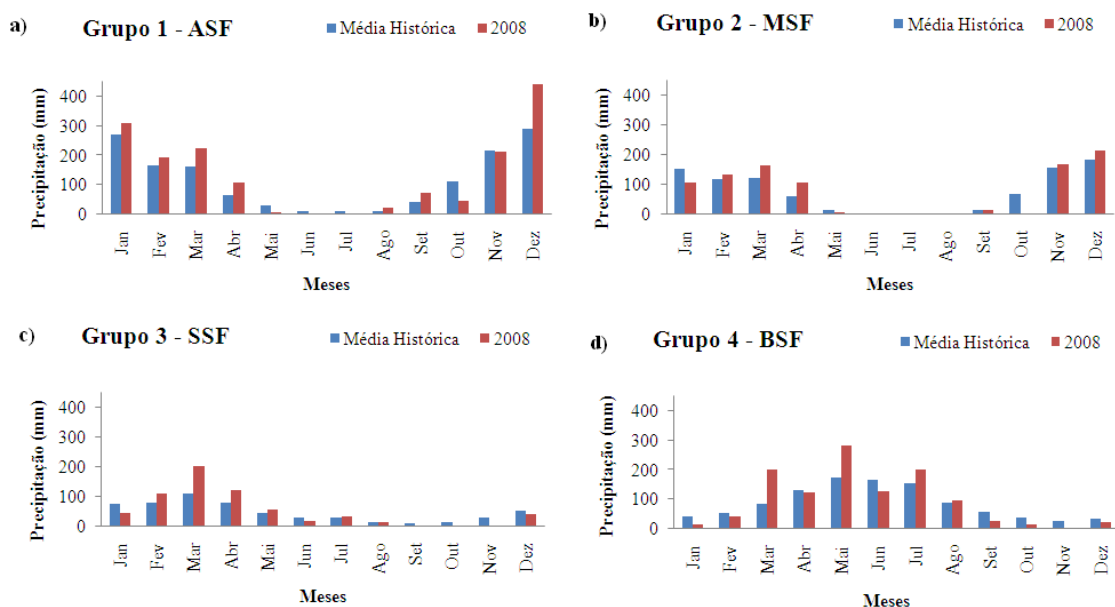


Figura 5.25: Histogramas de precipitação por Grupos, comparando a média histórica (em azul) de 1961 a 2014 com a média da precipitação observada (em vermelho) no ano de 2008.

A distribuição espacial do RAI-1 para os meses de janeiro a junho de 2008 é apresentada na Figura 5.27. Anomalias negativas aparecem nos meses de janeiro e fevereiro, principalmente no MSF, SSB e BSF. O mês de janeiro foi o mês em que os valores negativos predominaram em toda a região Semiárida da Bacia e as chuvas acima da média ocorreram apenas no ASF. Esse resultado é semelhante ao encontrado por GURJÃO *et al.*, (2012). Os autores utilizaram dados de precipitação da região Nordeste provenientes de estações do INMET, e mostraram através da distribuição espacial do RAI-1 que nesses meses os valores negativos foram predominantes. Sob a atuação do La Niña, o comportamento da precipitação nesse período estaria teoricamente em descordo com os estudos feitos anteriormente. Tanto a distribuição espacial como os valores do índice (Figuras 5.26 e 5.27), apresentando o comportamento médio para as regiões pluviometricamente homogêneas mostram que as chuvas foram abaixo da média no início do ano.

No entanto, valores positivos do índice predominam em toda a Bacia nos meses de março e abril de 2008 (Figura 5.26 c, d). No mês de maio, os valores positivos são apenas no BSF e no mês de junho, os valores negativos intensos predominam em toda a região da BHSF.

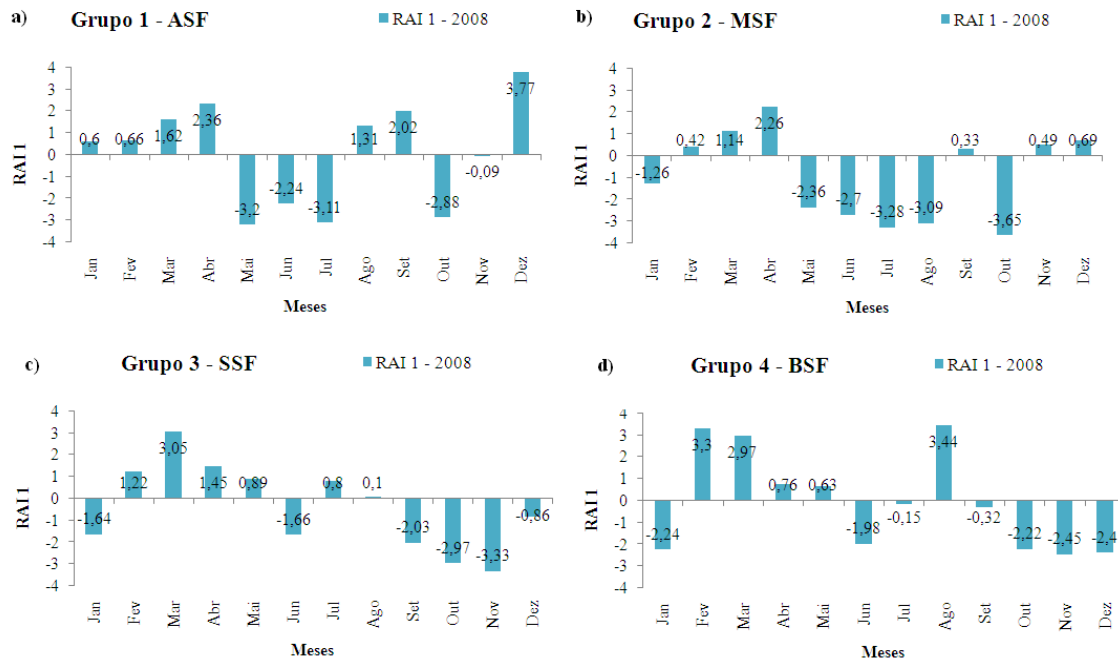


Figura 5.26: RAI-1 (um mês) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2008.

No mês de janeiro, apesar da atuação do La Niña, as chuvas foram abaixo da média na região Nordeste, devido à atuação de VCAN's, com o seu centro no interior do Nordeste. Na região Sudeste, áreas de instabilidade formadas devido à ocorrência de dois episódios de ZCAS, como também a entrada de um SF, favoreceu as chuvas acima da média na região. A Figura 31 mostra a intensa atividade convectiva relacionada aos episódios de ZCAS e SF durante o mês de janeiro na região Sudeste, como também verifica-se a ausência de nuvens convectivas sobre a região Nordeste. A atuação dos VCAN's foi determinante na inibição da precipitação sobre a região Nordeste.

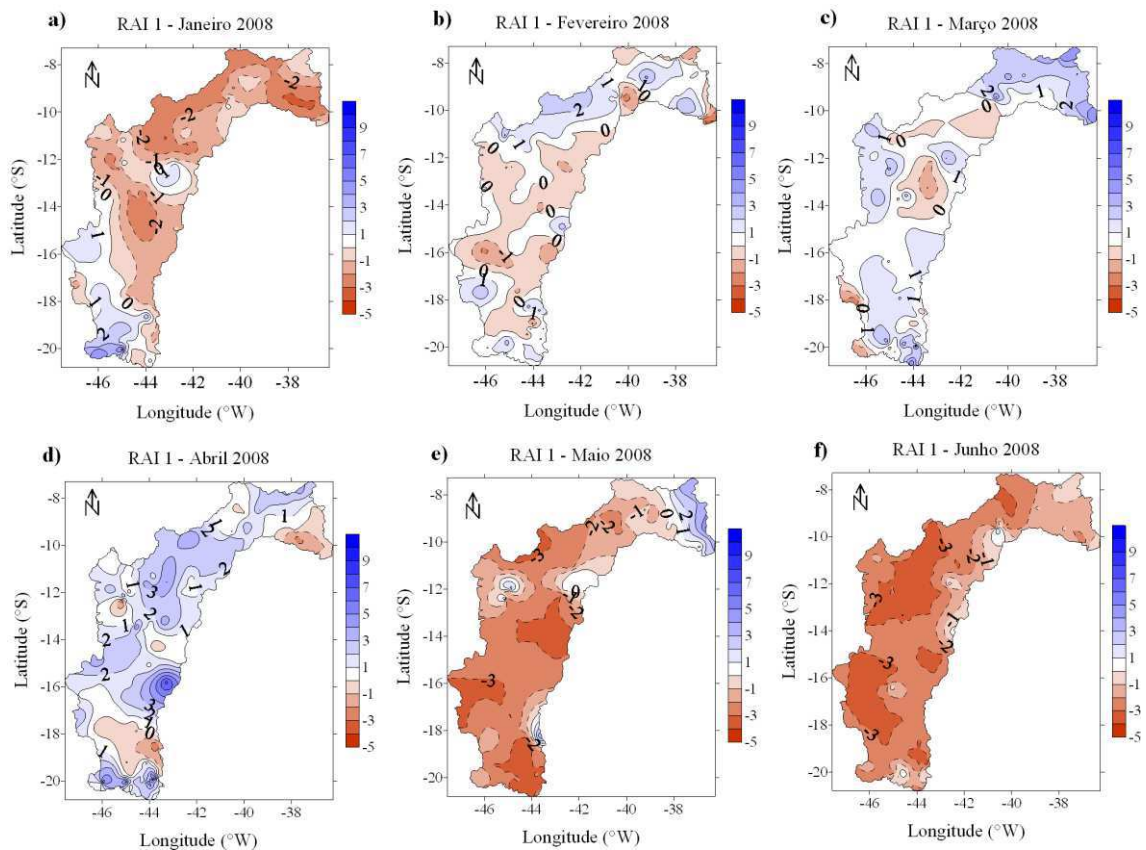


Figura 5.27: Distribuição espacial do RAI-1 (um mês) na BHSF para os meses de janeiro a junho do ano de 2008.

No mês de março, a atuação da ZCIT associada aos VCAN's favoreceu as chuvas cima da média nas regiões Sudeste e interior do Nordeste. No período analisado, destaca-se o mês de abril, com valores positivos intensos em praticamente toda a Bacia. Mais uma vez a atuação de VCAN's, Cavados de Altos Níveis (CAN) e SF, favoreceram a ocorrência de precipitação nas regiões Sudeste e no interior do Nordeste. A configuração média das linhas de corrente para o mês de abril, nos níveis de 850 e 200 hPa (Figura 5.29), verifica-se em baixos níveis a ASAS mais ao sul, favorecendo a atuação da ZCIT, e em altos níveis, a Alta da Bolívia associada ao Cavado, que também favoreceu o desenvolvimento dos sistemas convectivos no interior do Nordeste.

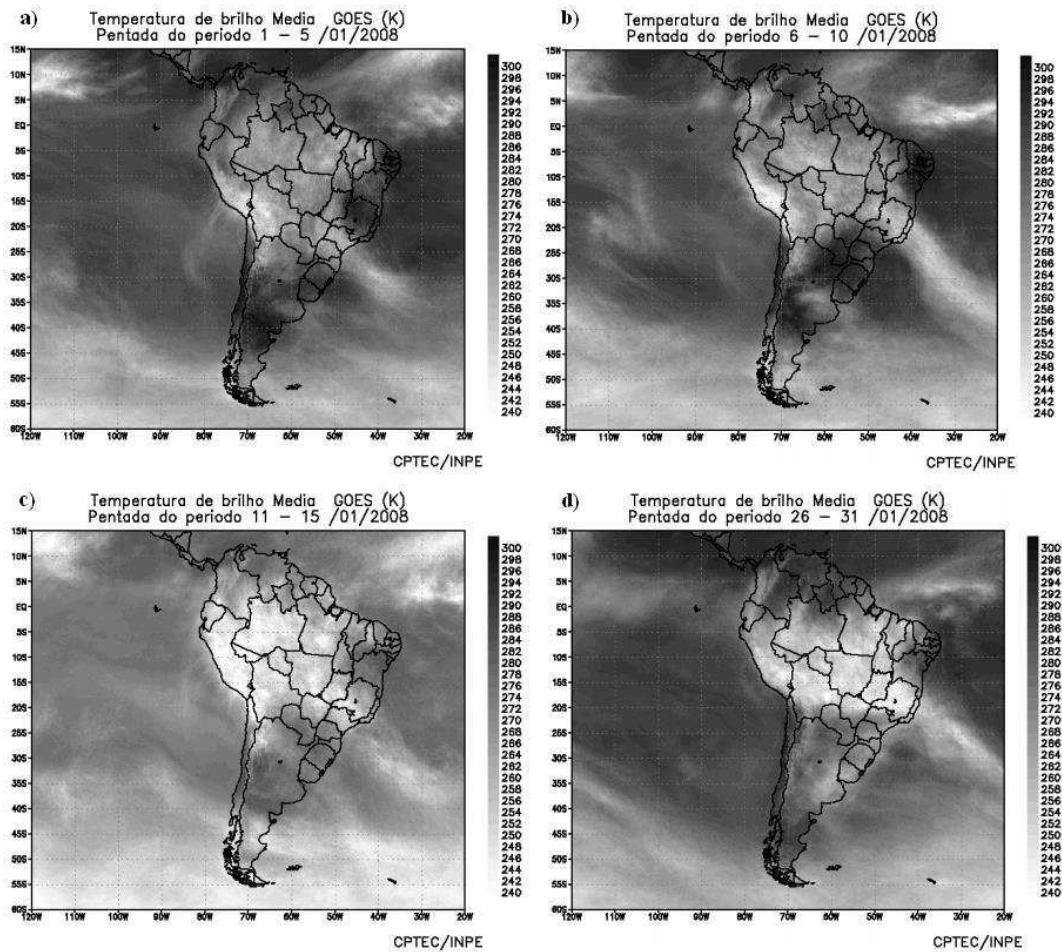


Figura 5.28: Pêntadas de temperatura de brilho média (K) para o mês de Janeiro/2008, Satélite GOES 8. (Fonte: CPTEC/INPE).

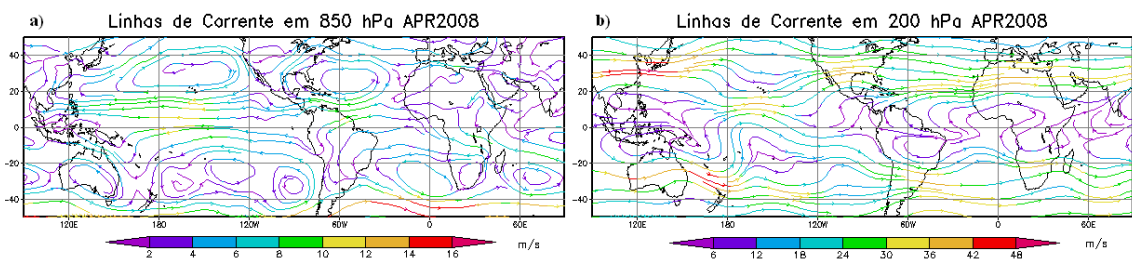


Figura 5.29: Linhas de corrente referentes ao mês de fevereiro: a) 850 hPa; b) 200 hPa. Fonte: CPTEC/INPE.

Os valores positivos do índice no BSF no mês de maio ocorreram devido à formação de alguns episódios de DOL's, contribuindo para chuvas no litoral Nordeste. De acordo com dados do CPTEC, houve registro de acumulados de precipitação significativos na cidade de Barreiros – PE no dia 27. Já em Minas Gerais, os totais mensais foram abaixo da média histórica para o Estado. No mês de junho, as chuvas foram abaixo da média tanto no Sudeste, pela atuação fraca dos SF, quanto no

Nordeste, mesmo em se tratando do período chuvoso no leste da Região (CLIMANÁLISE, 2008).

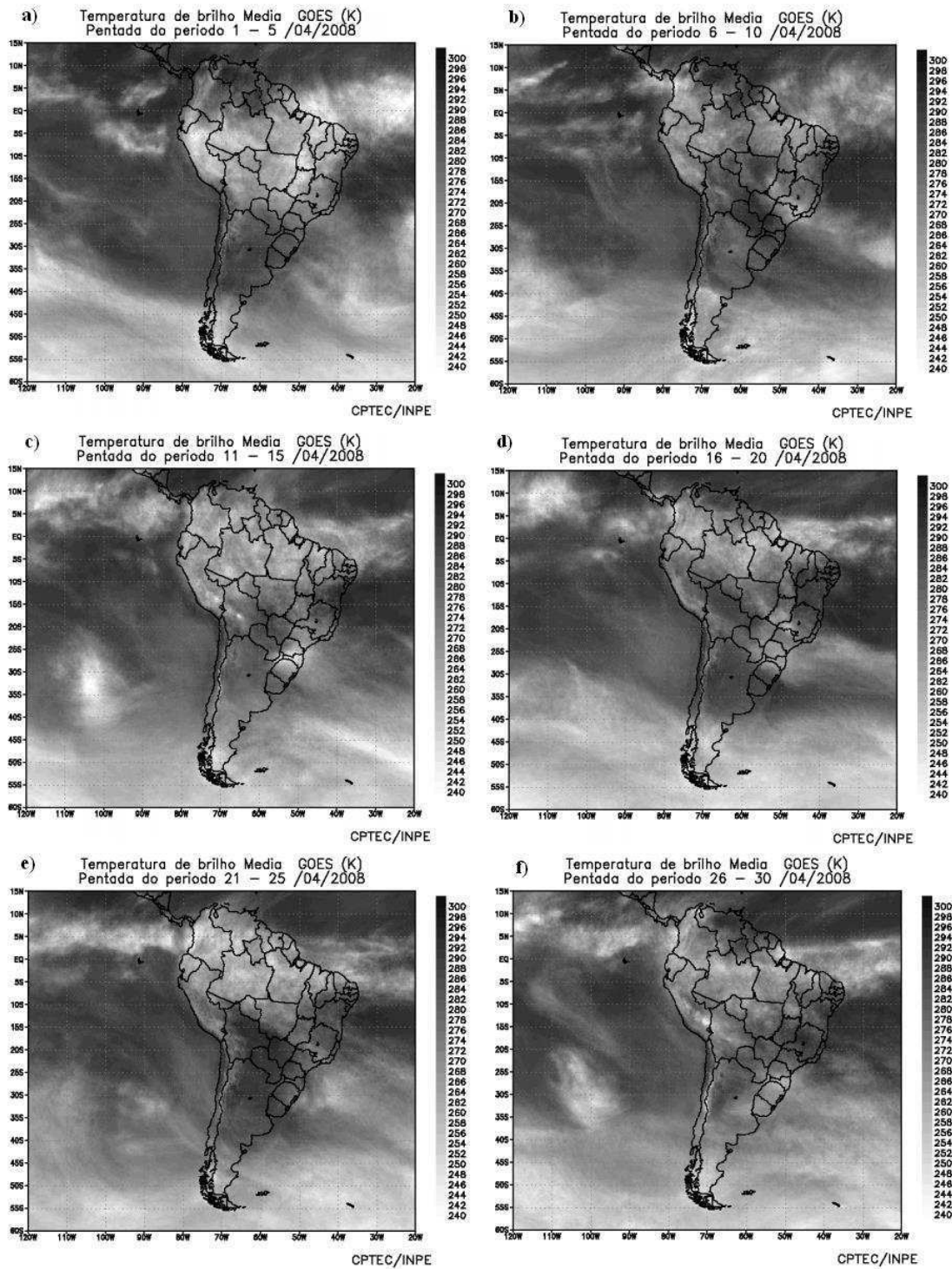


Figura 5.30: Pêntadas de temperatura de brilho média (K) para o mês de Abril/2008, Satélite GOES 8. (Fonte: CPTEC/INPE).

5.3.3.2 Análise do RAI-3(três meses) para o ano 2008

A Figura 5.31 apresenta os valores do RAI-3 no ano de 2008 para cada região pluviometricamente homogênea da BHSF e a Figura 5.32, a distribuição espacial do RAI-3 para os seis primeiros trimestres do ano de 2008. Os períodos novembro2007/janeiro2008 e dezembro2007/fevereiro2008 apresentaram anomalias negativas em todas as regiões (Figura 5.31). O período de janeiro/março2008 a abril/junho2008, as anomalias apresentam valores positivos em todas as regiões da Bacia. Esse comportamento a partir do período referente aos meses de janeiro/março2008 reflete o acumulado de chuvas acima da média nesse período, como foi observado na distribuição espacial do RAI-1 para o ano de 2008. O mesmo é observado para os trimestres seguintes.

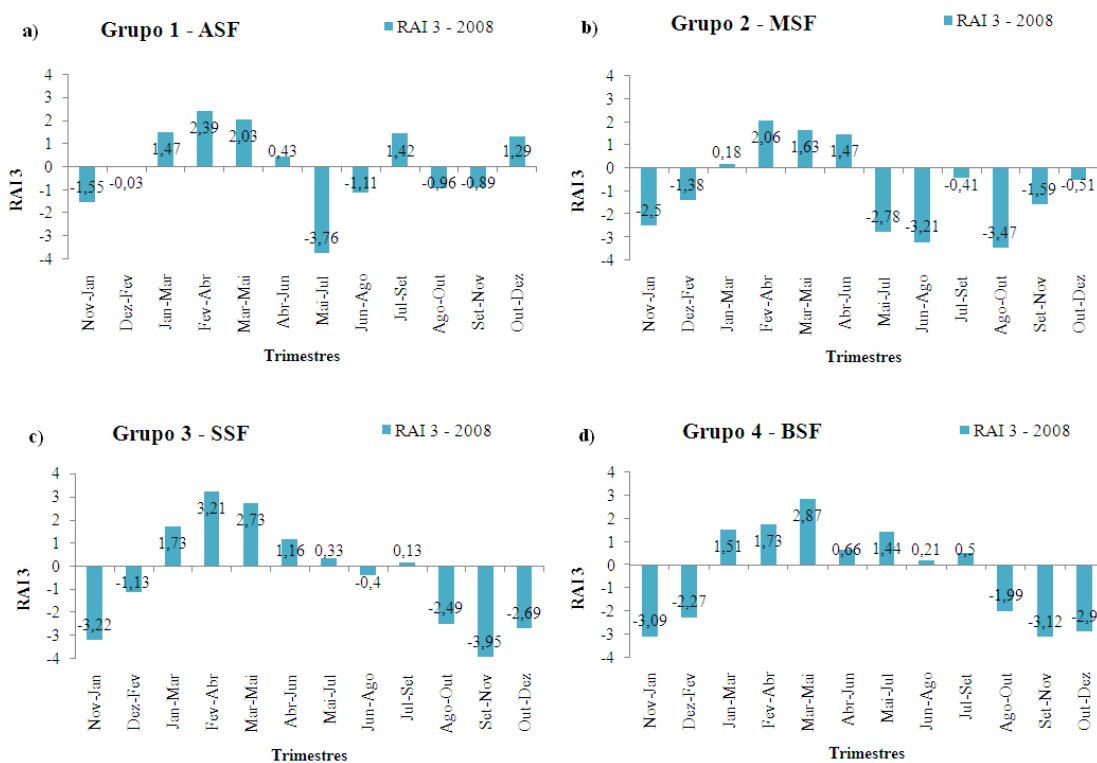


Figura 5.31: RAI-3 (três meses) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2008.

Na distribuição espacial do RAI-3 para os seis primeiros trimestres no ano de 2008 (Figura 5.32), verifica-se a predominância das anomalias negativas em toda a Bacia nos trimestres referentes aos períodos de novembro2007/janeiro2008 e dezembro2007/fevereiro2008, corroborando com os resultados encontrados na média das anomalias por Região (Figura 5.31). As anomalias dos trimestres seguintes mostram

que os acumulados de chuva foram acima da média em todas as regiões da Bacia, exceto no ASF no período abril/junho2008.

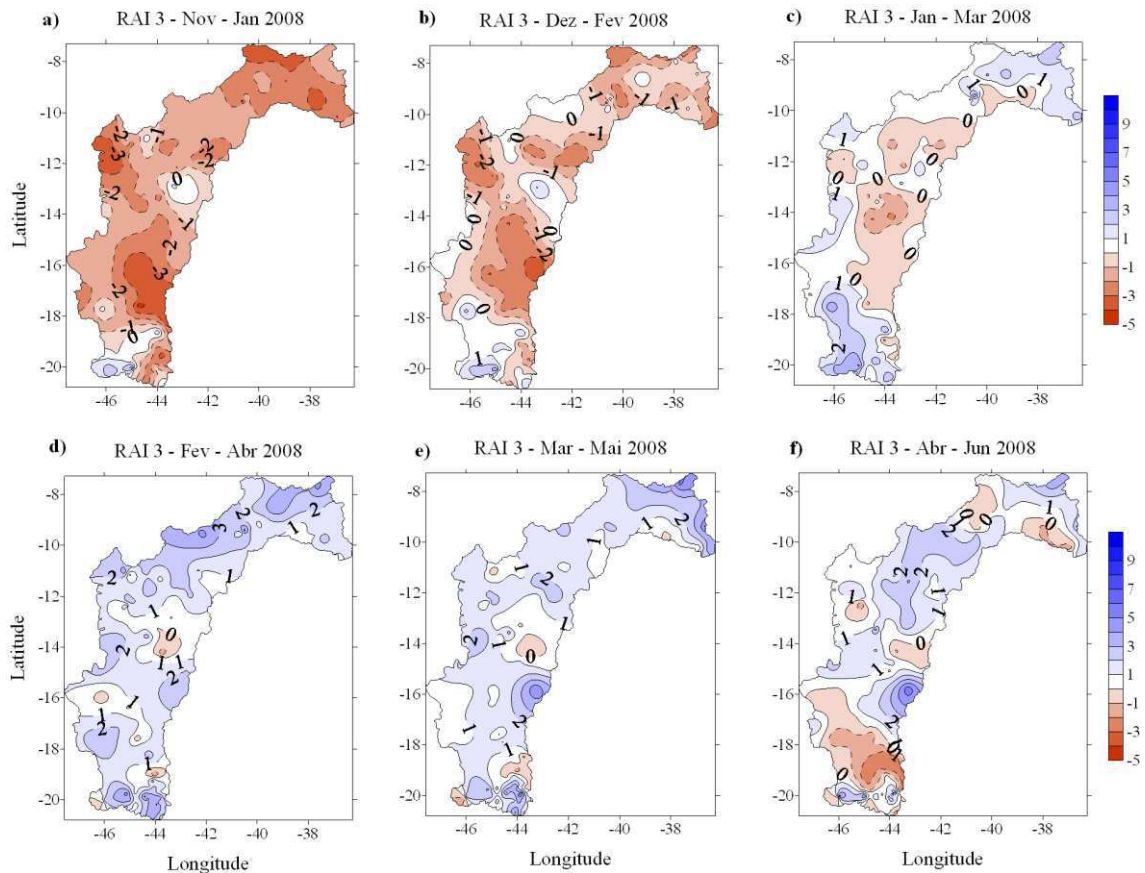


Figura 5.32: Distribuição espacial do RAI-3 (três meses) na BHSF para os trimestres referentes aos meses de novembro2007/janeiro2008 a abril/junho2008.

Os sistemas atmosféricos que atuaram principalmente nos meses de março e abril de 2008, favoreceram também valores positivos do RAI-3 dos períodos de janeiro/março2008 a abril/junho2008.

5.3.3.3 Análise do RAI-6 (seis meses) para o ano 2008

A evolução temporal do RAI-6 para o ano de 2008, nas regiões do ASF, MSF, SSF e BSF é apresentada na Figura 5.33. O biênio 2007/2008 foi considerado significativo, em função dos impactos nos recursos hídricos na BHSF. Apesar de no ano de 2007 o Lago de Sobradinho ter alcançado o nível de 100% no mês de março, em 2008 esse volume não chegou a 75% (GURJÃO *et al.*, 2012). A construção da represa tinha inicialmente o objetivo de mantê-la em pleno funcionamento após sua capacidade máxima alcançada, por dois anos consecutivos, sem que houvesse a necessidade de maior controle.

Através da análise do RAI-1 (Figuras 5.26, 5.27), o comportamento da precipitação nos meses de janeiro e fevereiro foi bastante irregular devido à ocorrência de VCAN's e seu posicionamento. Nos meses seguintes, verificou-se um aumento na precipitação ao longo da Bacia. Os valores do RAI-6 (Figura 5.33) mostram que os primeiros semestres em todas as regiões, referentes à agosto2007/janeiro2008 a outubro2007/março2008, apresentam anomalias negativas, exceto no BSF. Os períodos de novembro2007/abril2008 a abril/setembro2008 apresentam anomalias positivas, porém, a maioria dos meses referentes a esses períodos são secos, e os acumulados de chuvas não são significativos nas regiões do ASF, MSF e SSF.

A distribuição espacial do RAI-6 apresentada na Figura 5.34 mostra valores negativos em praticamente toda BHSF nos períodos agosto2007/janeiro2008 a outubro2007/março2008 (Figura 5.34 a, b, c). Nos meses de outubro, novembro e dezembro de 2007, com atuação da fase ativa do La Niña, as chuvas foram abaixo da média na região Nordeste e Sudeste, em especial no Estado de Minas Gerais. Nos meses de outubro e dezembro, o posicionamento de VCAN's, Cavados em altos níveis, associados à atividade anticiclônica em baixos níveis, inibiu a precipitação no Nordeste, o que favoreceu também a diminuição na umidade relativa do ar. Os acumulados de chuva que ocorrem nos meses de novembro e dezembro, principalmente no ASF, favorece a captação de águas nos reservatórios a jusante, em especial em Sobradinho.

A atuação da ZCAS nos meses de novembro e dezembro favoreceu a precipitação em algumas localidades da região Sudeste, porém, o Estado de Minas Gerais continuou com déficit de precipitação nos meses de outubro a dezembro de 2007, que é verificado na Figura 5.36. Observam-se desvios de precipitação negativos em Minas Gerais Bahia e Pernambuco. A diminuição das chuvas em anos de La Niña em MG foi comprovada por MINUZZI *et al.* (2007). Apesar das chuvas ocorridas nos meses de março e abril de 2008, os valores do RAI-6 ainda apresentam valores negativos no MSF nos trimestres de novembro2007/abril2008 a janeiro/junho2008. As demais regiões apresentam valores positivos nesta escala.

A evolução temporal das cotas máximas mensais nos reservatórios de Três Marias e Sobradinho, para os anos de 2007 e 2008, é apresentada na Figura 5.35. É possível observar a variação do RAI-6 é semelhante nas regiões do ASF, MSF, SSF e BSF. No entanto, verifica-se valores negativos significantes, nos dois primeiros semestres (agosto2007/janeiro2008 e setembro2007/fevereiro2008). Particularmente no ASF e MSF atingem limiares negativos superiores a -2. Esse resultado tem implicações

diretas no volume do reservatório de Sobradinho. Os valores da cota máxima registrados em Sobradinho entre novembro de 2007 e março de 2008 não atingiram a média histórica. Verifica-se que os valores das cotas em Três Marias não diminuíram de forma tão significativa como o observado em Sobradinho no mesmo período. SILVA (2013) verificou que em anos sob atuação do La Niña, as cotas tendem a diminuir. No ASF, as anomalias negativas são menos intensas do que nas demais regiões da Bacia (Figura 5.33a).

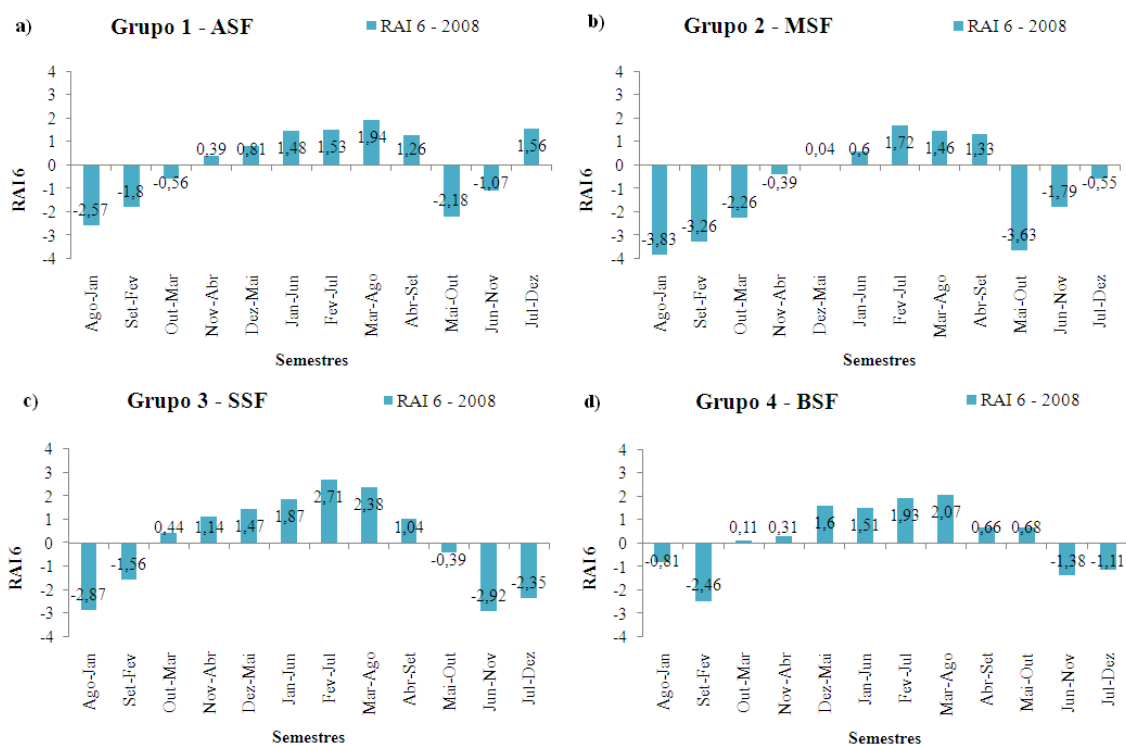


Figura 5.33: RAI-6 (seis meses) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2008.

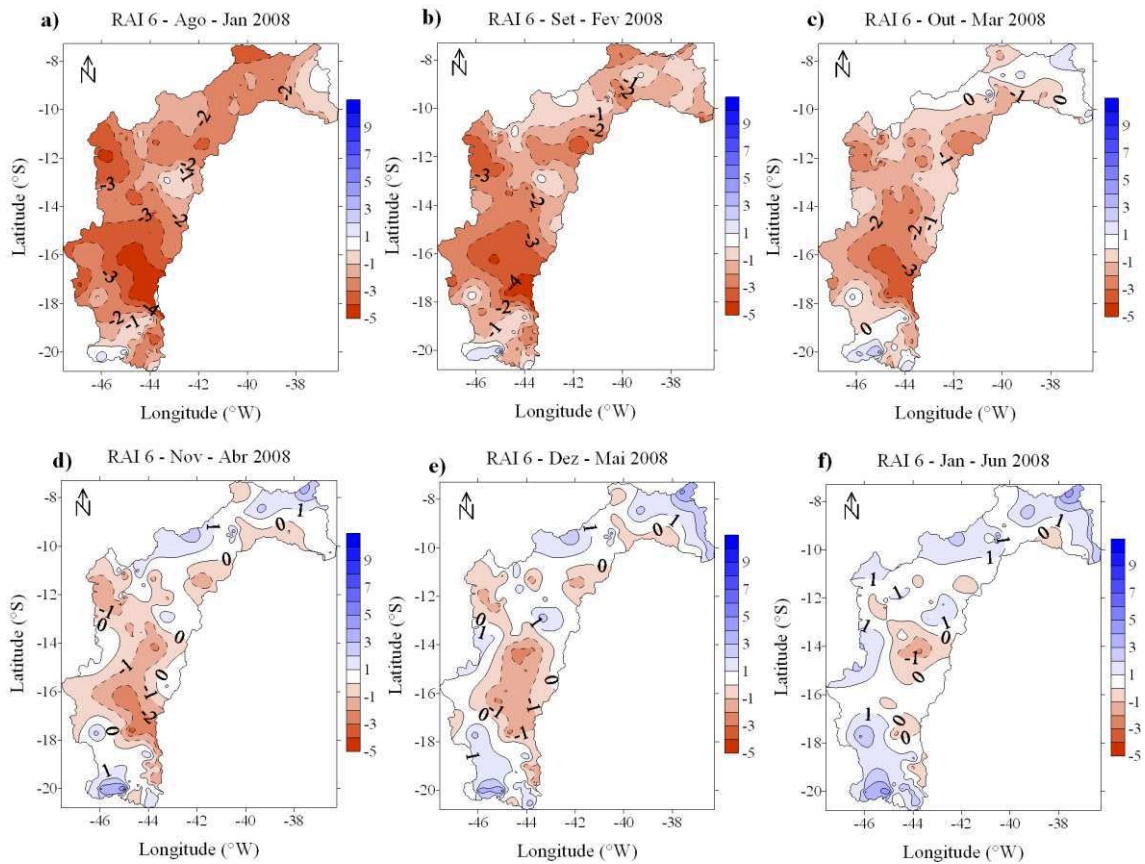


Figura 5.34: Distribuição espacial do RAI-6 (seis meses) na BHSF para os semestres referentes aos períodos agosto2007/janeiro2008 a janeiro/junho2008.

A localização do reservatório de Sobradinho, no MSF, sofre uma influência antrópica considerável, como armazenamento/uso da água para geração de energia elétrica e irrigação, além do consumo humano. Em meses considerados secos, ocorre consequentemente um aumento do uso das águas do São Francisco nessa região, aumentando a demanda. Havendo recarga de água proveniente do ASF e MSF, esse uso pode ser balanceado. Porém, quando somada à seca no entorno do lago, juntamente com o aumento do uso da água do reservatório, e ainda chuvas irregulares no AFS e MSF principalmente em meses do período chuvoso das duas regiões, a diminuição no volume do reservatório pode ser acentuada. Valores negativos do RAI-6 no ASF (Figura 5.34) indicam a diminuição das chuvas nessa região. Porém, em Três Marias, o nível do reservatório aparentemente não foi tão baixo quando comparado a Sobradinho. Os resultados obtidos para 2007/2008 indicam que o esvaziamento ocorreu de forma muito rápida apesar do reservatório de Sobradinho ter chegado ao seu nível máximo. É um forte indicativo de que a influência conjunta de fatores antrópicos e climáticos foi determinante na redução expressiva do nível do reservatório.

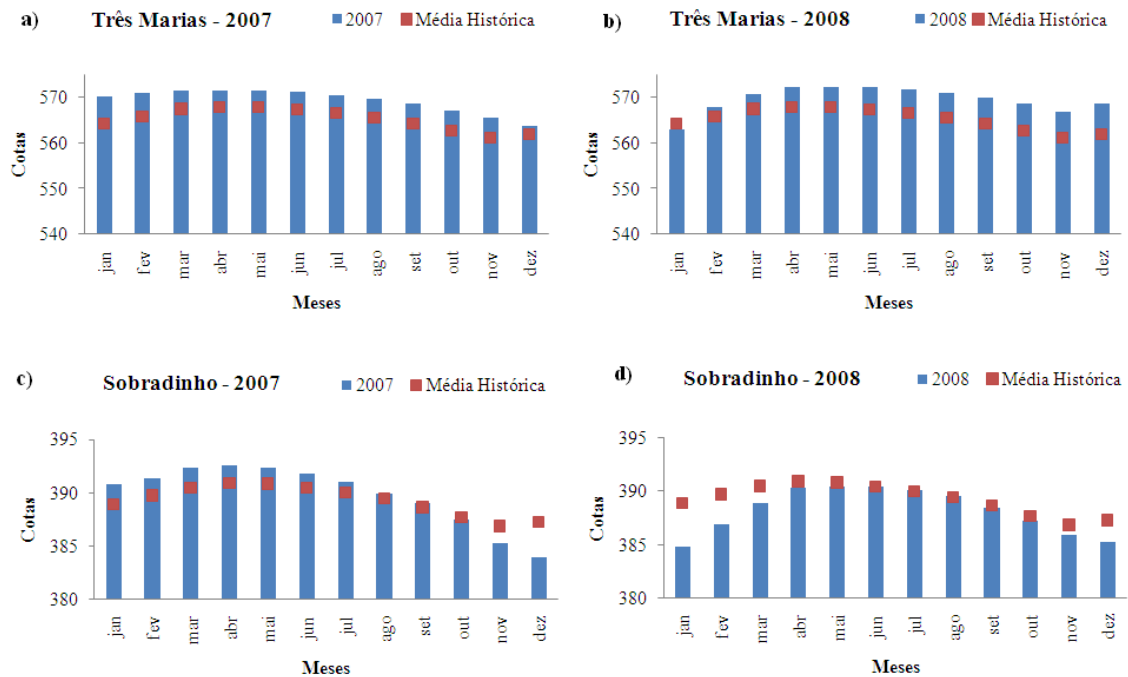


Figura 5.35: Valores das cotas máximas mensais (barras azuis) com a média histórica das cotas máximas mensais (pontos vermelhos) para os reservatórios de Três Marias (período de 1998 a 2015) e Sobradinho (período de 1981 a 2015), nos anos de 2007 e 2008. a) Três Marias (ano 2007 e média histórica); b) Três Marias (ano 2008 e média histórica); c) Sobradinho (ano 2007 e média histórica); d) Sobradinho (ano 2008 e média histórica).

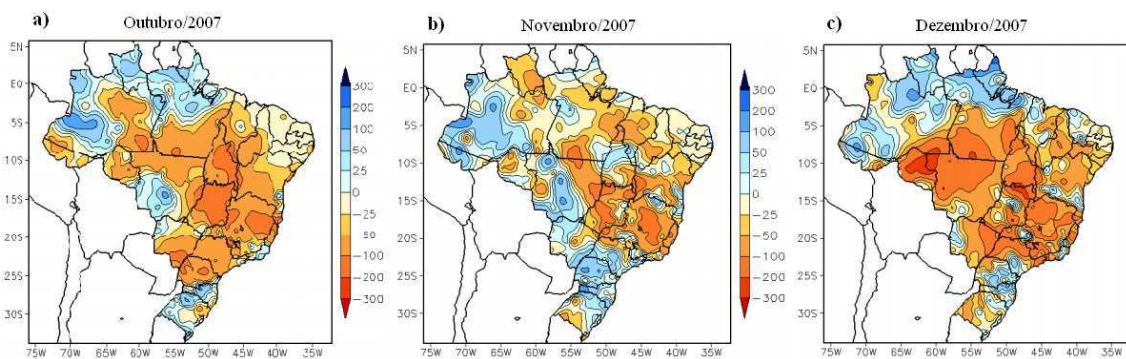


Figura 5.36: Desvio de precipitação (em mm) em relação à média climatológica para os meses de outubro, novembro e dezembro de 2007. Fonte: CPTEC/INPE.

5.3.4. Análise da precipitação no ano de 2012

5.3.4.1 Análise do RAI-1 (um mês) para o ano 2012

O ano de 2012 foi um ano com déficit de precipitação em praticamente toda a Bacia hidrográfica. Os histogramas de precipitação apresentados na Figura 5.37

mostram valores predominantemente abaixo da média histórica em todas as regiões ao longo do ano. Apenas no mês de janeiro no ASF, e novembro no ASF e no MSF (Figura 5.37a), os valores foram acima da média. Também foi um ano em que houve a atuação do fenômeno La Niña até o mês de março e, logo depois, o Oceano Pacífico ficou sob condições neutras.

Os valores do RAI-1 para cada região pluviometricamente homogênea são apresentados na Figura 5.38. Verifica-se valores negativos em todas as regiões, concordando com a série temporal de precipitação apresentada na Figura 5.37. No SSF nota-se que os valores foram negativos em todos os meses do ano. Esse comportamento da precipitação acarreta em um aumento na demanda, devido à maior necessidade de água para as diversas atividades das populações ribeirinhas nessa região como também para a irrigação. Em todas as outras regiões, os valores positivos aparecem, em sua maioria, em meses em que a precipitação não é tão expressiva.

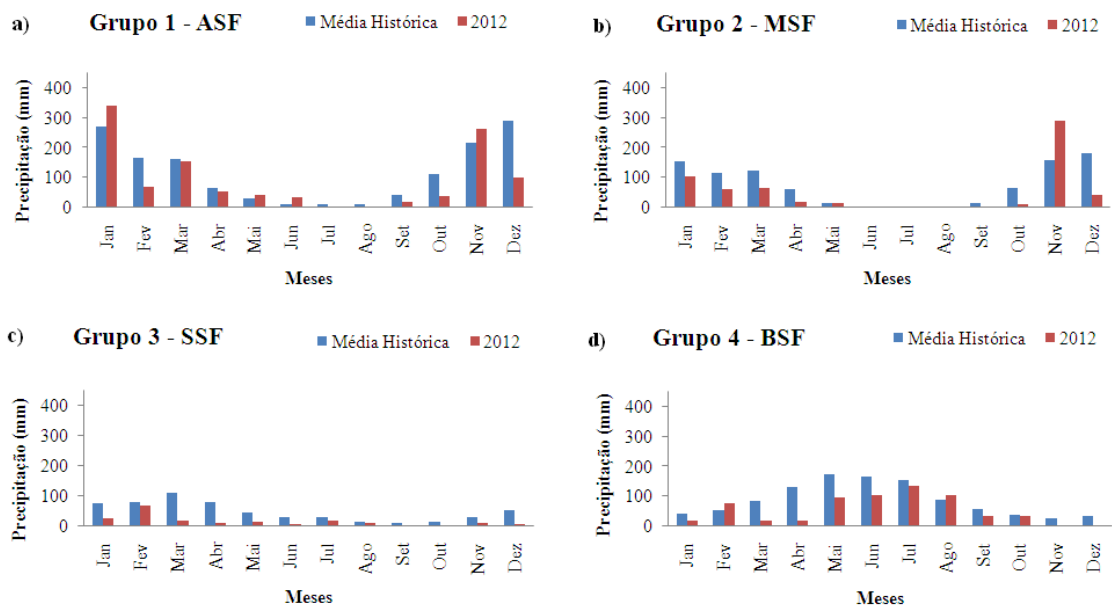


Figura 5.37: Histogramas de precipitação por Grupos comparando a média histórica (em azul) de 1961 a 2014 com a média da precipitação observada (em vermelho) no ano de 2012.

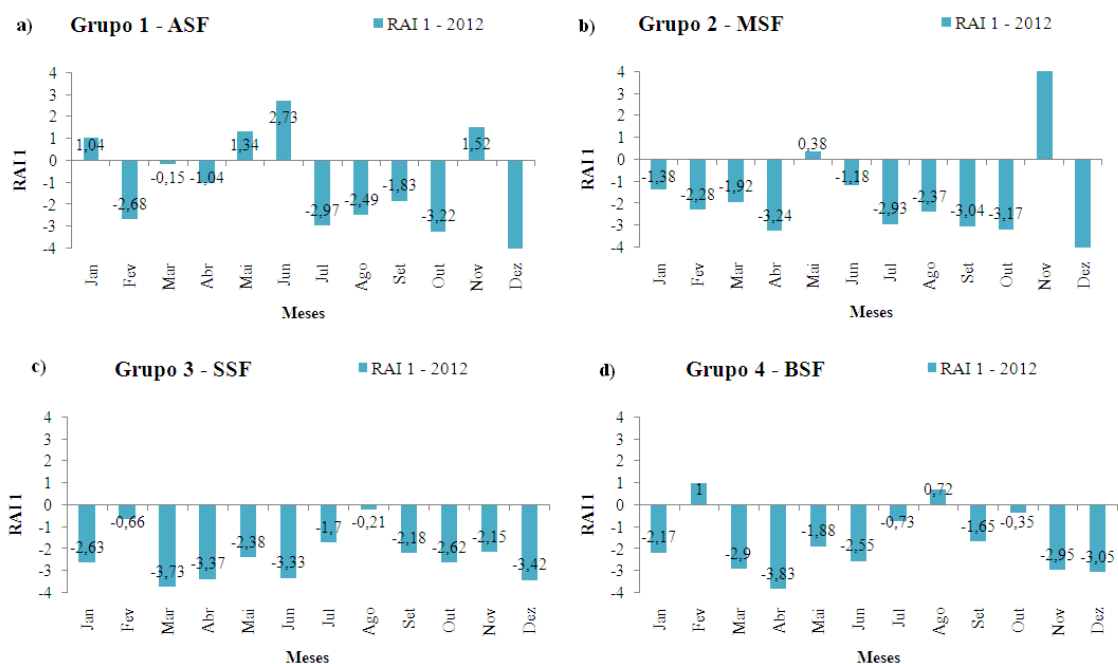


Figura 5.38: RAI-1 (um mês) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2012.

A distribuição espacial do RAI-1 para os seis primeiros meses do ano de 2012 é apresentada na Figura 5.39. Anomalias negativas predominam em todas as regiões nos meses de janeiro a junho. No mês de maio, valores positivos aparecem no ASF e MSF e no mês de junho apenas no ASF. As áreas atingidas pela seca com valores abaixo de -3 são bastante expressivas em todos os meses em análise.

O mês de janeiro (Figura 5.39a) apresentou uma pequena área no ASF e parte do MSF com valores positivos, e todas as demais regiões apresentaram valores negativos. Por ser um mês que ainda estava sob efeito do fenômeno La Niña, espera-se um aumento da precipitação em toda região Nordeste. No entanto, a atuação de VCAN's favoreceu áreas de instabilidade em algumas regiões e chuvas acima da média em Pernambuco e Alagoas, porém, predominou a estiagem sobre maior parte da região. Esse comportamento do VCAN em um ano que seria favorável a precipitação na região Nordeste se repete como visto no ano de 2008. Parte da Bahia, Pernambuco, Alagoas e Sergipe, os déficits de precipitação foram mais intensos do que nas demais localidades (CLIMANÁLISE, 2012).

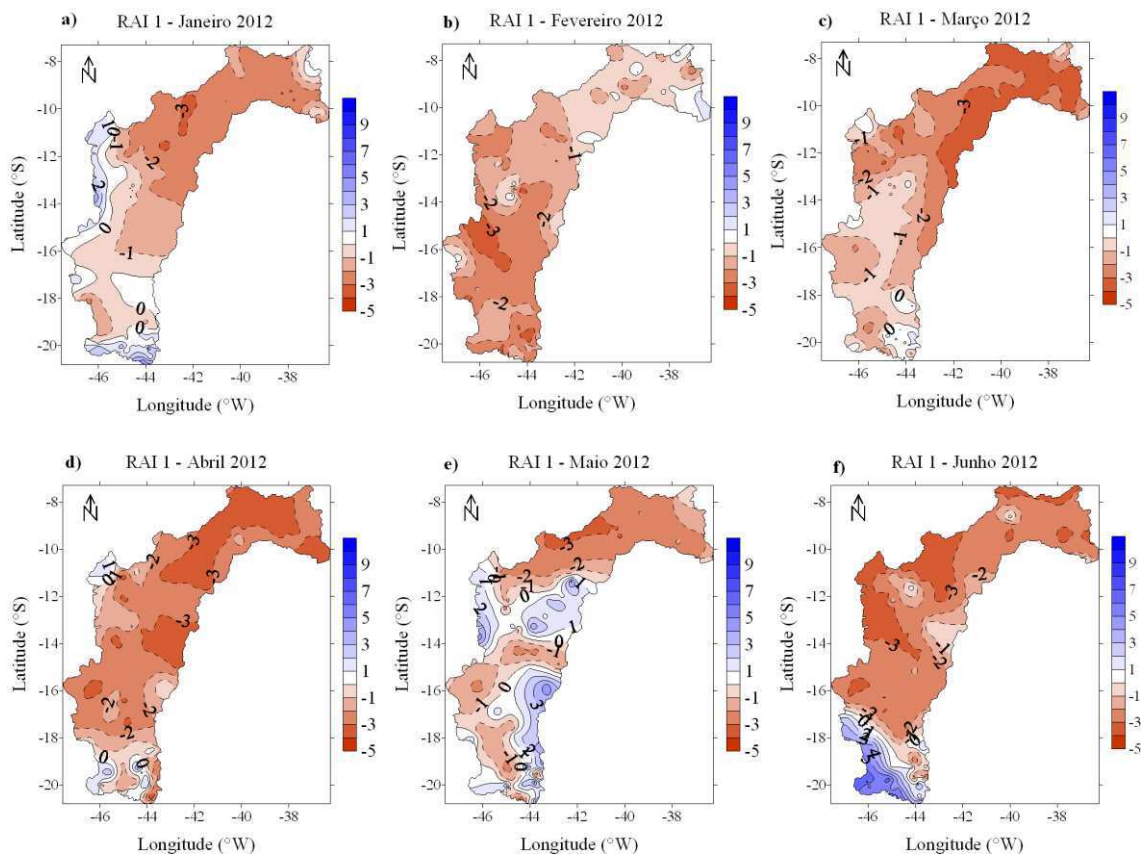


Figura 5.39: Distribuição espacial do RAI-1 (um mês) na BHSF para os meses de janeiro a junho do ano de 2012.

A Figura 5.40 apresenta os valores de precipitação ocorridos nos meses de janeiro e fevereiro de 2012 e a Figura 5.41 as anomalias das linhas de corrente em 200 hPa, para ambos os meses. Verifica-se déficit de precipitação em ambos os meses tanto no Nordeste quanto no Sudeste, e pode-se associar ao movimento ciclônico anômalo em altos níveis na parte Leste do Brasil.

É claramente notável que os valores negativos do RAI-1 tiveram uma intensificação nos meses seguintes, e os núcleos com anomalias negativas intensas foram aumentando sua área no decorrer do período analisado. Nos meses de fevereiro, março e abril, os maiores responsáveis pelo déficit de precipitação foram à atuação de VCAN's, em que o seu posicionamento inibiu a ocorrência de chuvas em praticamente todo o interior do Nordeste, como também a atuação da ZCIT mais ao norte de sua posição climatológica.

O mês de maio (Figura 5.39e) apresenta valores positivos do RAI-1 em parte do ASF e MSF. De acordo com o CPTEC, as chuvas ocorridas neste mês foram acima da média histórica na região Sudeste, especialmente no Nordeste de Minas Gerais. No mês

de junho aparecem anomalias positivas no ASF. As chuvas ocorridas neste mês foram provenientes de SF (CLIMANÁLISE, 2012).

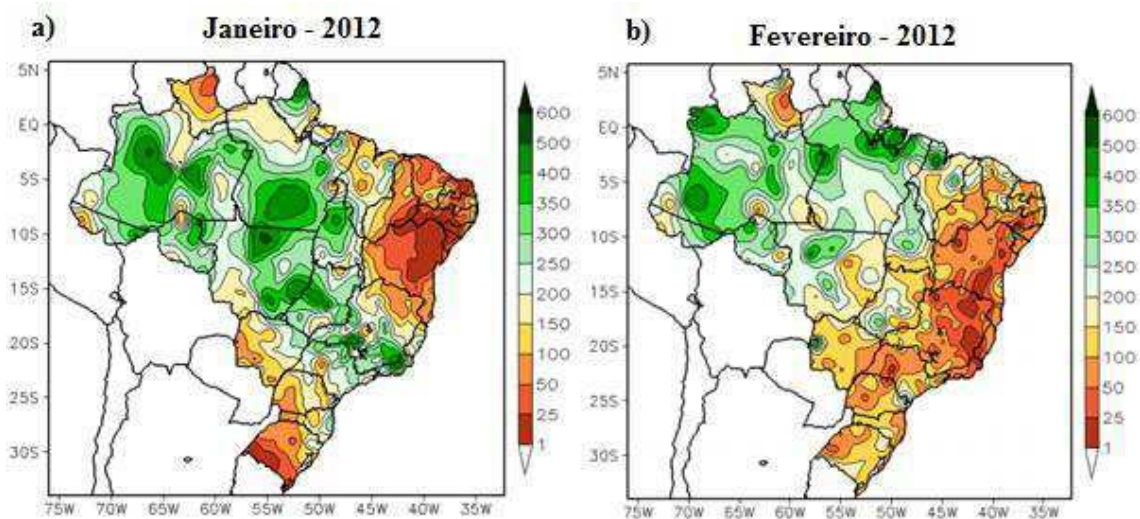


Figura 5.40: Precipitação total nos meses de janeiro e fevereiro de 2012 no Brasil. Fonte: Modificado de CPTEC/INPE.

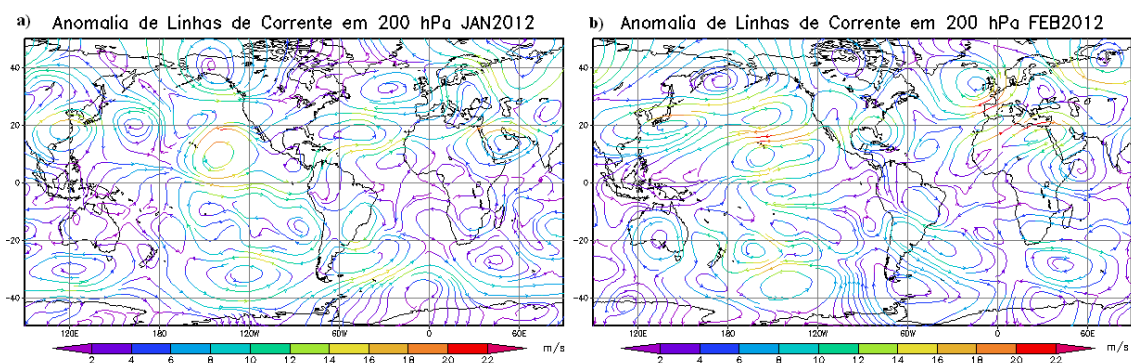


Figura 5.41: Anomalias de Linhas de Corrente no Nível de 200hPa, referentes aos meses de janeiro e fevereiro de 2012.

5.3.4.2 Análise do RAI-3(três meses) para o ano 2012

A evolução temporal e distribuição espacial do RAI-3 são apresentadas nas Figuras 5.42 e 5.43, respectivamente. Verificam-se anomalias positivas apenas para os períodos de novembro2011/janeiro2012, dezembro2011/fevereiro2012, abril/junho2012, maio/julho2012 e junho/agosto2012 (Figura 5.42a) no ASF e no trimestre setembro/novembro2012 no MSF (Figura 5.42b). No SSF e no BSF em todo o ano, os valores do RAI-3 são negativos (em torno de -2) (Figura 5.42 c, d). A distribuição espacial do RAI-3 para o ano de 2012, apresentada na Figura 5.43, mostra anomalias positivas no ASF e parte do MSF referente aos períodos novembro2011/janeiro2012 e dezembro2011/fevereiro2012 (Figura 5.43 a, b).

No mês de novembro de 2011 houve registro de déficit de precipitação em praticamente todo o Nordeste e maior parte do Sudeste, apresentando algumas anomalias positivas em Minas Gerais, devido à ocorrência de um episódio de ZCAS. O mês de dezembro houve a atuação de VCAN's associados à ZCAS, que favoreceram a precipitação principalmente em Minas Gerais (CLIMANÁLISE, 2011). Devido a esses episódios, e, apesar do mês de janeiro de 2012 ter sido um mês seco na maior parte da BHSF, exceto no ASF, os valores do RAI-3 são positivos nos dois trimestres, retratando a precipitação ocorrida nos meses anteriores. A Figura 5.44 verifica-se, através das imagens na região Sudeste o desenvolvimento de nuvens relacionadas à atuação da ZCAS. Também é possível identificar a ausência de nebulosidade sobre maior parte da região Nordeste.

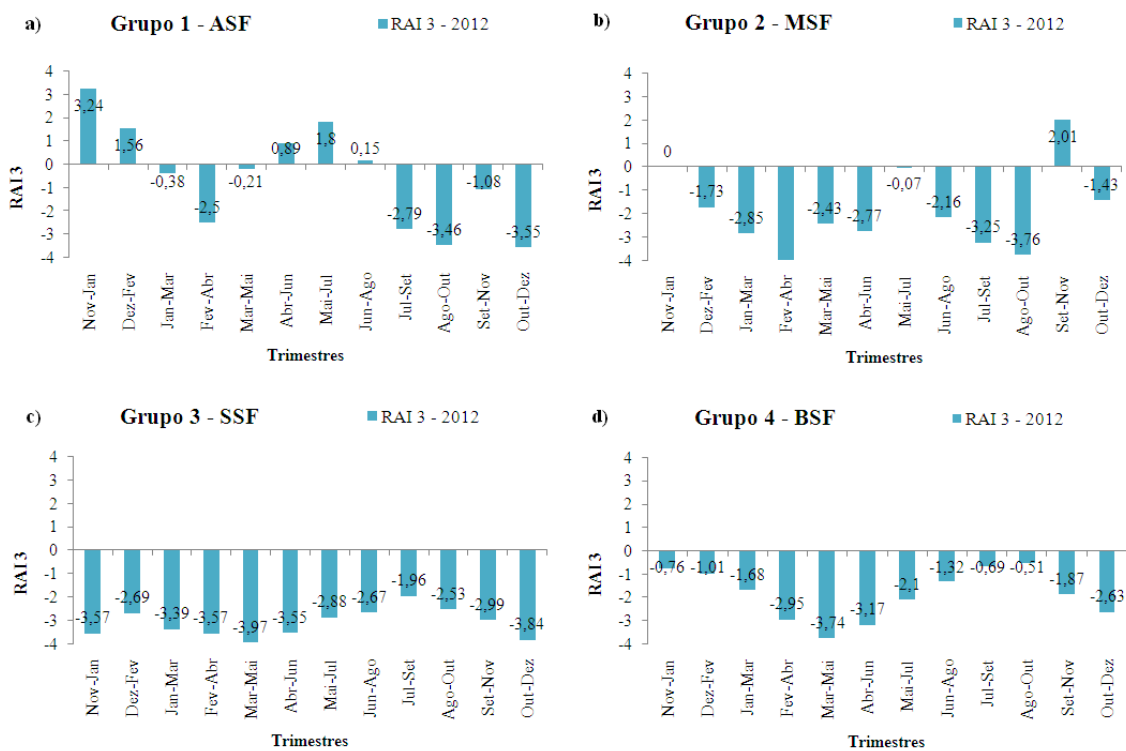


Figura 5.42: RAI-3 (três meses) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referentes ao ano de 2012.

Todos os valores seguintes retratam que os acumulados de precipitação foram extremamente secos em maior parte da Bacia. Os valores do RAI-3 referentes aos períodos janeiro/março2012 a abril/junho2012, apresentam valores negativos em praticamente toda a Bacia.

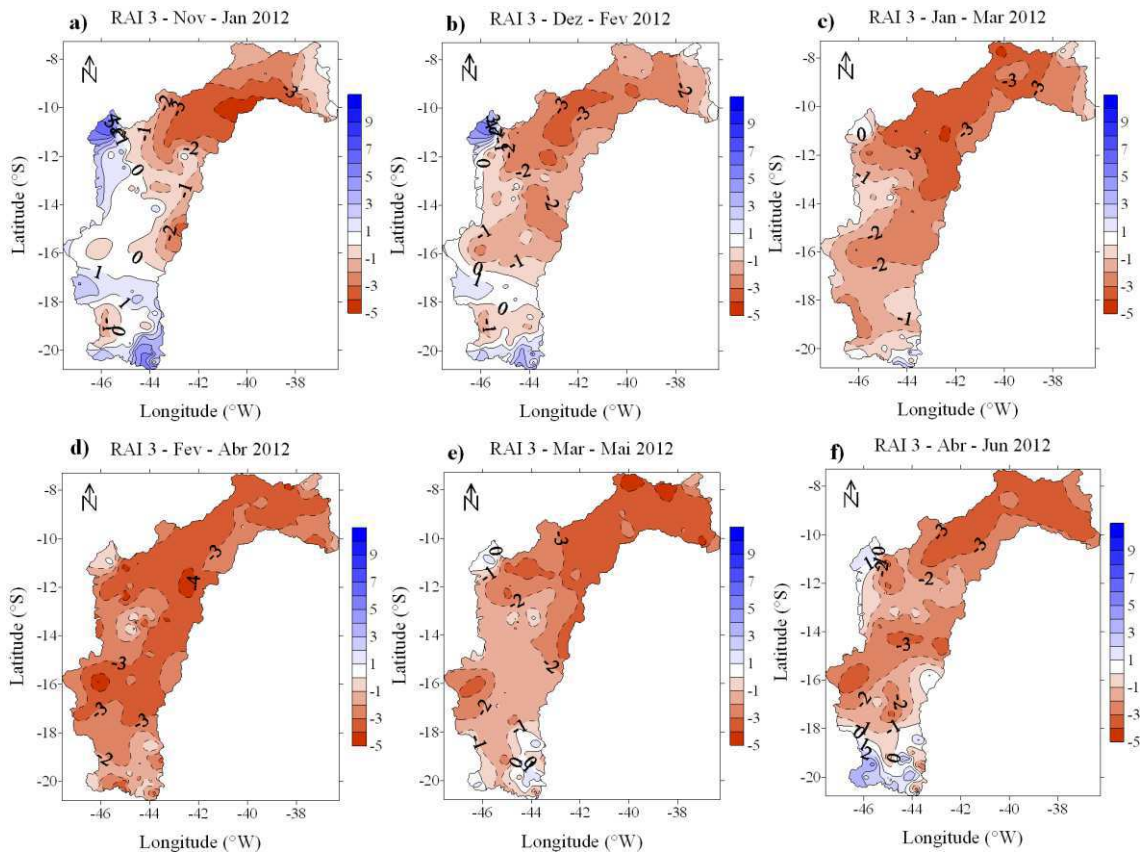


Figura 5.43: Distribuição espacial do RAI-3 (três meses) na BHSF referente aos períodos novembro2011/janeiro2012 a abril/junho2012.

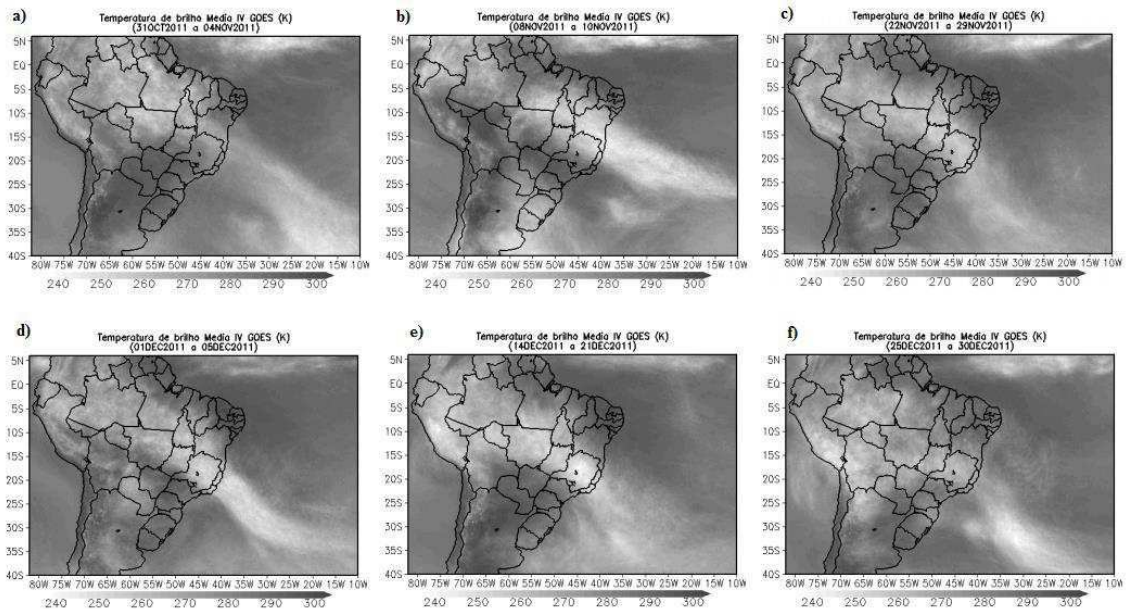


Figura 5.44: Temperatura de Brilho média obtida do Satélite GOES 12 para os meses de novembro e dezembro de 2011. Fonte: CPTEC/INPE.

5.3.4.3 Análise do RAI-6 (seis meses) para o ano 2012

Os valores do RAI-6 para os acumulados referentes ao ano de 2012 para as diferentes regiões da BHSF são apresentados na Figura 5.45. Assim como os valores apresentados para o RAI-3, no SSF e BSF, anomalias negativas aparecem nessas regiões para o RAI-6, e com intensidade ainda maior, abaixo de -3 na maioria dos períodos. Valores positivos aparecem apenas no ASF nos semestres referentes aos períodos de agosto2011/janeiro2012 a novembro2011/abril2012 (Figura 5.45a) e no MSF no período referente à agosto2011/janeiro2012 e junho/novembro2012 (Figura 5.45b).

A distribuição espacial do RAI-6 é apresentada na Figura 5.46. Em especial no ASF, verifica-se anomalias positivas nos períodos agosto2011/janeiro2012 a outubro2011/março2012 (Figura 5.46 a, b, c) na maior parte da região. Os valores negativos são predominantes no MSF, SSF e BSF (Figuras 5.45 e 5.46).

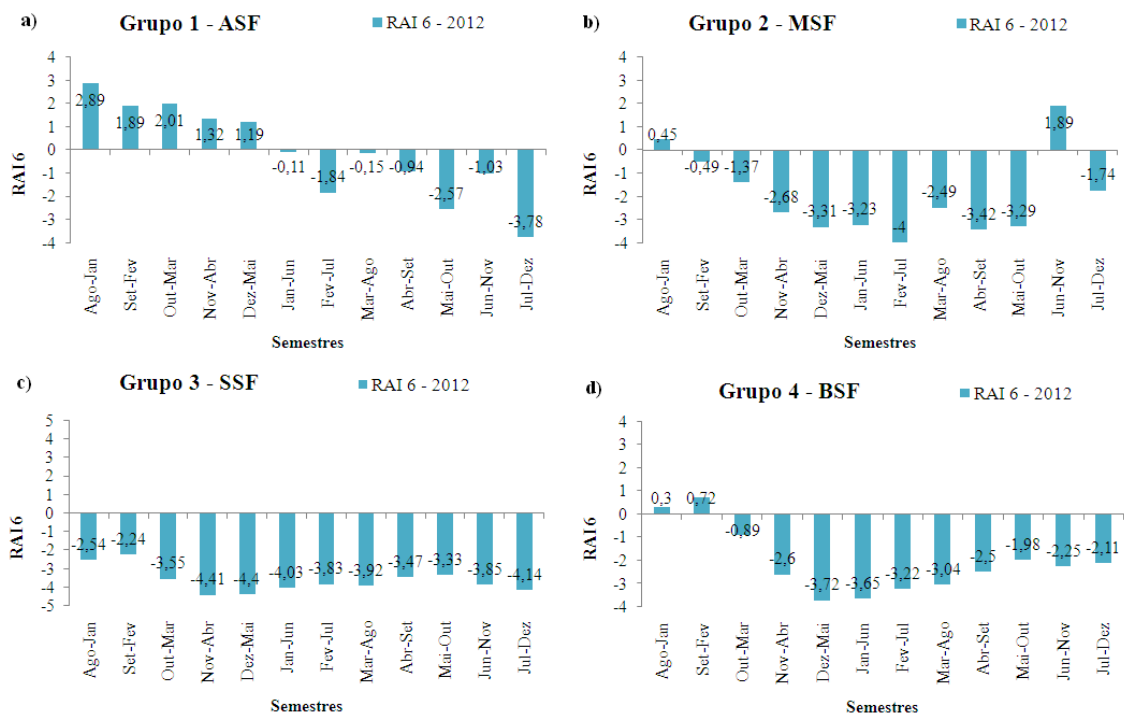


Figura 5.45: RAI-6 (seis meses) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2012.

Os meses de agosto e setembro de 2011 foram meses com déficit de precipitação significativos nas regiões Nordeste e Sudeste do país, e para a BHSF, são meses naturalmente secos. O mês de outubro, porém, os acumulados de precipitação excederam a média histórica em maior parte da região Nordeste e Sudeste, devido à passagem de Cavados na Média e Alta troposfera, proporcionando a ocorrência de áreas

de instabilidade associadas a regiões de convergência de umidade no setor central do Brasil.

As precipitações ocorridas durante os meses de outubro, novembro e dezembro de 2011, principalmente no ASF, favoreceram valores positivos do RAI-6 para os períodos de agosto/janeiro até outubro/março de 2012 (Figura 5.46 a, c). Verifica-se que no decorrer dos períodos analisados, as áreas com déficit de precipitação aumentam no ASF e MSF, e no SSF. Nas áreas que já apresentavam valores negativos, ocorre uma intensificação das anomalias negativas.

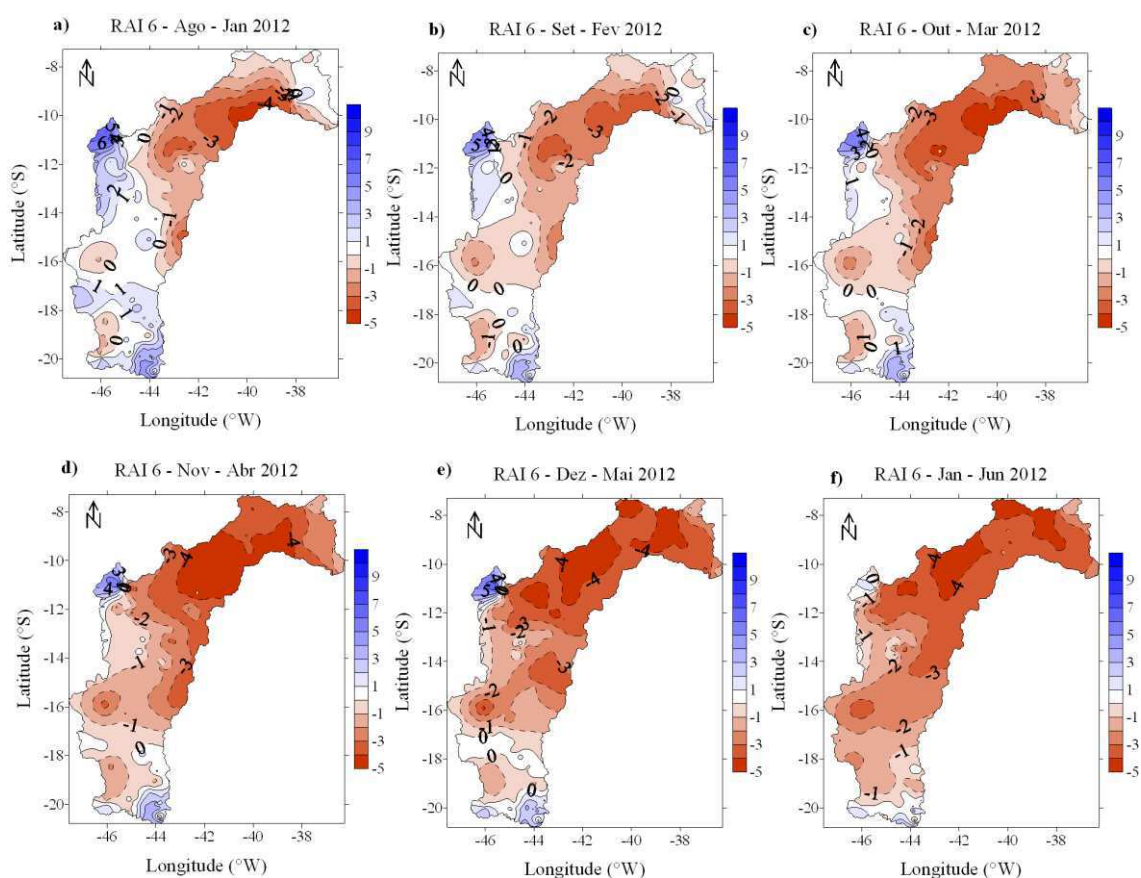


Figura 5.46: Distribuição espacial do RAI-6 (seis meses) na BHSF referentes aos períodos agosto2011/janeiro2012 a janeiro/junho2012.

Comparando os valores do RAI-6 para o ano de 2001 e 2012, verifica-se que no ano de 2012 os valores negativos mais intensos são observados no SSF e BSF, enquanto que no ano de 2001, os valores negativos para essa escala são mais intensos no ASF. Assim, o cenário dos valores das cotas tanto para Três Marias, como em Sobradinho é diferente. Em Três Marias, devido às chuvas ocorridas ASF no ano de 2011, que foi um ano sob a atuação do fenômeno La Niña. A precipitação nessa região ocorreu sob a fase ativa do fenômeno (Tabela 4.1), e os valores das cotas se encontravam acima da média.

Em Sobradinho, as chuvas ocorridas no ASF, apesar dos valores negativos do índice, os valores das cotas não ficaram tão baixos. Porém, verifica-se que a demanda da água no entorno do lago, ocasionados pela seca, fez com que os valores das cotas em alguns meses fossem abaixo da média (Figura 5.47b).

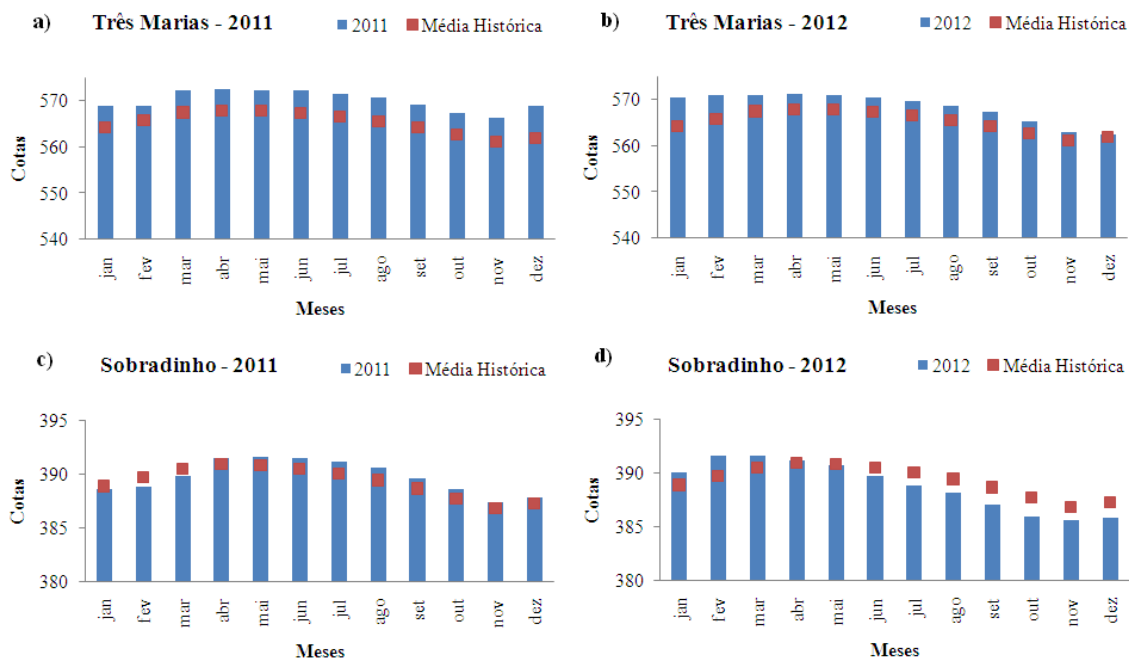


Figura 5.47: Valores das cotas máximas mensais (barras azuis) com a média histórica das cotas máximas mensais (pontos vermelhos) nos para os reservatórios de Três Marias (período de 1998 a 2015) e Sobradinho (período de 1981 a 2015), nos anos de 2011 e 2012. a) Três Marias (ano 2011 e média histórica); b) Três Marias (2012 e média histórica); c) Sobradinho (ano 2011 e média histórica); d) Sobradinho (ano 2012 e média histórica).

Outro ponto a ser observado, é que o cenário relativo aos valores das cotas no ano de 2001 é diferente, por vir de um período em que, além de ter sido um ano seco, as cotas já apresentavam valores abaixo da média no ano 2000, como também, houve uma pequena mudança na utilização dos recursos hídricos na BHSF entre os anos de 2000 e 2012. Outro fator que pode ser identificado, é que a demanda pela água em 2001 acabou sendo bem maior do que em 2012 nos dois reservatórios se comparamos apenas os valores das cotas em cada ano. Os valores das cotas no ano de 2011 até maio de 2012 estavam próximos aos valores médios (Figura 5.47 c, d) em Sobradinho. A partir do mês de junho de 2012, as cotas começam a diminuir (Figura 5.47 d). Como verificado na distribuição espacial do RAI-6, o semestre janeiro/junho 2012 (Figura 5.46f), os valores negativos indicam uma diminuição significativa das chuvas no primeiro

semestre do ano, afetando diretamente no abastecimento do reservatório de Sobradinho nas regiões do ASF e MSF em 2012. O aumento da demanda, devido à seca já identificada no SSF, fez com que as cotas de Sobradinho diminuíssem a partir de junho de 2012 (Figura 5.43b). Em Três Marias, os valores foram acima da média em praticamente todo o ano, e diminuem apenas a partir de novembro de 2012.

5.3.5 Análise da precipitação no ano de 2014

5.3.5.1 Análise do RAI-1 (um mês) para o ano 2014

O ano de 2014 foi um ano que precedeu mais uma crise energética no país, culminando em um fato até então raro, em que a principal nascente do São Francisco, situada na Serra da Canastra secou no mês de setembro. Foi um ano em que as condições de anomalias de TSM no Oceano Pacífico estavam neutras (Tabela 4.1).

É apresentada na Figura 5.48 a ilustração conjunta da média histórica e precipitações mensais registradas no ano de 2014. Verifica-se que a precipitação foi abaixo da média em praticamente todas as regiões do período chuvoso no ASF, MSF e SSF. No período chuvoso no BSF, apenas os meses de maio e julho apresentam valores um pouco acima da média na região (Figura 5.48d). A evolução temporal do RAI-1 nas diferentes regiões (ASF, MSF, SSF e BSF) é apresentada na Figura 5.49. Os valores das anomalias concordam com os valores de precipitação apresentados nos histogramas, com valores negativos no ASF, MSF e SSF nos meses de janeiro a abril de 2014.

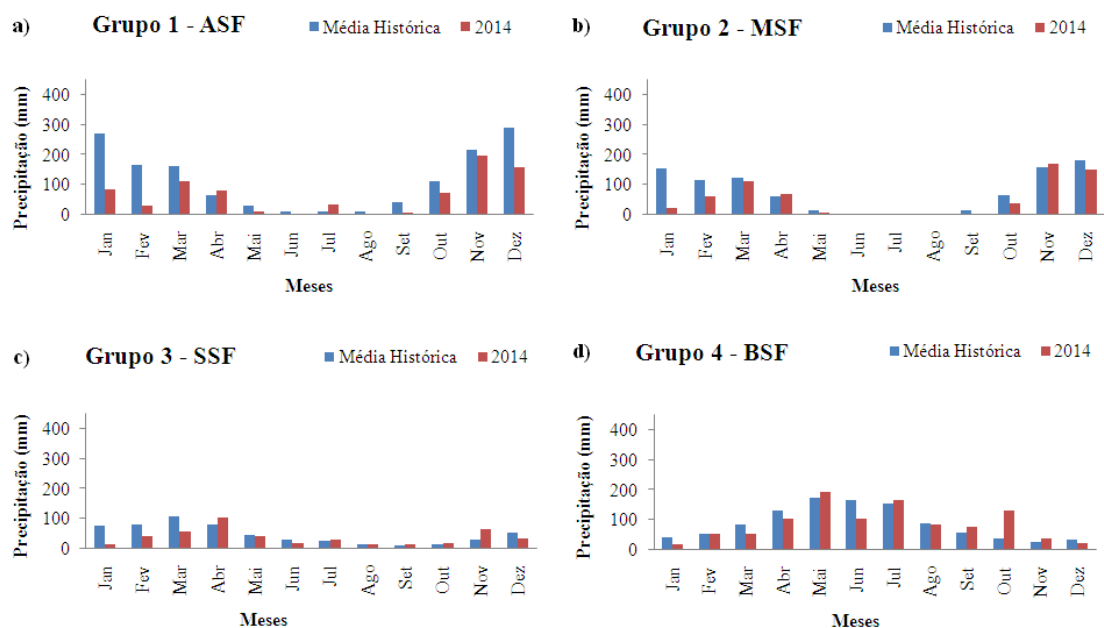


Figura 5.48: Histogramas de precipitação por Grupos comparando a média histórica (em azul) de 1961 a 2014 com a média da precipitação observada (em vermelho) no ano de 2014.

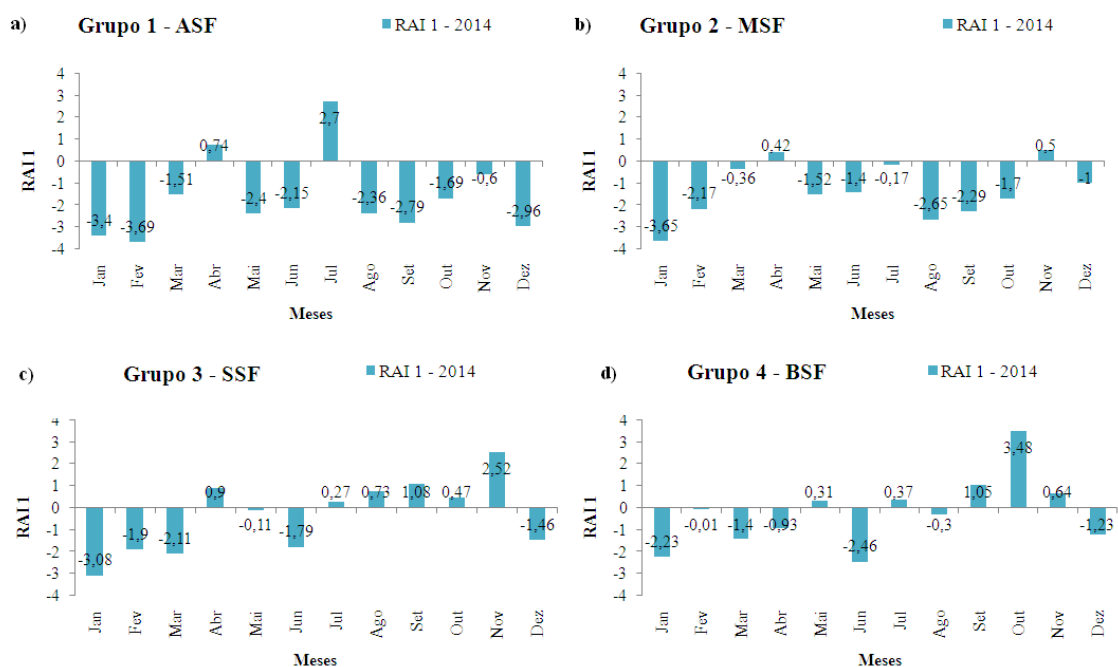


Figura 5.49: RAI-1 (um mês) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2014.

A distribuição espacial do RAI-1 apresentada na Figura 5.50 mostra valores negativos do índice em praticamente toda a Bacia durante os meses de janeiro e fevereiro de 2014 (Figura 5.50 a, b). Os meses de março e abril (Figura 5.50c, d) apresentam alguns núcleos positivos no MSF e ASF, porém com intensidade fraca. Os

valores positivos encontrados no ASF são apenas no mês de abril (Figura 5.50d). Em comparação com a distribuição espacial do RAI-1 referente ao ano de 2001 (Figura 5.6), o ano de 2014 apresentou valores negativos em maior parte da Bacia, em especial no ASF.

A influência conjunta de uma anomalia anticiclônica em baixos níveis, e movimentos descendentes no centro do VCAN, inibiu a precipitação em janeiro de 2014, na região Nordeste do Brasil e em parte do Sudeste. As condições observadas em baixos e altos níveis impediram o desenvolvimento de mecanismos de formação e manutenção da ZCAS. Esse comportamento da atmosfera é observado nas cartas médias de linhas de corrente nos níveis de 850 e 200 hPa (Figura 5.51). Em fevereiro, o comportamento ciclônico anômalo em 200hPa, favoreceu a ocorrência de VCAN's, porém o centro inibiu a chuva sobre a Bacia, em especial em Minas Gerais e Bahia. Chuvas irregulares foram observadas no Estado de Pernambuco. A ocorrência de VCAN's persistiu no mês de março, inibindo a formação de episódios bem configurados de ZCAS, resultando em chuvas abaixo da climatologia na maior parte da Região Sudeste (INFOCLIMA, 2014; BOLETIM DO CLIMA, 2014). Houve registros de chuvas acima da média durante a primeira quinzena de abril nas regiões sudeste e parte da região Nordeste do Brasil. Esse comportamento se deu devido à persistência do escoamento de oeste durante este mês.

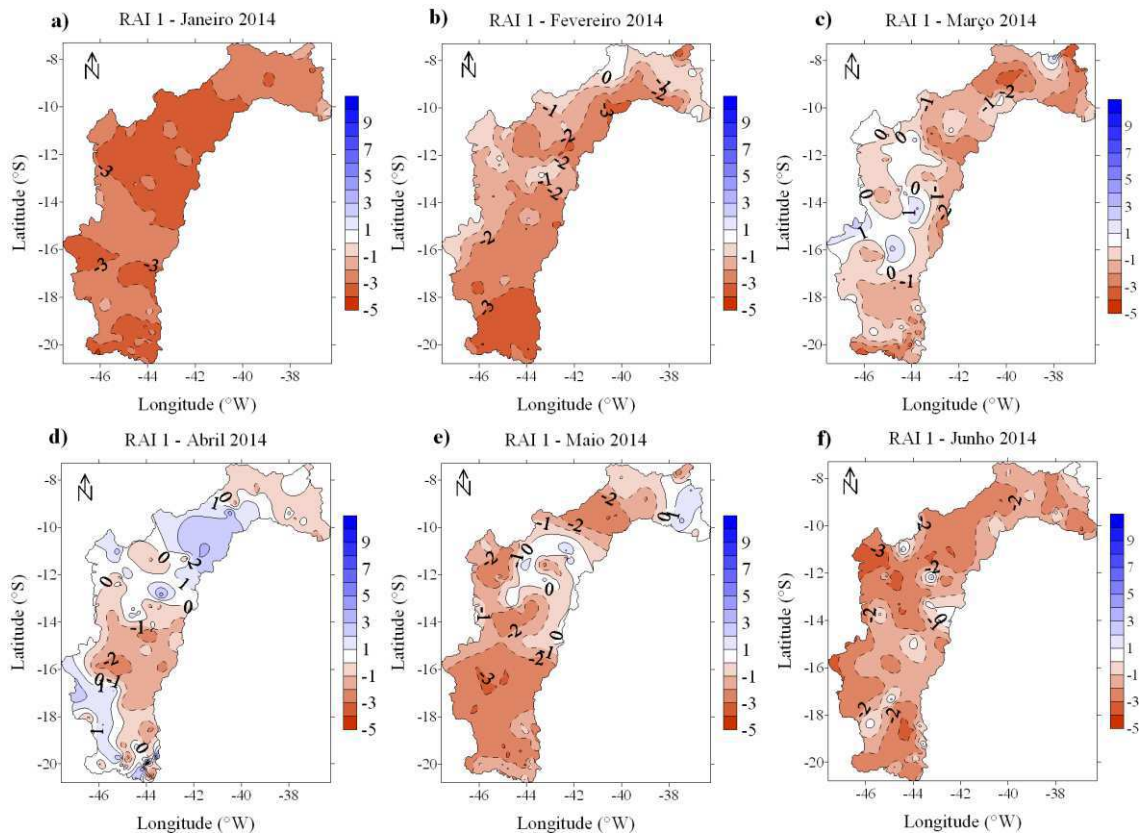


Figura 5.50: Distribuição espacial do RAI-1 (um mês) na BHSF para os meses de janeiro a junho do ano de 2014.

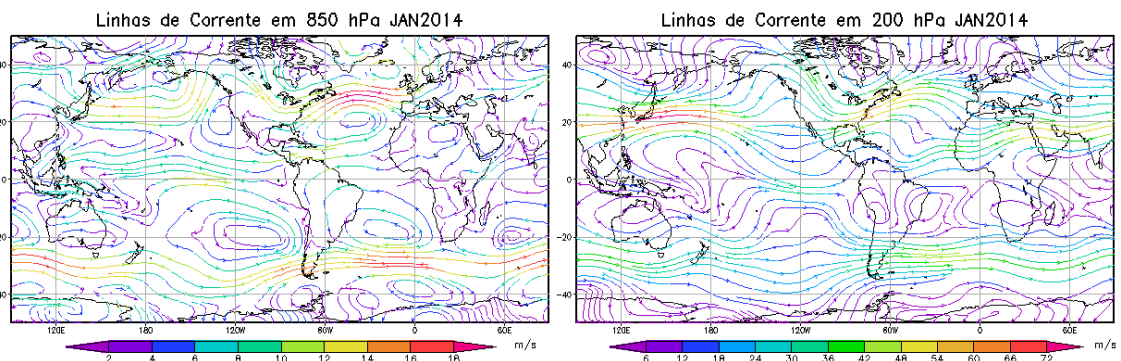


Figura 5.51: Linhas de corrente referentes ao mês de janeiro de 2014: a) 850 hPa; b) 200 hPa. Fonte: CPTEC/INPE.

Nos meses de maio e junho os valores do RAI-1 são negativos em praticamente toda a Bacia (Figura 5.50 e, f). Observa-se uma pequena área com desvios positivos na região do MSF e BSF no mês de maio. Em junho, a área positiva diminui em relação a maio. A ocorrência de instabilidade causada pela confluência dos ventos na baixa troposfera, associada a um Cavado em altos níveis causaram chuvas de intensidade forte no Litoral Nordestino, em especial na Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Sergipe (BOLETIM DO CLIMA, 2014).

Vários episódios acabaram inibindo a configuração e aparecimento da ZCAS nos meses do período chuvoso do ano de 2014, principalmente no ASF. Assim, o déficit de precipitação foi evidente na maioria dos meses. SANTOS (2012) verificou em seu estudo aplicando ACP a valores do RAI na escala mensal, que grande parte das chuvas provocadas no ASF são oriundas da ZCAS. Esse padrão atmosférico, associado com a escassez de chuvas, persistente desde o ano de 2012, contribuiu para que os volumes dos reservatórios ao longo da Bacia fossem diminuindo no decorrer do ano conforme discussão apresentada posteriormente.

5.3.5.2 Análise do RAI-3(três meses) para o ano 2014

A evolução temporal do RAI-3 para cada região da BHSF no ano de 2014 é apresentada na Figura 5.52. É importante notar que as anomalias negativas são predominantes em todas as regiões. As anomalias referentes aos últimos trimestres do ano de 2014 no SSF e BSF são positivas, o que não ocorre no ASF e MSF.

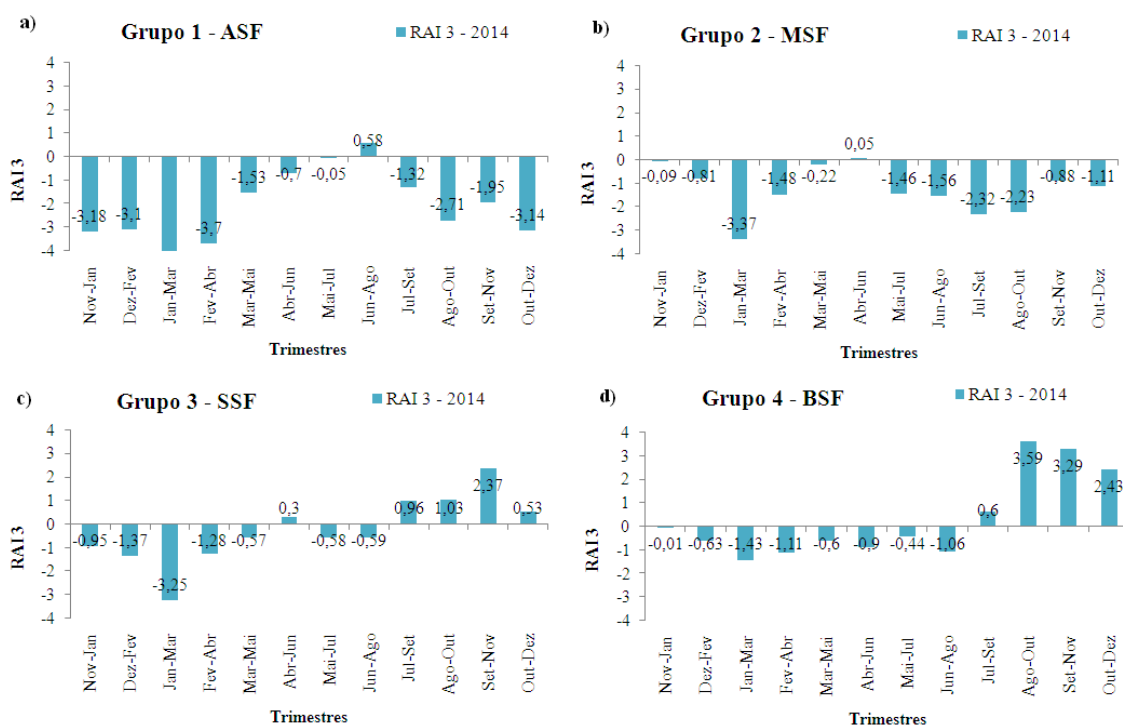


Figura 5.52: RAI-3 (três meses) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referentes ao ano de 2014.

Na configuração espacial do RAI-3 apresentada na Figura 5.53, verificam-se anomalias positivas nos períodos novembro2013/janeiro2014 e dezembro2013/fevereiro2014 na região do MSF (Figura 5.53a, b). A atuação de VCAN's no mês de novembro de 2013 contribuiu com a redução da precipitação na

Bahia. Por outro lado, no mês de dezembro, a ocorrência de VCAN's associados com episódios de ZCAS contribuiu para a ocorrência da precipitação acima da média no Sudeste do País e na Região Nordeste, em especial, na parte central da Bahia, local em que as anomalias positivas aparecem. É possível identificar uma intensa atividade convectiva sobre os Estados da Bahia e Minas Gerais entre os dias 11 e 25 de dezembro de 2013 através da nebulosidade observada nas pântadas de temperatura de brilho média no mês de dezembro (Figura 5.54).

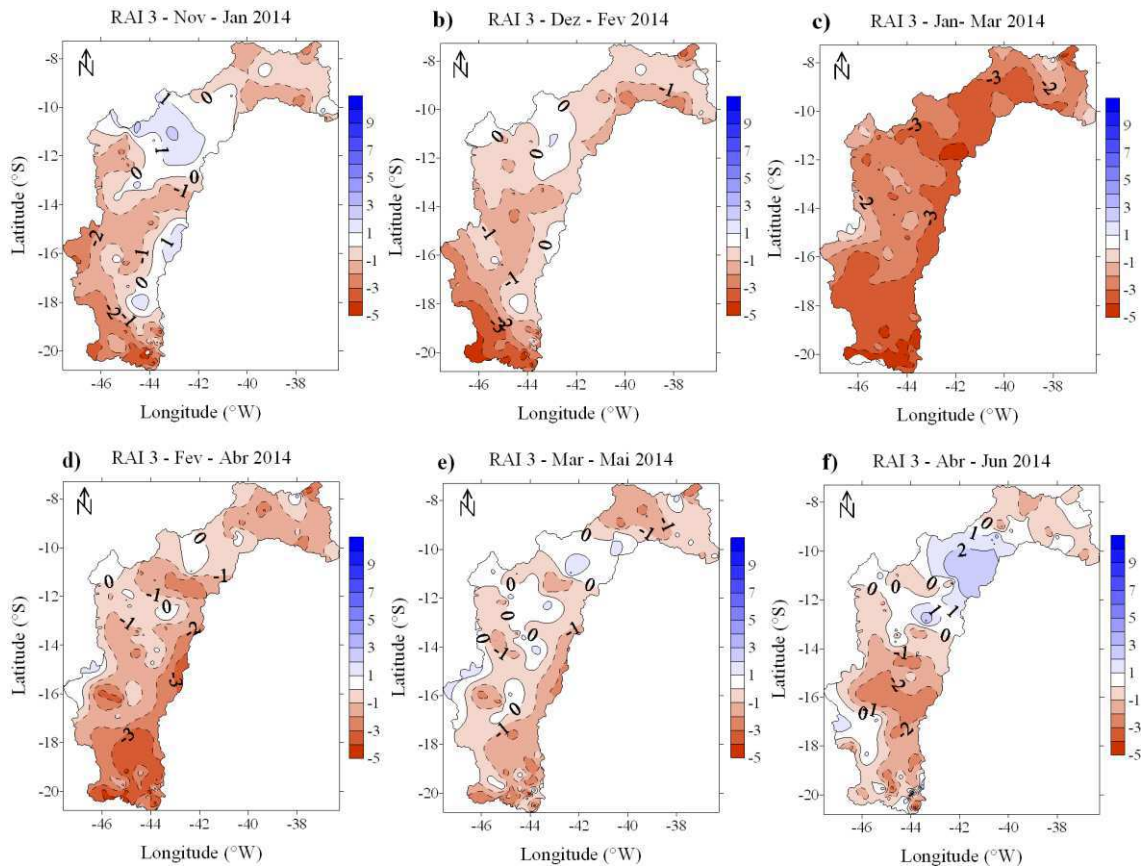


Figura 5.53: Distribuição espacial do RAI-3 (três meses) na BHSF para os períodos novembro2013/janeiro2014 a abril/junho2014.

Apesar das chuvas ocorridas em novembro e dezembro de 2013, verificam-se valores negativos do RAI-3 intensos no ASF nos períodos novembro2013/janeiro2014 a fevereiro/abril2014 (Figura 5.53a, d). A intensidade dos valores negativos nessa região diminui nos dois períodos seguintes, mas ainda são predominantes. Os valores do RAI-6 para o ano de 2014 são apresentados na seção seguinte.

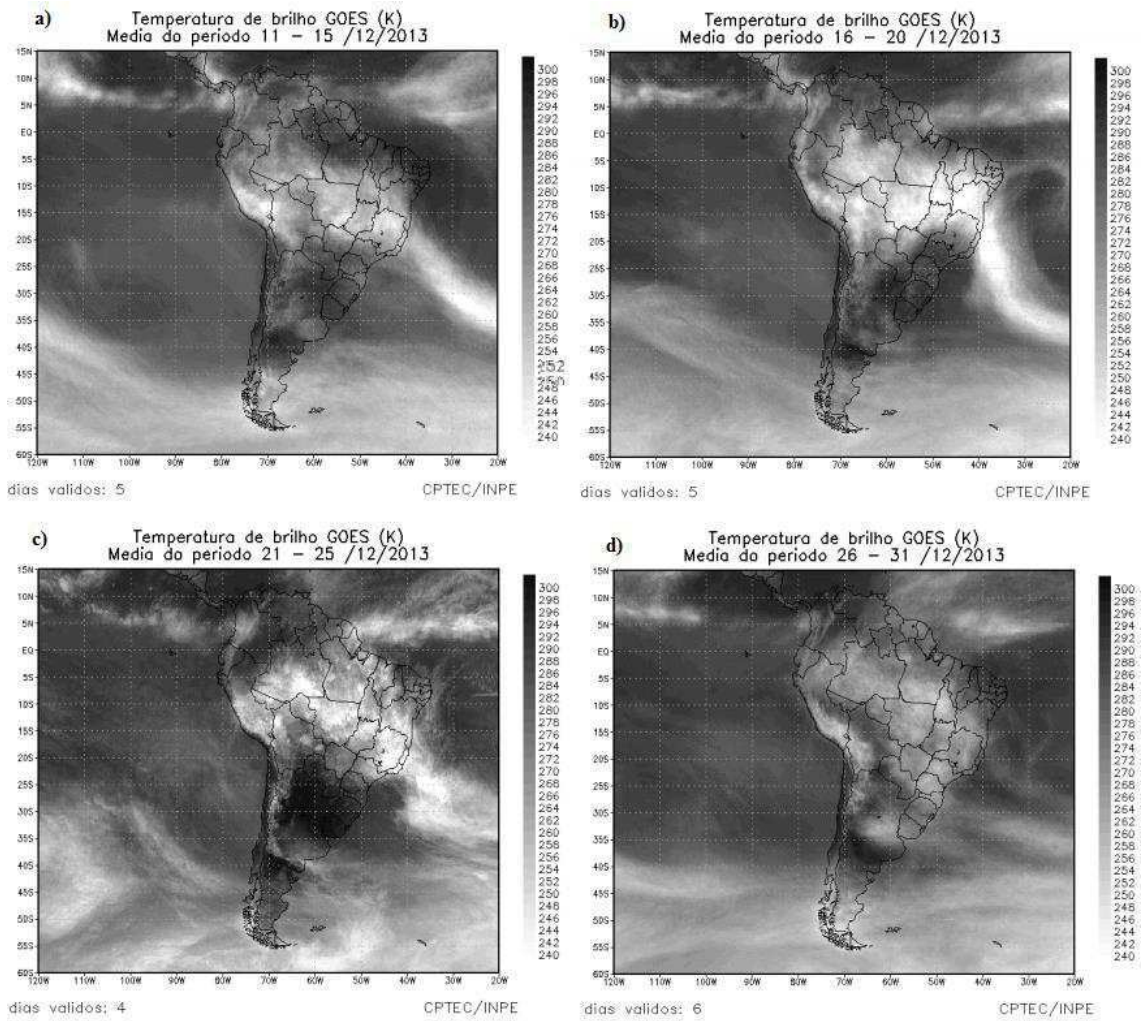


Figura 5.54: Pêntadas de temperatura de brilho média (K) para o mês de dezembro/2013, Satélite GOES 13. FONTE: CPTEC/INPE.

5.3.5.3 Análise do RAI-6 (seis meses) para o ano 2014

Os valores do RAI-6 para as regiões pluviometricamente homogêneas são apresentados na Figura 5.55. No ASF e MSF, todas as anomalias são negativas na série analisada. Valores positivos aparecem no SSF, nos períodos referentes a abril/setembro2014 a julho/dezembro2014.

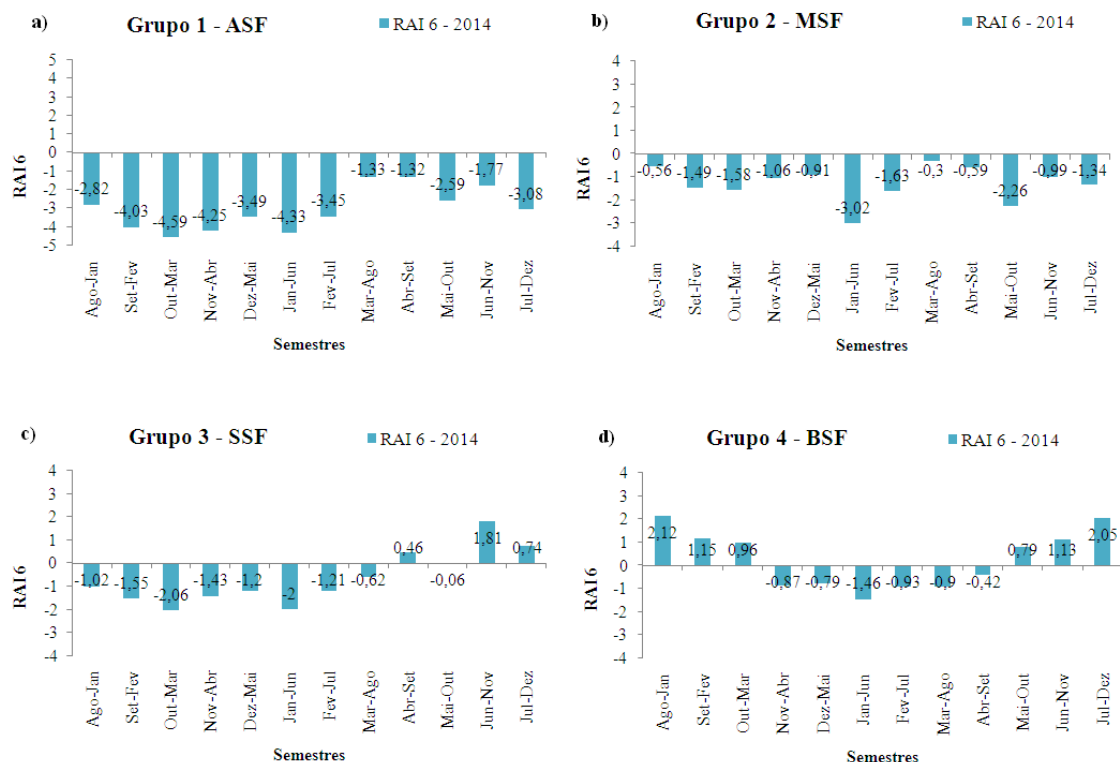


Figura 5.55: RAI-6 (seis meses) médio para os diferentes Grupos homogêneos de precipitação da BHSF referente ao ano de 2014.

Assim como verificado no RAI-1 e RAI-3, na distribuição espacial do RAI-6 para o ano de 2014 (Figura 5.56), é evidente que os valores negativos intensos no ASF predominam. Esse comportamento indica que a seca hidrológica nessa região foi bastante significativa, mostrando que a intensidade, duração e região afetada pela seca em um prazo maior quando comparada com anos anteriores apresentados neste trabalho, em especial o ano de 2001. Poucos núcleos com valores positivos aparecem no MSF nos períodos de agosto2013/janeiro2014 a dezembro2013/maio2014, com máximos positivos variando entre 0 e 2.

Esses valores positivos do RAI-6 devem-se a ocorrência de precipitações no ano anterior (2013) na região do MSF, visto que nos meses de janeiro e fevereiro de 2014 as chuvas foram abaixo da média em toda a BHSF, conforme verificado anteriormente nas análises do RAI-1 (Figuras 5.49 e 5.50). Os meses de agosto e setembro são naturalmente mais secos em praticamente toda a BHSF. Os maiores valores médios acumulados são do mês de outubro, no ASF, em que a média chega a 100 mm como foi visto nos histogramas médios de precipitação das regiões pluviometricamente homogêneas (Figura 5.1).

Durante mês de outubro de 2013, os maiores acumulados foram registrados no setor leste do Nordeste, porém, alcançaram uma área maior, atingindo Alagoas, Sergipe e Pernambuco. Esse comportamento foi devido ao aumento da convergência de umidade adjacente à costa leste do Nordeste, favorecendo a precipitação. Conforme mencionado na seção anterior, referente ao RAI-3, as chuvas nos meses de novembro e dezembro de 2013 foram oriundas da ocorrência de VCAN's associados à ZCAS.

Uma comparação simples entre os valores das cotas nos reservatórios de Três Marias e Sobradinho nos anos de 2001 e 2014 indicam que nos dois casos as cotas no ano anterior já se apresentavam abaixo da média em todos os meses. No entanto, um diferencial significativo observado em 2014, são os valores negativos (anomalias negativas) do RAI-6 no ASF, registrado em todos os semestres do período analisado. Em 2001, nos semestres, maio/outubro, junho/novembro e julho/dezembro, para mesma região, os valores do RAI-6 foram positivos.

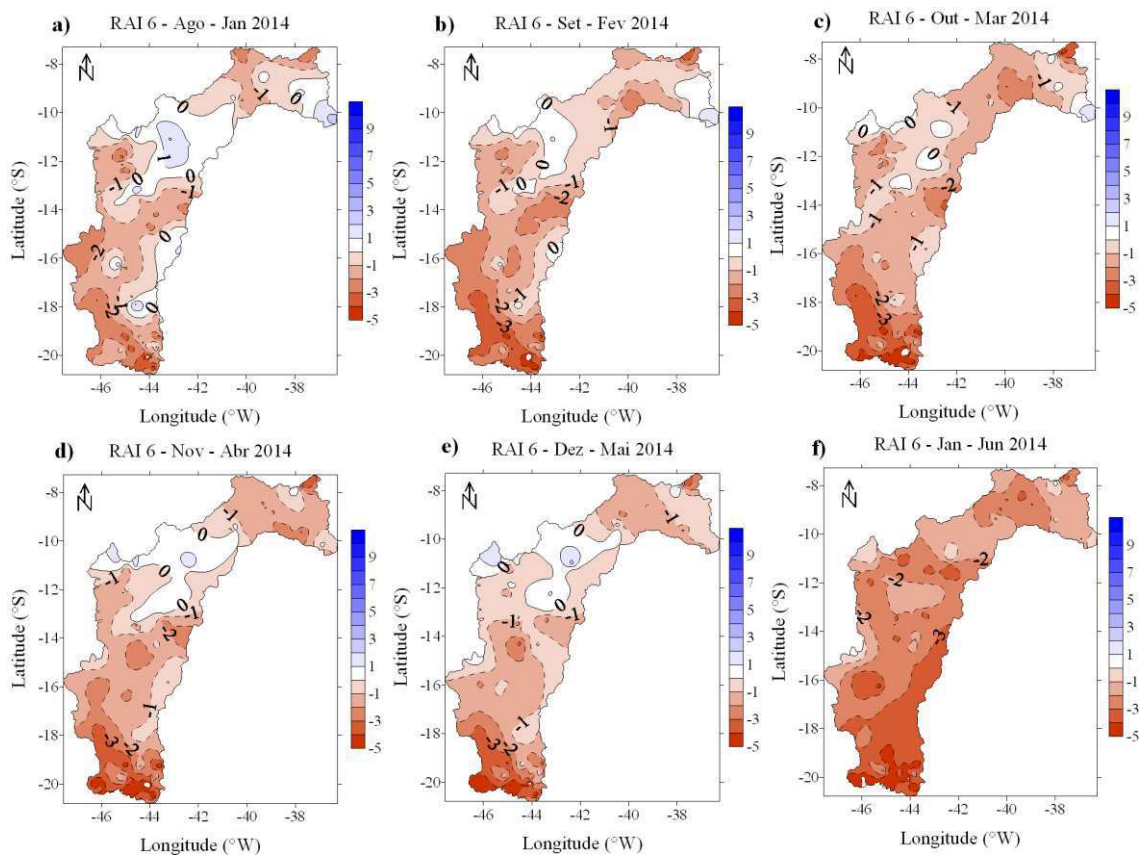


Figura 5.56: Distribuição espacial do RAI-6 (seis meses) na BHSF referentes aos períodos agosto2013/janeiro2014 a janeiro/junho2014.

Em síntese, nos anos escolhidos para análise, e particularmente nos casos em que a crise hídrica prevaleceu (2001 e 2014), foi possível detectar com base na aplicação do RAI em diferentes escalas, características importantes:

- Nesses dois anos, houve o predomínio de valores negativos do RAI-1 e RAI-6 no ASF na maioria dos meses do ano. Não havendo também acumulados significativos importantes nas demais regiões, com núcleos positivos intensos, que viessem a reverter à situação nos reservatórios a jusante do ASF, o que pode ter intensificado ainda mais a crise hídrica.

- A situação dos reservatórios de Três Marias e Sobradinho foi semelhante em 2001 e em 2014, em que os anos anteriores já mostravam que a situação do reservatório já se encontrava crítica tanto em 2000 quanto em 2013, que os valores das cotas se encontravam abaixo da média.

- O cenário observado na Tabela 4.1, das condições Oceânicas referentes ao Pacífico são diferentes nos anos de 2001 e 2014. O ano de 2001 tinha um cenário com dois anos consecutivos de La Niña, que se estendeu até o mês de março. O ano de 2014 veio precedido de dois anos consecutivos sob condições Neutras no Pacífico. Vale ressaltar que resultados de estudos desenvolvidos anteriormente indicam que em anos de La Niña, as cotas dos reservatórios do São Francisco são baixas devido à diminuição das chuvas no ASF. No entanto, os resultados obtidos nesta pesquisa indicam também a necessidade de estudos que permitam avaliações mais detalhadas considerando situações atmosféricas em condições de TSM Neutras do Pacífico. Não existem estudos específicos nessas condições, englobando anomalias positivas no ASF e déficits de precipitação na bacia hidrográfica que venham a acarretar situações de seca hidrológica.

- Todos os anos analisados apresentaram valores negativos do RAI-1 nos meses de janeiro e fevereiro em praticamente toda a Bacia. Ambos os meses, em todas as regiões (Alto, Médio e Submédio), são meses chuvosos, e as condições observadas em relação ao Pacífico foram diferentes para cada ano. Porém, a situação do Reservatório de Sobradinho nos anos de 2001 e 2014 foi precedida de anos secos e que o reservatório já havia baixado seu nível. Através do RAI-6, algumas características são marcantes e evidentes no comportamento das anomalias no ASF e MSF, prevalecendo valores negativos nos primeiros semestres de cada ano analisado.

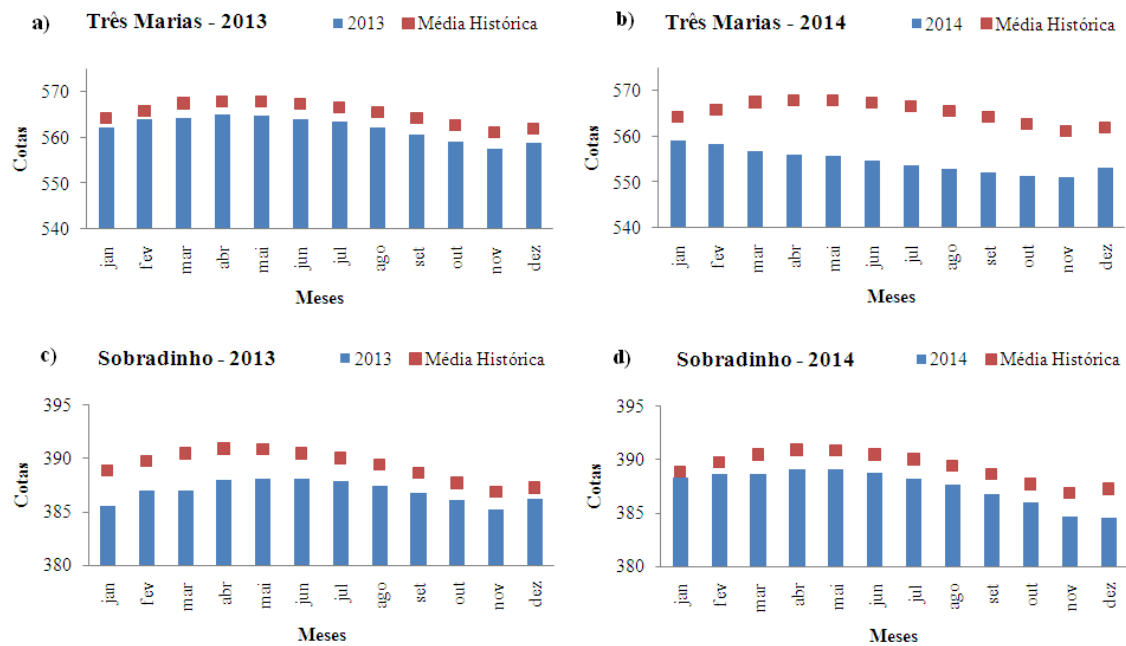


Figura 5.57: Valores das cotas máximas mensais (barras azuis) com a média histórica das cotas máximas mensais (pontos vermelhos) nos para os reservatórios de Três Marias (período de 1998 a 2015) e Sobradinho (período de 1981 a 2015), nos anos de 2013 e 2014. a) Três Marias (ano 2013 e média histórica); b) Três Marias (ano 2014 e média histórica); c) Sobradinho (ano 2013 e média histórica); d) Sobradinho (ano 2014 e média histórica).

Como relatado no início deste trabalho, muitos episódios de seca, principalmente no semiárido nordestino, são relacionados apenas às condições de TSM, em especial, do Oceano Pacífico Tropical, atribuindo aos episódios de ENOS a causa de maioria dos problemas existentes no gerenciamento dos recursos hídricos na BHSF. Isso também ocorre com eventos intensos de precipitação. Os efeitos ocorridos na circulação geral da Atmosfera sob condições do fenômeno ENOS ocorrem de fato, mas, a investigação de quais condições podem ser somadas a esses eventos, que contribuem para acentuar os problemas existentes na distribuição desses recursos hídricos. Conhecendo esses fatores, pode-se ter um melhor controle e monitoramento de recursos hídricos.

5.4 Transformada de Ondaleta (TO)

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos através da Transformada de Ondaleta (TO). Conforme descrição apresentada na metodologia, o objetivo fundamental é analisar variações de energia numa série temporal e identificar modos dominantes de variabilidade que possam indicar a existência de padrões de teleconexões atmosféricas em eventos extremos na BHSF. Os espectros da TO apresentam

periodicidades distintas em tempos distintos nas diferentes regiões da Bacia. É possível identificar tais periodicidades através das figuras do Espectro de Potência de Ondaletas (EPO) pelos padrões de coloração mais intensa, havendo então uma maior energia referente aquele ciclo.

5.4.1 Transformada de Ondaleta aplicada aos valores do RAI-1, RAI-3, RAI-6 e RAI-12 para o Grupo 1 - Alto São Francisco

As Figuras 5.58, 5.59, 5.60 e 5.61 apresentam os resultados obtidos com a TO no período de 1961 a 2014, aplicada aos valores do RAI-1, RAI-3, RAI-6 e RAI-12 para o ASF, respectivamente. Na série temporal do RAI-1 apresentada na Figura 5.58a, verifica-se que os valores máximos positivos do índice tendem a diminuir a partir do ano de 1990. Com relação ao Espectro de Potência da Ondaleta (EPO) (Figura 5.58c) os picos de energia ocorrem com ciclos de 1-2 anos, entre 1975 e 1977 e entre os anos de 1982-1986. Em 1986 observa-se interações anual com a escala sazonal. Observam-se também outros ciclos, porém, indicando menor intensidade entre os anos de 2001-2005 e 2011-2013. Esses sinais com maior energia estão relacionados a chuvas acima da média na região (Figura 5.58a). O ano de 1983 foi caracterizado pela influência de um El Niño de forte intensidade e aumento das chuvas no ASF (SANTOS, 2012; GRIMM, 2009), colaborando para elevação dos níveis dos reservatórios ao longo da Bacia. O resultado mostra que o El Niño 82/83 neste ano teve uma influência maior quando comparado com os anos seguintes. A mesma variabilidade (pico de energia) não é observada em relação ao El Niño 97/98, igualmente classificado como de forte intensidade. A série também apresenta variabilidades interanuais e sazonais curtas.

O Espectro de Potência Global (EPG), apresentado na Figura 5.58c, indica as escalas com maior variabilidade no decorrer da série. A escala 0,25-0,5 anos apresenta uma significância acima de 95%, porém com menor variabilidade dentro da série. As escalas de 1-2 e 4-8 anos são predominantes nessa região da BHSF. O gráfico indica interação entre as diferentes escalas atmosféricas na ocorrência dos eventos de precipitação na BHSF, mas, ainda assim, a variabilidade anual e bianual predomina em relação às demais escalas. Resultados semelhantes foram encontrados por DA SILVA *et al.*, (2009), para o ASF com aplicação da TO no período de 1947 a 2007. No entanto, provavelmente em função da diferença nos períodos analisados, a autora detectou maior contribuição das escalas de 8-16 e acima de 16 anos. O comportamento observado a partir dos anos 2000 é semelhante ao encontrado neste trabalho.

Os resultados mostram que nos anos de 2001, 2007, 2008, 2012 e 2014, a predominância ainda é da escala 1-2 anos, apresentando ciclos com maior energia entre 2001-2004, 2007-2008 e a partir de 2011. Verifica-se também que nos anos de 2007-2014 há uma influência maior da escala 0,25-0,5 anos. Esse resultado indica que provavelmente a atuação de VCAN's nesses anos foi determinante tanto no favorecimento de ocorrência de precipitação, principalmente quando associados a sistemas como ZCIT e ZCAS, como na inibição das chuvas, quando o centro do Sistema estava sobre a região. No entanto, os resultados encontrados com as ondaletas aplicadas ao RAI ainda não mostram suficientemente a atuação de tais sistemas, sendo necessário avançar a aplicação da técnica em uma resolução temporal maior, a fim de comparar o comportamento da atmosfera nos anos específicos, em especial, em anos importantes sob o ponto de vista hidrológico.

O período de 1997/1998 foi sob influência do El Niño de intensidade forte (Tabela 4.1), no entanto, apesar dos valores positivos do RAI-1 (Figura 5.58a), não aparece de forma evidente uma interação significativa na escala de 1-2 anos para esta região, apenas uma maior frequência na escala de 0,25-0,5 anos (intrasazonal). Esse comportamento reforça a necessidade de se investigar de forma mais aprofundada os sistemas atmosféricos que atuam na região.

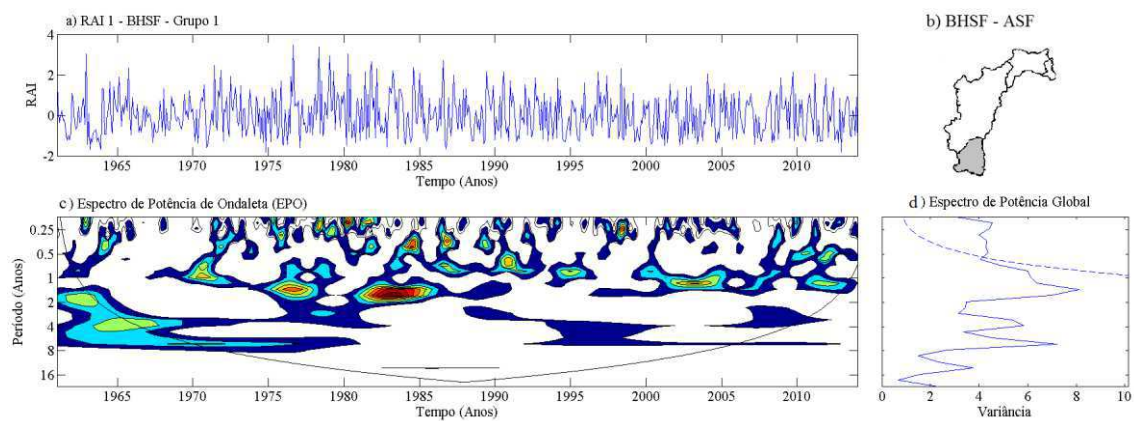


Figura 5.58: Espectro de Ondaletas da Série RAI-1 referentes às estações pertencentes ao Grupo 1 (ASF) da BHSF. a) RAI-1 - Grupo 1; b) BHSF com destaque a região do ASF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potencia Global (EPG).

No caso da TO aplicada aos valores do RAI-3 para o ASF verifica-se na série temporal do índice (Figura 5.59a), que a duração dos períodos secos e úmidos são maiores quando comparados com o RAI-1 (Figura 5.59a), resultado semelhante ao

encontrado por GUEDES (2016) com o uso do SPI em escalas a partir de três meses, aplicado aos postos pluviométricos de Pernambuco. Esse resultado é identificado também no EPO, em que os ciclos de maior energia identificados na TO aplicada ao RAI-1 aparecem intensificados e persistentes no RAI-3. A escala 0,25-0,5 que aparece na TO aplicada ao RAI-1, com significância estatística maior que 95%, não é evidente na TO aplicada ao RAI-3. No EPG aparece com maior variabilidade as escalas de 1-2 e 4-8 anos, sendo a escala de 1-2 anos é predominante com 95% de significância. Aparecem também, com menor variabilidade, as escalas 2-4 e 4-16 anos. Apesar de, essa variabilidade aparecer no EPG apresentado no RAI-1 (Figura 5.58d), os núcleos de maior energia ficam mais evidentes no EPO referente ao RAI-3 (Figura 5.59c), principalmente entre os anos de 1975-1995.

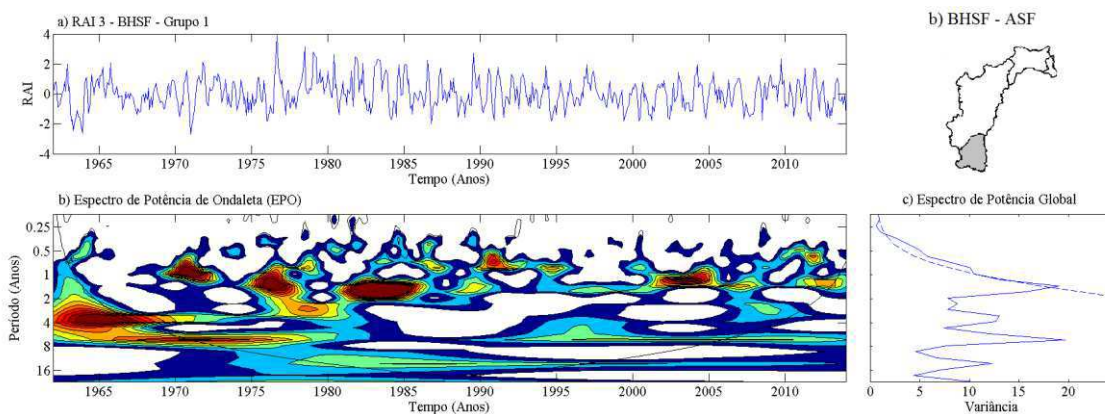


Figura 5.59: Espectro de Ondaletas da Série RAI-3 referentes às estações pertencentes ao Grupo 1 (ASF) da BHSF. a) RAI-3 – Grupo 1; b) BHSF com destaque a região do ASF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potencia Global (EPG).

Na série temporal do RAI-6, apresentada na Figura 5.60a, verifica-se que as anomalias negativas e positivas, identificadas já no RAI-1, são persistentes. Comparando os anos de 2001 e 2014, em que ocorreu a crise energética associados com os episódios de extremos de precipitação (estiagem severa) em todo o país, como também anos de colapso nos reservatórios ao longo da BHSF, verifica-se que no ano de 2001 os valores negativos do índice duraram um período menor do que os observados no ano de 2014, verificando-se que desde 2012 as anomalias são negativas nessa região da Bacia.

O EPO aparece além dos núcleos de maior energia já citados no RAI-1, núcleos intensificados presentes no RAI-3. O EPG para todo o domínio apresenta um pico significativo de energia na escala de 1-2 anos. Porém, outros picos secundários são

visíveis, por exemplo, na escala de 16-32 anos, não evidente na TO aplicada aos valores do RAI-1 e RAI-3 para o mesmo período nessa região da BHSF. Alguns estudos afirmam que períodos longos, acima de 11 anos, podem estar relacionados a ciclos de atividade solar (MOLION, 2005, DA SILVA, 2013)

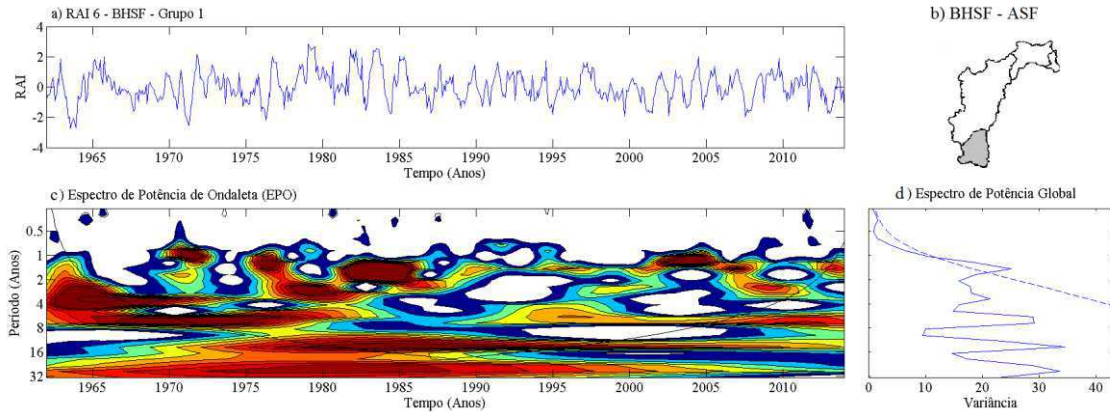


Figura 5.60: Espectro de Ondaletas da Série RAI-6 referentes às estações pertencentes ao Grupo 1 (ASF) da BHSF. a) RAI-6 – Grupo 1; b) BHSF com destaque a região do ASF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potência Global (EPG).

Os resultados da TO aplicada aos valores do RAI-12 no ASF são apresentados na Figura 5.61. Nesse caso como nas análises para o RAI-6, o EPG indica a interação entre diferentes escalas, com um pico significativo de máxima energia na escala de 2-4 anos no período de 1961 a 1965, 1980 a 1995 e 2006 a 2014. Na série temporal do RAI-12 apresentada na Figura 5.61a, observa-se que os valores máximos são menores a partir do ano de 1990. Conforme mencionado anteriormente esse padrão também é identificado na série temporal do RAI-1 (Figura 5.58a).

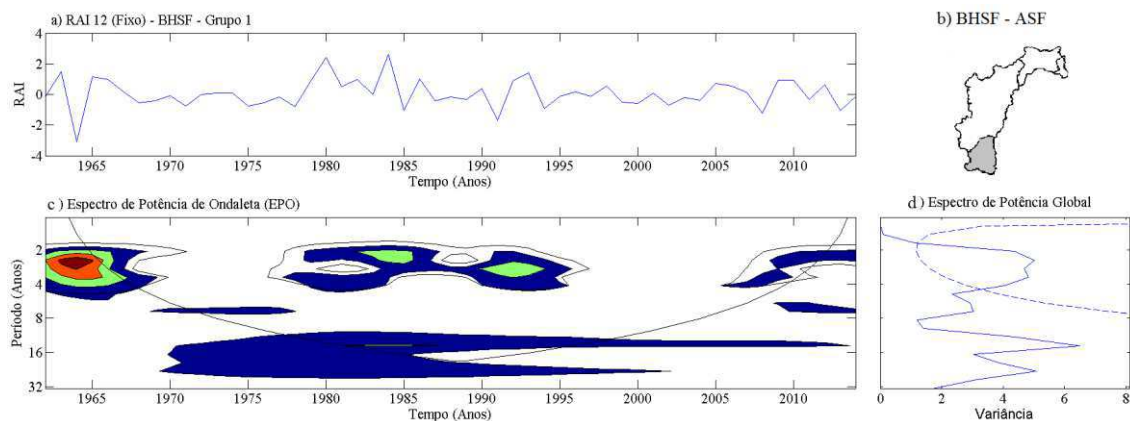


Figura 5.61: Espectro de Ondaletas da Série RAI-12 referentes às estações pertencentes ao Grupo 1 (ASF) da BHSF. a) RAI-12 – Grupo 1; b) BHSF com destaque a região do ASF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potencia Global (EPG).

5.4.2 Transformada de Ondaleta aplicada aos valores do RAI-1, RAI-3, RAI-6 e RAI-12 para o Grupo 2 - Médio São Francisco.

Os resultados da TO aplicada aos valores do RAI-1, RAI-3, RAI-6 e RAI-12, no período de 1961 a 2014, para o MSF, são apresentados nas Figuras 5.62, 5.63, 5.64 e 5.65. O padrão de comportamento nessa região é um pouco diferente do apresentado no ASF. Os valores do RAI-1 entre 1985 e 1995 são maiores quando comparados com os demais anos da série (Figura 5.62a). O EPG (Figura 5.62d) apresenta uma interação das diferentes escalas, com predominância na escala de 2-4 anos. A escala de 0,25-0,5 anos apresenta maior significância estatística, em que o mesmo foi observado para o ASF. No entanto, a escala de 1-2 anos, que aparece de forma predominante em todas as escalas analisadas para o ASF, apresenta menor variabilidade no MSF. O EPO apresenta ciclos com maior energia na escala de 0,5-1 ano aparecem ao longo da série (Figura 5.62c). Os períodos de 1975-1981, 1984-1992 e 2005-2014, apresentam interação nas diferentes escalas. O período entre 1999 e 2001 apresenta uma energia com maior variabilidade na escala de 0,5-1 ano. Entre 2012 e 2014, apesar de haver interação entre as diferentes escalas, a frequência foi menor.

É interessante notar, que o período de 1975-1990, tem sua maior energia centrada no ano de 1979. SANTOS (2012) verificou através da distribuição espacial do RAI-1, valores positivos do índice no ano de 1979 principalmente na região do MSF. Foi um ano importante do ponto de vista hidrológico, pela ocorrência de chuvas intensas e logo em seguida, uma estiagem prolongada em várias regiões da BHSF, que

foi o início de uma das secas mais prolongadas que atingiu o NEB (SANTOS, 2012). Na Figura 5.62a observam-se máximos positivos do RAI-1 para a região, indicando que as chuvas acima da média predominaram nesse ano. No ano de 1983 prevalecem picos negativos do índice na Região, o que corrobora com os resultados encontrados por SANTOS (2012). O período de 1997/1998 não aparece energia nas escalas de 1-2 anos, como esperado. O comportamento do MSF é semelhante ao observado no ASF para o RAI-1, em que a maior energia aparece na escala de 0,25-0,5 anos.

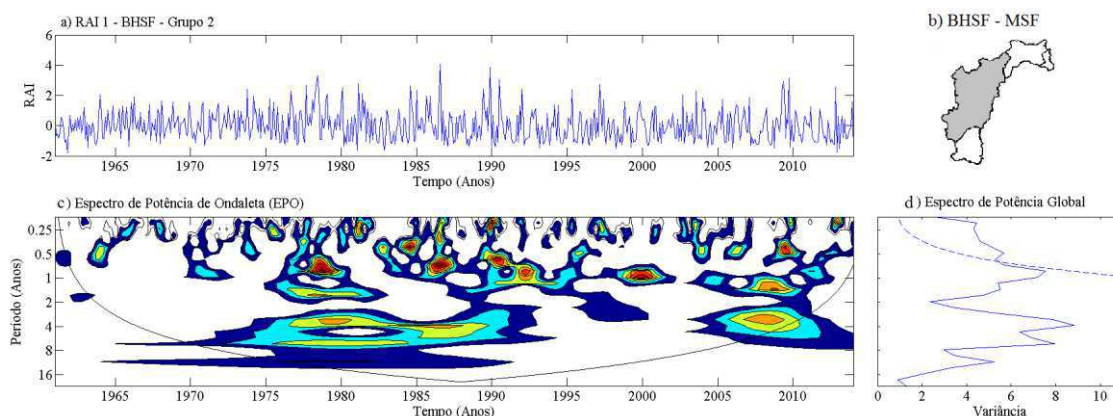


Figura 5.62: Espectro de Ondaletas da Série RAI-1 referentes às estações pertencentes ao Grupo 2 (MSF) da BHSF. a) RAI-1 – Grupo 2; b) BHSF com destaque a região do MSF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potência Global (EPG).

No período 2005-2010, a interação das diferentes escalas contém uma maior energia no EPO entre os anos de 2007/2008, com maior influência nas escalas 0,5-1, 1-2 e 4-8 anos (Figura 5.62 c, d). Os valores do RAI-1 negativos nos anos de 2012 e 2014 para o ASF e MSF, apresentados na distribuição espacial, aparecem na Figura 5.62a de forma predominante.

Na TO aplicada aos valores do RAI-3 para o MSF (Figura 5.63) verifica-se, assim como no ASF, um aumento nos períodos úmidos e secos da região. Os picos com maior energia que aparecem no RAI-1 são intensificados. A escala de 0,25-0,5 anos tem uma pequena contribuição nessa escala, comportamento que também foi observado no ASF. O EPG apresenta maior significância estatística na escala de 0,5-1 ano, e interações com maior variabilidade as escalas de 2-4, 4-8 e 8-16 anos.

No biênio 2007/2008, os valores do RAI-3 são predominantemente negativos (Figura 5.63a) e a influência das diferentes escalas neste período, identificada na TO do RAI-3 aparece intensificada (Figura 5.63c). O mesmo é observado entre os anos de

2010 e 2014. No período de 1999-2001, além da influência da escala de 0,5-1 ano, aparece um ciclo de energia na escala de 2-4 anos. Para o período de 1997/1998 aparece a escala 2-4 e 4-8 anos com maior energia.

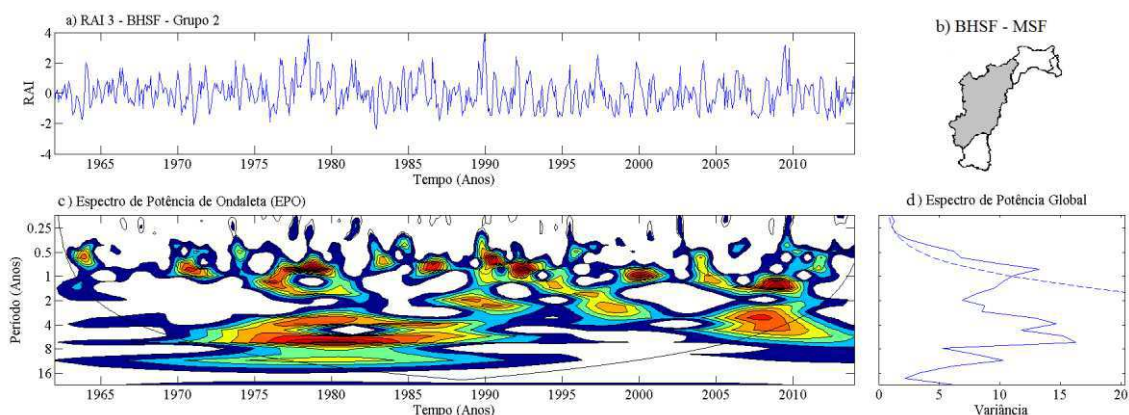


Figura 5.63: Espectro de Ondaletas da Série RAI-3 referentes às estações pertencentes ao Grupo 2 (MSF) da BHSF. a) RAI-3 – Grupo 2; b) BHSF com destaque a região do MSF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e c) Espectro de Potencia Global (EPG).

A TO para o RAI-6 (Figura 5.64) verifica-se também que os períodos secos e úmidos com uma maior duração na sua série temporal (Figura 5.64a). O EPG apresenta maior variabilidade na escala de 4-8 anos, e de forma secundária, nas escalas 0,5-1, 1-2, 8-16 e 16-32 anos. A escala de 0,25-0,5 anos não aparece com variabilidade significativa nessa escala do índice e a escala de 0,5-1 ano aparece com maior significância estatística (95%), porém com menor variância, predominando a escala anual.

O ano de 2001 apresenta valores negativos do RAI-6. O mesmo é observado para o biênio 2007/2008 e também no período de 2012 a 2014. Comparando o ano 2000/2001 com 2012 a 2014, verifica-se que a seca hidrológica dos últimos anos foi mais longa também no MSF. Comparando com o ASF, a interação das diferentes escalas na TO aplicada ao RAI-6 mostrou-se maior do que no MSF.

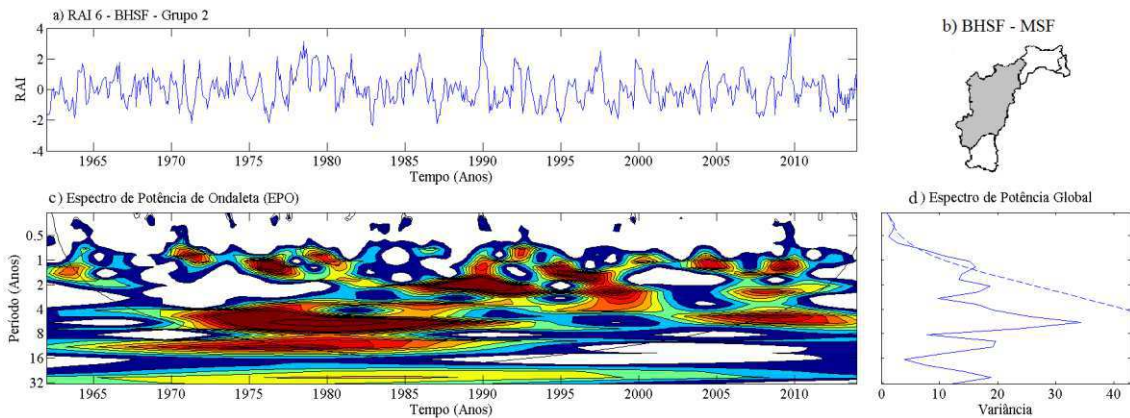


Figura 5.64: Espectro de Ondaletas da Série RAI-6 referentes às estações pertencentes ao Grupo 2 (MSF) da BHSF. a) RAI-6 – Grupo 2; b) BHSF com destaque a região do MSF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potencia Global (EPG).

Analisando a TO para o RAI-12, no MSF (Figura 5.65), há uma interação das diferentes escalas com maior variabilidade na escala de 2-4 anos em 1987 a 1994. Verifica-se através da série, que a duração dos períodos secos é bem maior e evidente, principalmente nos anos de 2001, 2012 e 2014. Apesar deste resultado ser semelhante com o resultado encontrado para a TO na mesma escala para o ASF, os anos com maior energia são diferentes, a exemplo do ano de 2012 a 2014, em que no ASF existe uma interação maior de três escalas, enquanto o mesmo não pode ser observado no MSF no mesmo período, em que prevalece maior energia nas escalas de 2-4 anos.

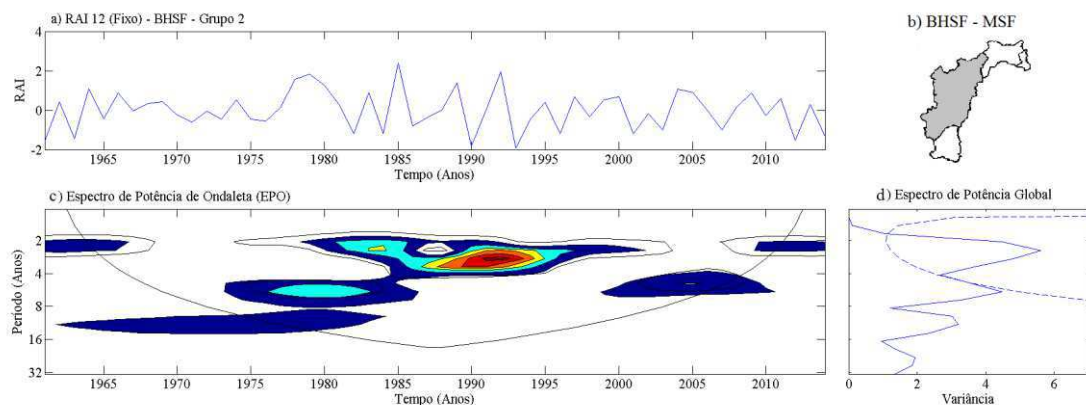


Figura 5.65: Espectro de Ondaletas da Série RAI-12 referentes às estações pertencentes ao Grupo 2 (MSF) da BHSF. a) RAI-12 – Grupo 2; b) BHSF com destaque a região do MSF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potencia Global (EPG).

A partir de 1990, assim como observado no ASF, os valores máximos positivos diminuem. De acordo com Molion (2005), a partir do ano 1999 a atmosfera entrou na fase fria da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP), e conseqüentemente, até o ano de 2025 espera-se uma maior quantidade de eventos La Niña. De fato, de 1999 até o ano 2015, os índices indicados na Tabela 4.1 apresenta um maior número de valores negativos do Oceano Pacífico, indicando maior ocorrência do fenômeno La Niña. Com este resultado, para a região do ASF, espera-se uma diminuição na quantidade de precipitação em anos sob a influência deste fenômeno. No entanto, para a região semiárida da Bacia, situada no Nordeste do Brasil, é esperado um comportamento contrário, com um aumento das precipitações ou uma melhor distribuição da precipitação. Esse comportamento dos anos úmidos em relação à quantidade de anos secos estaria em desacordo com o esperado, devendo ser investigado.

Como visto uma significância estatística maior na escala 0,25-0,5 anos, há uma necessidade de investigar de forma mais aprofundada também para essa região a influencia desta escala nos anos importantes sob o ponto de vista hidrológico, verificando quais comportamentos atmosféricos foram determinantes na diminuição da precipitação.

5.4.3 Análise de Ondaleta aplicada aos valores do RAI-1, RAI-3, RAI-6 e RAI-12 para o Grupo 3 – Submédio São Francisco.

Para o Grupo 3 (SSF), a TO aplicadas aos valores do RAI-1 apresentada na Figura 5.66, mostra um comportamento diferente das regiões do ASF e MSF. A escala 0,25-0,5 anos aparece também com 95% de significância estatística, estando relacionada aos sistemas atmosféricos atuantes, apesar de menor variabilidade. Porém, as escalas predominantes na precipitação dessa região são 4-8 e 8-16 anos. O período de 1967 a 1997 tem maior influência na variabilidade decadal. Os períodos 1975-1979, 1983-2004 e 2007-2014, apresentam maior energia nas escalas de 4-8 anos, anual e sazonal. Os anos de 2001, 2007, 2008, 2012 e 2014 apresentam valores negativos do índice na série (Figura 5.66a). Nesta região não se observa influência significativa na escala 1-2 anos nos anos de 1997 e 1998. A Figura 5.66a apresenta valores positivos do RAI-1 em 1997, e posteriormente, valores negativos.

É interessante notar a presença de um pico positivo no ano de 2004 (Figura 5.66a), ano em que ocorreram cheias e inundações no MSF e SSF, e as chuvas intensas foram centradas principalmente no mês de janeiro. SANTOS (2012), na distribuição

espacial do RAI-1 para o ano de 2004, encontrou valores positivos próximos de 7 na maior parte da região, principalmente no mês de janeiro. O EPO apresenta picos com maior energia nas escalas de 0,25-0,5 anos e 4-8 anos, indicando que as escalas responsáveis pelas chuvas para essa região nesse período foram intra-sazonal, semi-anual e bianual. Neste ano, em especial, a atuação de VCAN's associados à ZCAS foram responsáveis pela precipitação acima da média na BHSF.

No biênio 2007/2008, apresenta maior variabilidade e ciclos com maior energia também nas escalas 0,25-0,5; 1-2; 4-6 e 8-10 anos, mostrando interação entre as diferentes escalas. Valores negativos do RAI-1 podem ser observados na variabilidade temporal para o ano de 2012 e 2014, indicando que a região foi seca nesse período. A escala predominante dos anos de 2012 a 2014 foi de 4-8 anos.

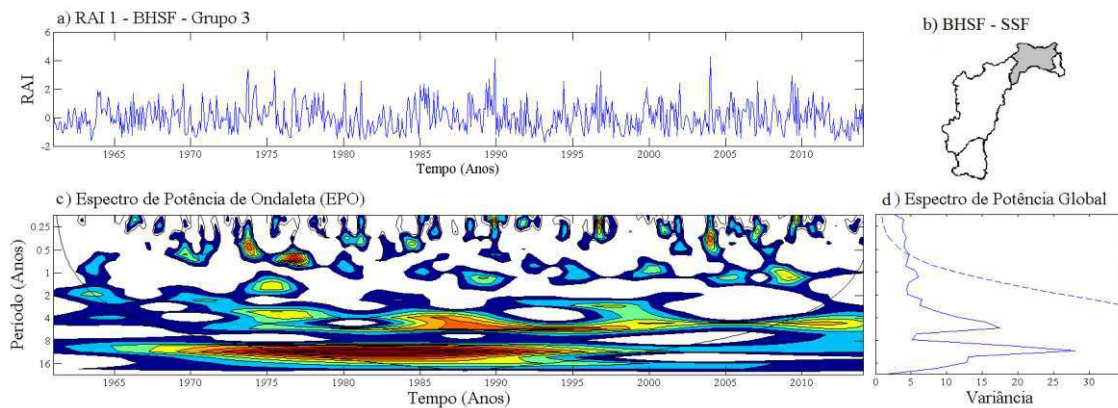


Figura 5.66: Espectro de Ondaletas da Série RAI-1 referentes às estações pertencentes ao Grupo 3 (SSF) da BHSF. a) RAI-1 – Grupo 3; b) BHSF com destaque a região do SSF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espetro de Potencia Global (EPG).

A TO aplicada ao RAI-3 para o SSF é apresentada na Figura 5.67. As escalas predominantes evidentes no RAI-1 aparecem no RAI-3 com maior frequência anual. Verifica-se a duração da seca nos últimos anos para essa região nesta escala foi maior, já sendo observada a partir de 2011, com valores negativos do índice predominantes. As escalas de 4-8 e 8-16 anos aparecem no EPO (Figura 5.67c) em praticamente toda a série, e com maior significância estatística aparece a escala de 1-2 anos (Figura 5.67d).

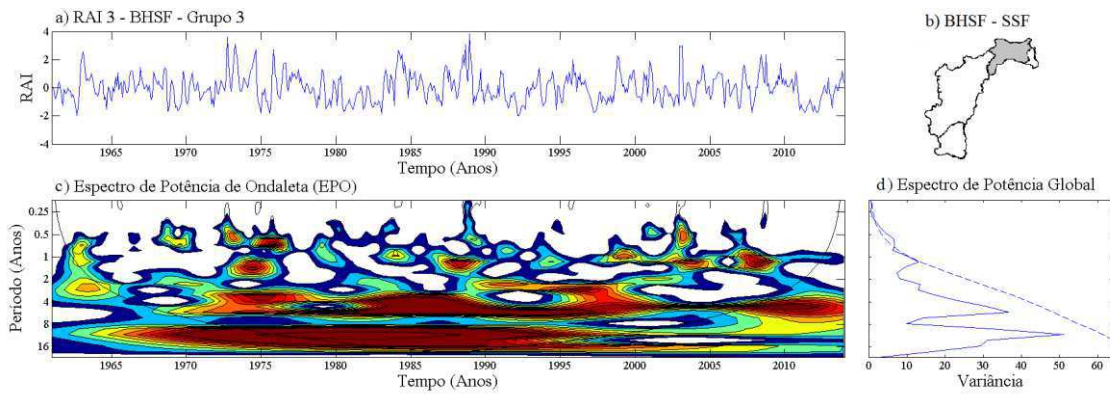


Figura 5.67: Espectro de Ondas da Série RAI-3 referentes às estações pertencentes ao Grupo 3 (SSF) da BHSF. a) RAI-3 – Grupo 3; b) BHSF com destaque a região do SSF; c) Espectro de Potência de Ondas (EPO) e d) Espectro de Potência Global (EPG).

Na escala de seis meses (RAI-6), a série temporal (Figura 5.68a) apresenta períodos de seca maiores quando comparados com o ASF e MSF. A escala de 16-32 anos não aparece com variabilidade significativa quando comparada com as escalas 4-8 e 8-16 anos (Figura 5.68d), e o mesmo é observado com o aumento da frequência no EPO (Figura 5.68c). As escalas de 1-2, 4-8 e 8-16 anos aparecem com significância estatística acima de 95%, diferente das regiões do MSF e ASF.

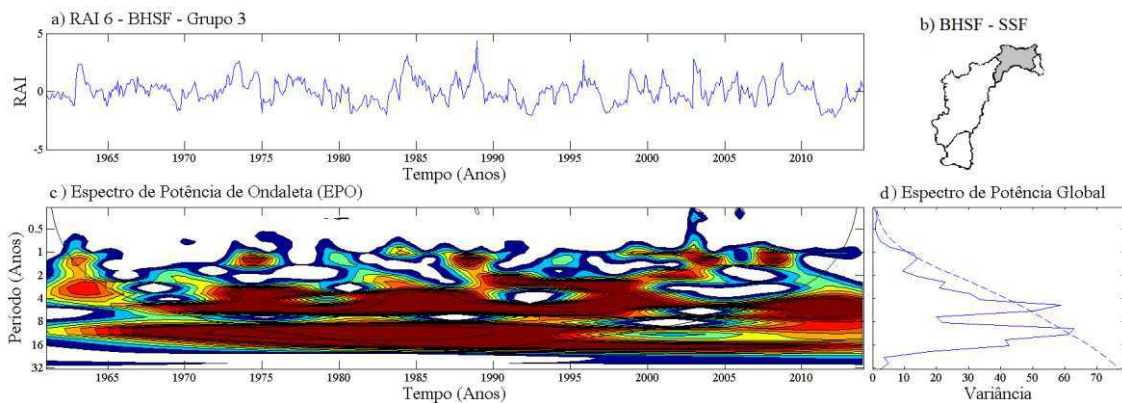


Figura 5.68: Espectro de Ondas da Série RAI-6 referentes às estações pertencentes ao Grupo 3 (SSF) da BHSF. a) RAI-6 – Grupo 3; b) BHSF com destaque a região do SSF; c) Espectro de Potência de Ondas (EPO) e d) Espectro de Potência Global (EPG).

Para o RAI-12, a TO apresenta energia predominante na escala de 8-16, 8-10 e 2-4 anos (Figura 5.69c), assim como verificado para o RAI-1, RAI-3 e RAI-6. A maior significância estatística aparece nas escalas de 2-4 e 4-8 anos. No EPO, o período entre

1985 e 1990 apresenta uma maior energia nas escalas de 2-4 e 8-10 anos (Figura 5.69c). A partir de 2011, assim como no RAI-6, os valores negativos do RAI-12 são predominantes (Figura 5.69a). Também existe uma diminuição nos valores máximos observados na década de 1990, comportamento também observado no ASF e MSF.

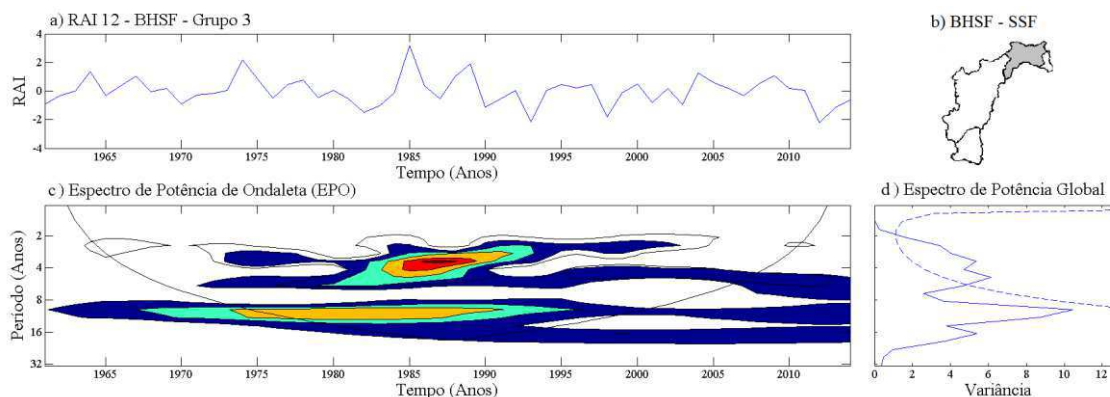


Figura 5.69: Espectro de Ondaletas da Série RAI-12 referentes às estações pertencentes ao Grupo 3 (SSF) da BHSF. a) RAI-12 – Grupo 3; b) BHSF com destaque a região do SSF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potencia Global (EPG).

5.4.4 Análise de Ondaleta aplicada aos valores do RAI-1, RAI-3, RAI-6 e RAI-12 para o Grupo 4 – Baixo São Francisco.

A TO aplicada ao RAI-1 para a o Grupo 4(BSF) é apresentada na Figura 5.70. A escala predominante no comportamento da precipitação para essa região da BHSF é a de 8-16 anos (decadal), conforme mostrado no EPO (variâncias) maior energia no período de 1961 a 1995. Esse resultado é semelhante ao estudo feito por DA SILVA & GALVÍNCIO (2011), que utilizaram índices de precipitação no BSF, com o objetivo de verificar a influência da ODP na precipitação, e verificaram que a variabilidade decadal predomina sobre as outras escalas temporais nessa região. A escala de 0,25-0,5 anos aparece também nessa região com maior energia.

O ano de 2001, os valores do RAI-1 no BSF no período de junho a agosto (Figura 5.4) são positivos, período chuvoso da região. Nesse período o EPO apresenta núcleos com maior energia nas escalas de 2-4 e 1-2 anos. O biênio 2007/2008 apresenta maior variabilidade com núcleos de maior energia nas escalas de 1-2 anos. O período de 2012 a 2014 apresentam maior variabilidade nas escalas de 2-4 anos, e são evidentes os valores negativos a partir de 2011, assim como no SSF.

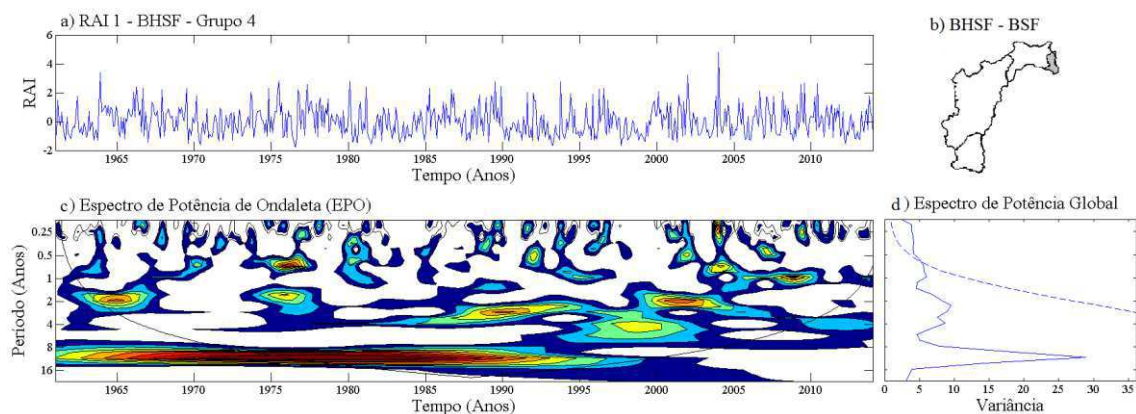


Figura 5.70: Espectro de Ondaletas da Série RAI-1 referentes às estações pertencentes ao Grupo 4 (BSF) da BHSF. a) RAI-1 – Grupo 4; b) BHSF com destaque a região do BSF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potencia Global (EPG).

A TO aplicada ao RAI-3 é apresentada na Figura 5.71. O EPG continua mostrando maior variabilidade na escala de 8-16 anos, e a escala de 2-4 anos também aparece próxima à curva de 95% de significância. Os núcleos com maior energia são intensificados no EPO (Figura 5.71c). O período chuvoso da região é diferente das demais regiões da BHSF. Porém, em termos de influência atmosférica, o SSF e o BSF são semelhantes, com predominância da escala de 8-16 anos (decadal) sobre as demais escalas. O SSF ainda existe uma influência do Oceano Atlântico na precipitação proveniente dos Sistemas Atmosféricos que atingem o BSF. No SSF ainda há uma influência maior da escala de 4-8 anos, o que não ocorre com a mesma variabilidade no BSF.

Os valores do RAI-3 para o BSF para o ano de 2001 foram negativos no período chuvoso, e os valores positivos foram a partir do período junho/agosto. No período de 2001-2005 houve interação das diferentes escalas nessa região, mas a maior energia é concentrada na escala de 1-2 anos. No biênio 2007/2008 os valores do RAI-3 são positivos na região (Figura 5.71a). Essa região, por ter uma grande influência no transporte de umidade proveniente do Oceano Atlântico, o comportamento do índice mostra-se um pouco diferente, e isso foi observado na distribuição espacial do RAI-3 nos anos de 2007 e 2008 que, mesmo sendo uma escala que mostrava seca no SSF, o BSF não houve um impacto tão significativo no acumulado das chuvas em três meses durante este ano.

No ano de 2012, tanto para o SSF quanto para o BSF, os valores do RAI-3 foram negativos em todos os trimestres analisados. Em ambas as regiões, a escala que teve maior influência na variabilidade das chuvas foi de 2-4 anos, principalmente nas décadas de 80, 90 e começo de 2000 (Figura 5.67c), em que é possível verificar no EPO maior energia. Esse comportamento no EPO se estende até o ano de 2014. No ano de 2014 os valores do RAI-3 são positivos no BSF (Figura 5.71a), com uma contribuição da escala de 0,5-1 ano na região com maior significância estatística (Figura 5.71d).

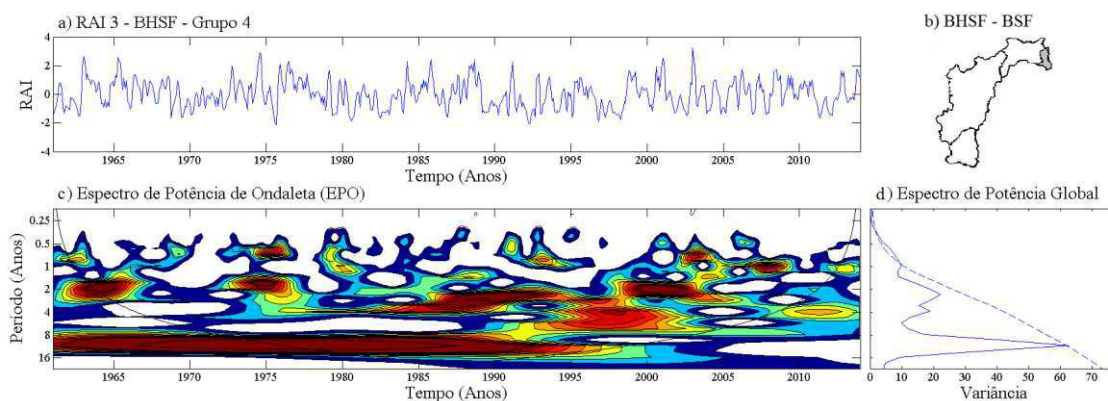


Figura 5.71: Espectro de Ondaletas da Série RAI-3 referentes às estações pertencentes ao Grupo 4 (BSF) da BHSF. a) RAI-3 – Grupo 4; b) BHSF com destaque a região do BSF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potencia Global (EPG).

Para a TO aplicada ao RAI-6, no BSF, a escala decadal continua prevalecendo entre as outras escalas, sendo a maior variabilidade e com maior significância estatística, em seguida se verifica a escala de 2-4 e 8-16 anos (Figura 5.72c, d). Verifica-se, assim como nas demais regiões, que a duração dos períodos secos e úmidos é maior quando comparada com o RAI-1 e RAI-3. Nos anos de 2001, 2007, 2008, 2012 e 2014 o EPO mostra a interação das diferentes escalas superiores a anual (Figura 5.72c). No ano de 2001 há uma maior energia com influência nas escalas 1-2, 2-4 e 4-8 anos interagindo com escalas maiores de 1987-2014. A partir do ano de 2005, o comportamento da série é influenciado pelas diferentes escalas com núcleos de menor energia.

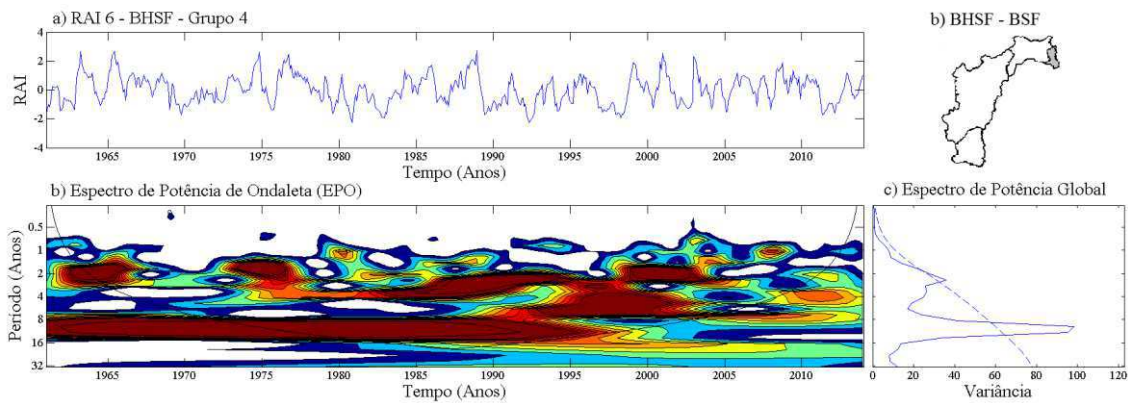


Figura 5.72: Espectro de Ondaletas da Série RAI-6 referentes às estações pertencentes ao Grupo 4 (BSF) da BHSF. a) RAI-6 – Grupo 4; b) BHSF com destaque a região do BSF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potencia Global (EPG).

O comportamento do RAI-12 (Figura 5.73) para o BSF é muito parecido com o SSF, mostrando que os anos secos e úmidos são os mesmos em ambas as regiões (Figura 5.71a). Porém, o EPO mostra um comportamento um pouco diferente entre as duas regiões. A partir dos anos 2000, a interação das diferentes escalas desaparece no EPO. Os anos de 2012 a 2014 foram secos em ambas as regiões. No BSF predomina a escala de 8-16 anos, e a escala de 2-4 anos aparece com menor variabilidade. Porém, ambas apresentam significância estatística acima de 95%, o que não ocorre no SSF.

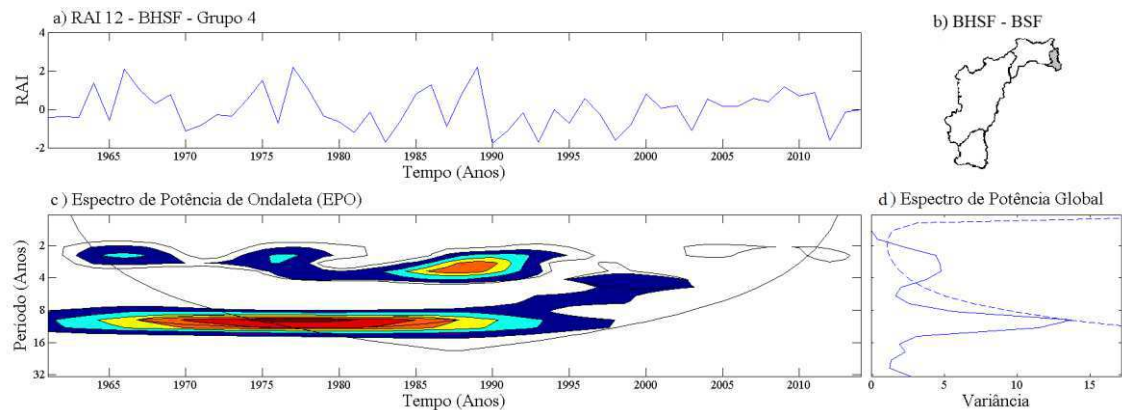


Figura 5.73: Espectro de Ondaletas da Série RAI-12 referentes às estações pertencentes ao Grupo 3 (BSF) da BHSF. a) RAI-12 – Grupo 4; b) BHSF com destaque a região do BSF; c) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e d) Espectro de Potencia Global (EPG).

Verifica-se através desta técnica, que em anos sob a influência de El Niño ou La Niña, o comportamento da precipitação nas diferentes regiões da BHSF é diferente. Esse resultado sugere a uma reflexão em relação aos efeitos do ENOS sobre a Bacia. Esperava-se um aumento na quantidade de chuvas pelo menos na região Semiárida da Bacia nos últimos anos (2000 a 2014), e todos os resultados mostraram que os máximos não foram tão extremos quando comparados aos anos que antecedem 1990. Como sugerido por MOLION (2005), o estudo não foi centrado apenas nos períodos da normal climática de 1961 a 1990. Assim, os resultados mostraram uma variabilidade climática diferente do que seria esperado na fase positiva da ODP na BHSF.

5.4.5 Análise de Ondaleta aplicada aos valores das cotas de Três Marias no ASF e Sobradinho no MSF.

A TO aplicada aos valores das cotas de Três Marias, no período de 1998 a 2015, é apresentada na Figura 5.74. Os menores valores das cotas aparecem nos anos de 2001, 2014 e 2015. Na Figura 5.74a verificam-se os períodos entre 1999 a 2004 e 2013 a 2015 apresentam valores de cotas mínimos. Entre 2005 e 2012, os valores das cotas foram maiores. Em todo o período analisado, o EPO apresenta que houve uma interação das diferentes escalas 1-2, 2-4, 4-8 e 8-16 anos, sendo a escala de 8-16 anos predominante. Não houve nesse período analisado a interação das escalas interanual e semianual. O período de 1998 a 2004 há uma interação com maior energia na escala de 1-2 anos. Nos anos de 2013 a 2015 há uma menor energia na escala de 1-2 anos, e uma intensificação na escala 4-8 anos (Figura 5.74b). O EPG mostra uma predominância na escala de 8-16 anos sobre as demais escalas e também apresenta a escala de 1-2 anos com significância em torno de 95%.

Os resultados apresentados da TO para o reservatório de Três Marias, no ASF, é um pouco diferente dos resultados encontrados por DA SILVA (2013). Ao aplicar a TO aos valores de índices de cotas nas diferentes sub-bacias do São Francisco no período de 1938 a 2010, as análises feitas em Várzea da Palma, no ASF, mostravam que a interação das diferentes escalas, ou seja, a interanual, interanual curta, escala de 2 anos ligada ao ENOS, escala de 7 anos como sinal persistente de ENOS, escala decadal de 11 e 22 anos, havia um favorecimento ao aumento no nível do rio nessa região, devido a união de vários fenômenos meteorológicos. Os resultados encontrados neste trabalho mostraram no período analisado, que a união de vários sistemas meteorológicos,

fizeram com que os valores das cotas fossem diminuindo, em especial nos anos de 2013 até 2015.

Neste estudo, assim como em DA SILVA (2013b), a escala 8-16 anos é predominante em todo o período em relação às demais escalas. Esse resultado também foi encontrado por LOPES (2014). O ano de 2015 foi um ano sob atuação do fenômeno El Niño com intensidade forte. DA SILVA (2013a) mostrou que os valores das cotas em anos de El Niño tendem a ser maiores ao longo da BHSF do que os observados em anos de La Niña. O resultado encontrado neste trabalho estaria em desacordo com os resultados de DA SILVA (2013a). Em 2014 a precipitação no ASF vinha diminuindo, devido à ausência de chuvas, o que acarretou em uma queda acentuada no nível do rio no ASF, visível na Figura 79a. Apesar de não ter os dados de precipitação para o ano de 2015, LOPES (2014) verificou em seus resultados que a precipitação no ASF está totalmente dependente das oscilações atmosféricas que causam variabilidade na precipitação, e conseqüentemente, a vazão também é afetada diretamente pelo comportamento da precipitação.

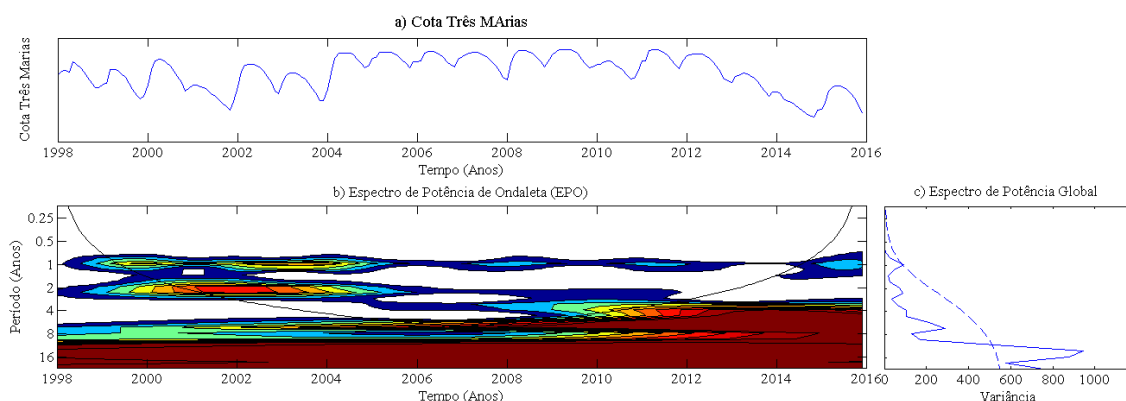


Figura 5.74: Espectro de Ondaletas referente aos valores das Cotas do reservatório de Três Marias, situado no ASF. a) Cotas Três Marias, b) Espectro de Potência de Ondaleta (EPO) e c) Espectro de Potencia Global (EPG).

A TO aplicada aos valores das cotas de Sobradinho, no mesmo período é apresentada na Figura 5.75. O comportamento dos valores máximos e mínimos em Sobradinho é semelhante ao comportamento apresentado em Três Marias (Figura 5.75a). Os anos que os valores do reservatório de Três Marias apresentam valores máximos (mínimos) são os mesmos para Sobradinho, e a maior diferença se encontra a partir do ano de 2013. Nos anos de 2014 e 2015 essa mudança é bem mais evidente, em que o reservatório de Três Marias tem uma queda em seus valores máximos e

Sobradinho apresenta um comportamento similar ao de 2013. No ano de 2014, ano em que as principais nascentes no ASF secaram, é esperado esse comportamento no reservatório de Três Marias.

Até o ano de 2012, o comportamento de ambos os reservatórios serem regulados foram de forma semelhante, o que é um tanto quanto peculiar, visto que existe uma distância geográfica entre ambos, havendo modificações antrópicas consideráveis ao longo dos anos e também atuação de sistemas atmosféricos diferentes em ambas as regiões. No entanto, esse comportamento mostra que o controle dos reservatórios foi feito de forma similar até o ano de 2013, considerando os mesmos aspectos físicos e climáticos, como também a contribuição maior das chuvas no ASF para os reservatórios a jusante.

O EPO (Figura 5.75b) apresenta um comportamento semelhante ao de Três Marias, com interação das diferentes escalas. Entre 1998 e 2004, que os valores do reservatório também foram menores, verifica-se a interação das escalas 1-2, 2-4, 4-8 e 8-16 anos. O EPG (Figura 5.75c) mostra a interação das diferentes escalas, com predominância na escala 8-16 anos, de forma semelhante a Três Marias, e também com 95% de significância, porém, menor influência, a escala de 1-2 anos. A interação das escalas de 2-4 anos e 4-8 anos aparece com maior intensidade do que em Três Marias.

Apesar dos valores encontrados em Sobradinho, situado no MSF, os resultados encontrados neste estudo são semelhantes aos encontrados por DA SILVA (2013), no SSF, em que a TO foi aplicada aos valores de índice de cota de Manga, no MSF, e em Juazeiro, no SSF. A escala predominante no SSF é de 8-16 anos seguida da escala de 1-2 anos, e o mesmo é observado para Sobradinho. No MSF, a predominância encontrada por DA SILVA (2013), foi nas escalas de 8-16 e 4-8 anos. Esse resultado mostra que o comportamento de Sobradinho, apesar de estar situado no MSF, é muito semelhante do SSF, tendo como maior influência os sistemas atmosféricos atuantes nesta região. Esse resultado corrobora com os resultados encontrados por LOPES (2014) que verificou que a vazão, tanto no ASF quanto no SSF, tem como principal causa a variabilidade dos sistemas atmosféricos.

A comparação dos valores das cotas de Três Marias e Sobradinho, nos anos de 2001, 2014 e 2015 é apresentada na Figura 5.76. No ano de 2001, o comportamento das cotas de Três Marias e Sobradinho foi semelhante, mostrando que, à medida que o reservatório de Três Marias diminuía seu volume, o mesmo ocorria em Sobradinho. Nos anos de 2014 e 2015, esse comportamento é um pouco diferente. Em 2014, ano no qual

as principais nascentes do São Francisco secaram, verifica-se que as cotas de Três Marias diminuíram na mesma proporção que observado em 2001 (Figura 5.76a). Porém, em 2014, os valores de Sobradinho são maiores do que no ano de 2001, e se comportam sazonalmente como o esperado, apesar de estarem abaixo da média como foi mostrado na seção do RAI-6 para o ano de 2014.

Em 2015, ano de atuação do fenômeno El Niño, em que se espera que os valores das cotas dos reservatórios do São Francisco sejam maiores, fato que ocorreu em 1983, não acontece da forma esperada. Os valores das cotas em Sobradinho foram ainda menores do que no ano de 2001, e esse comportamento é visível na Figura 5.76b. Esse resultado além de estar em desacordo com DA SILVA 2013, que afirma que em anos de El Niño, os valores das cotas tendem a serem maiores ao longo da BHSF, porque ocorre um aumento da precipitação na nascente do Rio São Francisco.

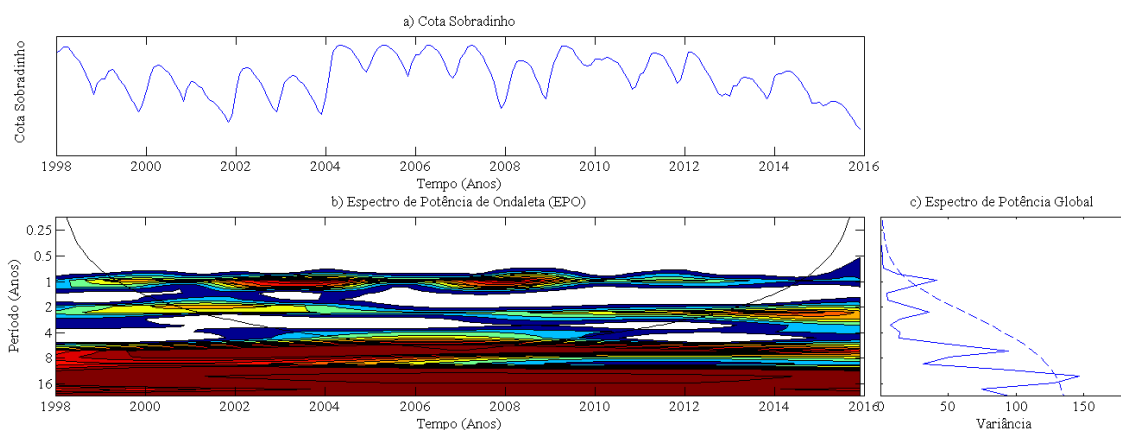


Figura 5.75: Espectro de Ondaletas referente aos valores das Cotas do reservatório de Sobradinho, situado no MSF. a) Cotas Sobradinho, b) Espectro de Potência de Ondaleta e c) Espectro de Potencia Global.

Nesse caso, a ação antrópica, associada aos fatores climáticos observados a partir de 2012, tiveram uma grande interferência no comportamento das cotas de ambos os reservatórios. Por um lado, ambos estavam com sua capacidade bem menor, e isso veio a piorar em 2015 com a diminuição das chuvas, mas esse cenário já vinha sendo observado desde 2012. Como o ano de 2014 foi um ano seco em toda a BHSF, houve a necessidade de em 2015, apesar das chuvas ocorridas no ASF, a vazão do reservatório de Três Marias ser retida, a fim de tentar manter o aporte para as diversas necessidades da região, em especial a geração de energia elétrica e irrigação. Sendo assim, com a seca no Nordeste, em especial na região semiárida, dois fatores fizeram com que o reservatório de Sobradinho diminuísse seu volume ainda mais do que o observado em

2001: A demanda pela água aumentado devido à seca e a diminuição da vazão recebida a montante do reservatório.

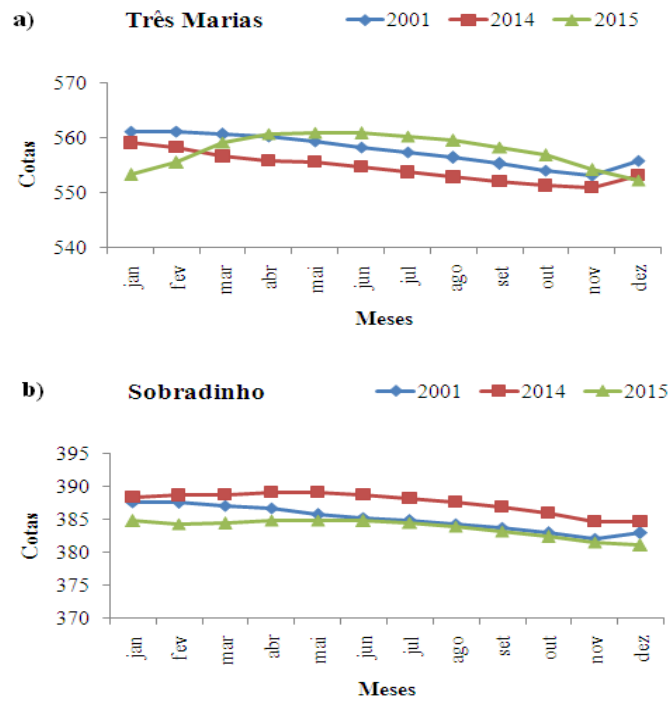


Figura 5.76: Comparação das cotas dos reservatórios do Rio São Francisco nos anos de 2001, 2014 e 2015. a) Três Marias; b) Sobradinho.

6. CONCLUSÕES

6.1 Preenchimento de falhas de dados de precipitação

A utilização da técnica de Regressão Linear Múltipla no preenchimento de falhas dos dados de precipitação na BHSF, utilizando dados de reanálise da UDEL se mostrou eficiente, e foi possível comprovar a consistência dos dados preenchidos através da técnica de dupla massa, sendo essa uma opção no preenchimento de falhas de dados hidrológicos. A boa qualidade dos dados mostrou que poucas estações obtiveram mudanças no alinhamento, essas devido a alterações nas condições climáticas ou físicas no local. Não houve nos resultados dessa análise alinhamento de pontos em retas paralelas ou em dispersão de dados, que impedisse o preenchimento das mesmas.

6.2 Utilização do Índice RAI nas diferentes escalas

Os resultados da aplicação do RAI nas diferentes escalas para a BHSF se mostraram eficientes, não apenas na escala mensal (RAI-1), como em estudos anteriores já comprovaram (SANTOS, 2008; SANTOS, 2011; SANTOS, 2012), como também mais uma ferramenta que pode ser utilizada para monitorar os diferentes tipos de seca nas escalas três meses e seis meses, principalmente a seca hidrológica. Foi possível identificar através desta ferramenta a recorrência de sistemas atmosféricos que atuam na BHSF inibindo e favorecendo a ocorrência de precipitação, em conjunto com a análise sinótica.

As diferentes escalas do RAI também mostraram de forma eficiente a área atingida pela seca, fortalecendo resultados anteriores de que valores indicativos de anos secos na região semiárida da bacia hidrográfica atingem extensões relativamente maiores do que no caso dos anos úmidos. Esse resultado explica porque o fenômeno das secas é considerado bem mais danoso para a economia da região do que os eventos de cheias, apesar dos prejuízos substanciais causados por inundações.

A utilização do RAI-3 permitiu compreender o comportamento da seca em um período curto, geralmente utilizado para seca agrícola, que pode afetar na produção de diversos tipos de culturas que utilizam tal monitoramento.

A utilização do RAI-6 mostrou que pode ser usado de forma eficiente para o monitoramento de períodos de estiagens longos, em especial a seca hidrológica, que afeta diretamente nos níveis dos reservatórios da BHSF. Foi possível comparar através

desta escala tanto a área afetada pela seca como também a resposta de tal evento em relação aos níveis dos principais reservatórios da Bacia.

É importante dar continuidade este estudo utilizando o RAI em escalas maiores, como já é feito por outros índices que são utilizados como indicadores no Monitor de Secas do Nordeste, a exemplo do SPI e SPEI.

A comparação do comportamento do RAI nas diferentes escalas permite entender melhor a resposta da região afetada pela seca se feito o monitoramento contínuo.

A obtenção do RAI com cálculos simples continua representando uma ferramenta de grande utilidade no auxílio do monitoramento e gerenciamento de danos associados com ocorrência de inundações ou estiagens severas, como também, sua utilização em diferentes escalas.

6.3 Transformada de Ondaleta aplicada aos valores do RAI nas diferentes escalas.

A TO aplicada aos valores do RAI em escalas permitiu evidenciar quais as principais escalas responsáveis pela variabilidade da precipitação nas diferentes regiões da Bacia.

O comportamento dos anos conhecidos pelos acontecimentos extremos de chuva é identificado de forma eficiente na TO aplicada ao RAI, e aparecem nas diferentes escalas em todas as regiões da BHSF. Os resultados reforçaram a importância da escala intrasazonal no comportamento da precipitação, mostrando maior significância estatística. Anos sob influência do ENOS mostraram comportamento diferentes nas diferentes regiões homogêneas de precipitação da BHSF. Tal comportamento foi observado também na evidência do sinal de El Niño forte nos anos de 1982/1983 e 1997/1998, em que a frequência maior na escala de 1-2 anos é identificada apenas em 1982/1983.

As regiões que englobam as estações que abrangem o Grupo 1 (ASF) e o Grupo 2 (MSF), mostraram que os padrões anuais e decadais modulam a precipitação. Nos Grupos 3 (SSF) e 4 (BSF), predominou a escala decadal em todas as análises, como fator modulador de precipitação.

A TO aplicada ao RAI-1 mostrou que os fatores de grande escala e menor frequência, modulam a atuação dos sistemas atmosféricos, mas, a atuação desses sistemas é determinante no comportamento da precipitação. Padrões encontrados em

trabalhos anteriores mostraram uma importante atuação dos VCAN's associados a outros sistemas atmosféricos, que dependendo do seu posicionamento e interação, podem inibir ou favorecer a precipitação nas diferentes regiões da Bacia nos anos analisados, no entanto, é necessário aumentar a resolução temporal (diária ou horária) para verificar quais os principais fatores atmosféricos que influenciaram no comportamento da precipitação, em especial, em anos críticos sob o ponto de vista hidrológico.

A TO aplicada aos valores do RAI-3, RAI-6 e RAI-12 permite identificar o aumento da frequência de determinados eventos extremos, e, conseqüentemente, o porquê desses eventos terem uma intensidade significativa em determinados anos, em especial, nos anos analisados neste trabalho.

A TO aplicada às três regiões homogêneas de precipitação confirma as regiões encontradas a partir da aplicação da Análise de Agrupamentos. Apesar de coincidir o período chuvoso no ASF e MSF, a análise permite perceber que a precipitação de maneira geral tem respostas diferentes em cada ano para cada região da Bacia.

Analisando os anos de eventos críticos ao longo da Bacia, verifica-se a importância do monitoramento contínuo de fenômenos de diferentes escalas, favorecendo uma melhor gestão dos recursos hídricos disponíveis na Bacia.

6.4 Transformada de Ondaleta aplicada aos valores das Cotas de Três Marias e Sobradinho.

Aplicar a TO aos valores das cotas permitiu comparar o comportamento dos principais fatores climáticos que atuam nos diferentes regimes de precipitação ao longo da Bacia em resposta com o comportamento das Cotas nos principais reservatórios. Os fatores climáticos de cada região foram evidenciados, no entanto, a atuação dos fatores antrópicos associados aos fatores climáticos mostrou uma mudança significativa nos últimos anos. Verificou-se que não há um padrão entre a atuação do fenômeno ENOS em relação aos sistemas atmosféricos que atuam na precipitação na Bacia, e isso reflete também no comportamento observado no volume dos dois reservatórios analisados neste trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMANAJÁS, J. C.; BRAGA, C. C.; Padrões Espaço-Temporal Pluviométricos Na Amazônia Oriental Utilizando Análise Multivariada. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n.4, p.423 – 434. 2012.

ANA/GEF/PNUMA/OEA. Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco, Sub-projeto 4.5C – Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco – PBHSF (2004-2013). Controle de cheias. Estudo Técnico de Apoio nº 10. Brasília: SUM/ANA, 2004. 58p.

ANA. Balanço das Águas. Disponível em: [http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/BalancodasAguas/Balanco das aguas_2014-2015_FLASH.html](http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/BalancodasAguas/Balanco_das_aguas_2014-2015_FLASH.html)

ANDRADE, K. M.; **Climatologia e Comportamento dos Sistemas Frontais sobre a América do Sul**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos, SP, 2005.

APAC - Agência Pernambucana de Águas e Clima, Boletim do Clima. 2014.

APAC - Agência Pernambucana de Águas e Clima, Boletim do Clima. 2015.

ARAGÃO, J. O. R. O Impacto do ENSO e do Dipolo do Atlântico no Nordeste do Brasil. **Bull InstFrÉtudesAndines**, Grécia, v. 27, n.3, p. 839-844, 1998.

ARAÚJO, L. E.; NETO, J. M. M.; SOUSA, F. A. S. Análise Climática da Bacia do Rio Paraíba - Índice de Anomalia de Chuva (IAC). **Engenharia Ambiental – Espírito Santo do Pinhal**, v. 6, p. 508-523, n. 3, set/dez. 2009.

ARAÚJO, H. A. **Padrões de ecos de radar meteorológico no semi-árido brasileiro e condições atmosféricas associadas**. 1996. 130f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB (UFPB CMM TD N° 4), 1996.

ARAÚJO, L. E. **Análise Estatística de Chuvas Intensas na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba**, 2006. 94f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2006.

BARBOSA, A. C. B.; BLITZKOW, D.; Ondaletas: Histórico e Aplicação. São Paulo. Mai. 2008.

BARBOSA, T. F.; CORREIA, M. F.; Sistemas Convectivos Intensos no Semi-Árido Brasileiro: O Controle da Grande Escala. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v.20, p. 395-410, n.3, Dez. 2005.

BARDELIN, C. E. A., **Os efeitos do Racionamento de Energia Elétrica ocorridos no Brasil em 2001 e 2002 com Ênfase no consumo de Energia Elétrica**, 113f. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: **Hidrologia: ciências e aplicação**. TUCCI, C. E. M (org.). Porto Alegre, UFRGS, 2007.

BEZERRA, A. C. N.; CAVALCANTI, E. P. Energia Estática Sobre o Norte e Nordeste do Brasil Relacionada com a Temperatura da Superfície do Mar. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v.23, p. 239-263, n.2, jun. 2008.

BONACCORSO, B.; BORDI, I.; CANCELLIERE, A.; ROSSI, G.; SUTERA, A.; Spatial Variability of Drought: An Analysis of the SPI in Sicily. **Water Resources Management 17**: p. 273–296, mar. 2003.

CADERNO DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO SÃO FRANCISCO / Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. – Brasília: MMA, 2006.

CARVALHO, L.M.V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **J. Climate**, v.17, p.88-108, 2004.

CASTRO, C. N., **Impactos do Projeto de Transposição do Rio São Francisco na Agricultura Irrigada no Nordeste Setentrional**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Rio de Janeiro, 2011.

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; DA SILVA, M. G. A. J.; SILVA DIAS, M. A. F.; **Tempo e clima no Brasil**, São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

CERQUEIRA, H. D. V.; **Modulação da Temperatura da Superfície do Mar do Pacífico e Atlântico Tropical na Precipitação no Estado da Paraíba**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande - PB. 2010.

CGEE/ANA. A questão da água no Nordeste. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Agência Nacional de Águas. – Brasília, DF: CGEE, 2012.

CLIMANÁLISE. Boletim de monitoramento e Análise Climática, 2000.

CLIMANÁLISE. Boletim de monitoramento e Análise Climática, 2001.

CLIMANÁLISE. Boletim de monitoramento e Análise Climática, 2009.

CLIMANÁLISE. Boletim de monitoramento e Análise Climática, 2010.

CLIMANÁLISE. Boletim de monitoramento e Análise Climática, 2011.

CLIMANÁLISE. Boletim de monitoramento e Análise Climática, 2012.

CLIMANÁLISE. Boletim de monitoramento e Análise Climática, 2013.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SÃO FRANCISCO (CBHSF) (a). Plano de recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do São Francisco 2016-2025. RP1A – Diagnóstico da dimensão técnica e institucional. Volume 7 – Usos, balanço hídrico e síntese do diagnóstico. Agosto/2015. Disponível em: http://cbhsaofrancisco.org.br/wp-content/uploads/2015/08/V7_usos_diag_v2.pdf

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO (CBHSF) (b), 2015. Disponível em: <http://cbhsaofrancisco.org.br/chesf-propoe-reducao-de-vazao-em-sobradinho-e-xingo/>.

CORRAR, Luiz J.; PAULO, Edilson; DIAS FILHO, José Maria (coordenadores). Análise Multivariada: para os cursos de administração, ciências contábeis e economia. São Paulo: Atlas, 2014.

CORREIA, M. F.; SILVA DIAS, M. A. F.; Variação do Nível do Reservatório de sobradinho e seu Impacto Sobre o Clima da Região. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, p. 157-168, n. 1. jan/mar. 2003.

DA SILVA, D. F.; **Análise de Aspectos Climatológicos, Agroeconômicos, Ambientais e de seus Efeitos sobre a Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú (AL e PE)**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. 2009.

DA SILVA, D. F.; KAYANO, M. T. ; SOUSA, F. A. S.; Análise da Influência das Multi-Escalas Temporais na Precipitação da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú Através do IAC e Ondeletas: Baixo Mundaú. **UNOPAR científica**. Ciências exatas e tecnológicas, v. 9, p. 19-26, 2010.

DA SILVA, D. F.; GALVÍNCIO. J. D.; Estudo da Influência da Oscilação Decadal do Pacífico no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 4, p. 665-676, 2011.

DA SILVA, D. F., SOUSA, F. A. S., KAYANO, M. T., GALVÍNCIO. J. D. ; Influência da Variabilidade Climática Global e de Suas Escalas Temporais Sobre a Precipitação no Alto Mundaú (PE). **Revista Brasileira de Geografia Física**. Recife-PE, v. 2, p. 64-82. n.03, set-dez, 2009.

DA SILVA, D. F., Influência Interdecadal (ODP e OMA) nas Cotas do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.06, p. 1529-1538, n.06. nov/dez. 2013.

DA SILVA, D. F.; GALVÍNCIO, J. D.; NÓBREGA, R. S.; Influência da variabilidade climática e da associação de fenômenos climáticos sobre sub-bacias do rio São Francisco. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**. n. 19, p.46-56; março. 2011.

DA SILVA, D. F.; GALVÍNCIO, J. D.; Estudo da Influência da Oscilação Decadal do Pacífico na Sub-Bacia do Baixo São Francisco. **Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal**. v. 10, p. 105-116, n. 2, mar /abr. 2013.

DA SILVA, D. F.; Efeito de José e Noé nas Cotas do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**. p. 66-76. n. 28. Jun/2013.

DINIZ, M. C. S.; **Variabilidade Climática e Ocorrência de Cheias na Zona Semiárida da Bacia Hidrográfica do São Francisco**. 86f. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

DINIZ, M. C. S.; CORREIA, M. F. ; MELO, E. C. S. ; FARIAS, W. R. G. ; SILVA ARAGÃO, M. R. da . Episódios de Cheias na Região Semiárida da Bacia do Rio São Francisco em Abril de 1985: um estudo das escalas dominantes e condições atmosféricas associadas. **Engenharia Ambiental (Online)**, v. 08, p. 277-298, 2011.

FEDOROVA, N.. Meteorologia Sinótica. Volume 2.. 1. ed. Pelotas: Editora e Gráfica Universitária- UFPel, 2001. v. 1000. 242p.

Ferreira, N. S., Zona de Convergência Intertropical. Climanálise Especial. Edição Comemorativa de 10 anos. FUNCEME. 136 – 139. 1996.,

FREITAS, M. A. S. Um Sistema de Suporte a Decisão para o Monitoramento de Secas Meteorológicas em Regiões Semiáridas. **Revista de Tecnologia/Fortaleza**, p. 19-30, n.19. 1998.

FREITAS, M. A. S. A Previsão de Secas e a Gestão Hidroenergética: O Caso da Bacia do Rio Parnaíba no Nordeste do Brasil. In: Seminário Internacional sobre Represas y Operación de Embalses, 2004, Puerto Iguazú. Anais do Seminário Internacional sobre Represas y Operación de Embalses. Puerto Iguazú : CACIER, v. 1. p. 1-1. 2004.

FREITAS, M. A. S. Um Sistema de Suporte à Decisão para o Monitoramento de Secas Meteorológicas em Regiões Semi-Áridas. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. Suplem, p. 84-95, 2005.

GONÇALVES, W. A.; CORREIA, M. F.; ARAÚJO, L. E.; SILVA, D. F. da; ARAÚJO, H. A. **Vulnerabilidade Climática do Nordeste Brasileiro: Uma análise de eventos extremos na Zona Semi-árida da bacia hidrográfica do São Francisco**, XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, **Anais...** Florianópolis, 2006.

GONÇALVES, W. A.; CORREIA, M. F.; **Relação Entre Fases do Enos e a Variabilidade da Precipitação na Bacia do São Francisco**. In: XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2008, São Paulo - SP. XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2008.

GONDIM FILHO, J. G. C.; FORMIGA, K. T. M.; DUARTE, R. X.M.; SUGAI, M. R. V. B.; Análise da Cheia de 2004 na Bacia do Rio São Francisco. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 1. Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: GEDN/UFSC, p. 524-538, 2004.

GRIMM, A. M. Variabilidade Interanual do Clima no Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; SILVA DIAS, M. A. F.; **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 463p.

GUEDES, R. V. S. **Análise e Previsão de Eventos críticos de Precipitação com Base no SPI e em Redes Neurais Artificiais para o Estado de Pernambuco**. 120 f. Tese de Doutorado em Meteorologia. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2016.

GUEDES, R. V. S.; LIMA, F. J. L.; AMANAJÁS, J. C.; BRAGA, C. C. Análise em Componentes Principais da Precipitação Pluvial no Estado do Piauí e Agrupamento pelo Método de Ward. **Revista de Geografia**. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. 27, n. 1, jan/mar. 2010.

GURJÃO, C. D. S., **Mudanças no Regime Hidrológico do Rio São Francisco: uma análise da influência do ENOS (EL Niño-Oscilação Sul) em regiões com fortes pressões antrópicas**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2012.

GURJÃO, C. D. S.; CORREIA, M. F.; FILHO, J. B.C., SILVA ARAGÃO, M. R. Influência do Enos (El Niño-Oscilação Sul) no Regime Hidrológico do Rio São Francisco: uma Análise em Regiões com Fortes Pressões Antrópicas. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 04 , p. 774-790. mai/jun. 2012.

HÄNSEL S, MATSCHULLAT J. Drought in a Changing Climate, Saxon Dry Periods. In: BIOCLIMATOLOGY AND WATER IN THE LAND. INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE, Strecno, Slovakia. 2006.

Infoclima: Boletim de informações climáticas do CPETEC/INPE. 2014.

KEYANTASH J, DRACUP J. A. (2002): The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices. **Bulletin American Meteorological Society**, p. 1167-1180. August. 2002.

KOSMINSKY, L. & ZUFFO, A. C. **O Nordeste Seco e a Transposição do Rio São Francisco**. Nordeste Seco. Ano XV, n 57. p. 167-175. 2009.

KOUSKY, V. E.; Frontal influences on northeast Brazil, *Monthly Weather Review*, v.107, n° 9, p. 1140-1153, 1979.

LANA, X.; SERRA, C.; BURGUEN, A.; Patterns of Monthly Rainfall Shortage and **International Journal of Climatology**. V.21: p. 1669–1691. 2001. DOI: 10.1002/joc.697.

LEIVAS, J. F., BERLATO, M. A., FONTANA, D. C.; Risco de deficiência hídrica decenal na metade sul do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 10. P. 397-407. N. 2. 2006.

LIMBERGER, L. & SILVA, M. E. S.; Precipitação e Vazão Mensal na Amazônia (Climatologia: Aportes Teóricos, Metodológicos e Técnicos). **Revista Geonorte**, Edição Especial 2, V.1, N.5, p.719 – 728, 2012.

LOPES, Z. F., **Detecção de Mudança Hidroclimática na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**, Tese de Doutorado em Geografia. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. PE. 2014.

LOUKAS, A.; VASILIADES, L.; DALEZIOS, N. R. **Intercomparison of meteorological drought indices for drought assessment and monitoring in Greece**, 8 International Conference on Environmental Science and Technology Lemnos island, Greece, p.484-491, set. 2003.

MARENGO, J. A. & ALVES, L. M.; Tendências Hidrológicas da Bacia do Rio Paraíba do Sul, **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n.2, p. 215-226, 2005.

MARENGO, J. A. & ALVES, L. M.; Tendências Hidrológicas Da Bacia Do Rio Paraíba Do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n.2, 215-226, 2005.

MATOS, R. A.; **Comparação de Metodologias de Análise de Agrupamentos na presença de Variáveis Categóricas e Contínuas**. 156f. Dissertação de Mestrado em Estatística. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte – MG. 2007

MELO, A. B. C.; NOBRE, P.; MENDES, D.; BOTTINO, M. J., A Zona de Convergência Intertropical sobre o Oceano Atlântico: Climatologia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 7., 2002. Foz do Iguaçu. **Anais...**, Foz do Iguaçu, RS. 2002.

MELLO, N. G. S.; SAKAMOTO, M. S., TORSANI, J. A. Um Estudo de Caso de Um Sistema Convectivo de Mesoescala Observado no Nordeste do Brasil. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 9. Campos do Jordão. **Anais...** p. 940-944.. Campos do Jordão, 1996.

MINUZZI, R. B.; SEDIYAMA, G. C.; COSTA, J. M. N.; VIANELLO, R. L.; Influência da La Niña na Estação Chuvosa da Região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.22, n.3, 345-353, 2007.

MOLION. L.C.B. Aquecimento Global. El Niños, Manchas Solares, Vulcões e Oscilação Decadal do Pacífico. CLIMANALISE, 2005.

MONITOR DE SECAS DO NORDESTE. Disponível em: <http://monitordesecas.ana.gov.br/>

NETO, A.R.; COLLISCHONN, W. ; TUCCI, C. E. ; SILVA, R. C. V. . **Utilização de bases de dados alternativas para a modelagem hidrológica de grande escala na Amazônia**. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa. Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, p. 12. 2005.

OLIVEIRA, L. F. C.; FIOREZE, A. P.; MEDEIROS, A. M. M.; SILVA, M. A. S.; Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.14, p.1186–1192. n.11, 2010.

PALLOTTA, M., NAKAZATO, R. Y.; Caracterização de Episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Zona de Convergência de Umidade (ZCOU) em Janeiro e Fevereiro de 2010. XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010.

RAMIREZ, M. C. V.; **Padrões Climáticos e os Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis no Nordeste do Brasil**. 1996. 132f. Dissertação de mestrado em meteorologia, INPE São José dos Campos – SP, 1996.

REPELLI, C. A.; FERREIRA, N. S.; ALVES, J. M. B.; NOBRE, C. A. Índice de anomalia de precipitação para o Estado do Ceara. In: X CONGRESSO BRASILEIRO

DE METEOROLOGIA E VIII CONGRESSO DA FLLSMET, 1998, Brasília –DF. **Anais...** 1998.

ROOY, V.M.P., **A Rainfall Anomaly Index Independent of Time and Space**, *Notos*, 14, 43, 1965.

SANTOS, A. S. **Alguns Aspectos Dinâmicos e Termodinâmicos de um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) sobre sua Região de Atuação**. 136f. Dissertação de Mestrado em meteorologia. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2005.

SANTOS, E. P. **Variabilidade Climática e Eventos Hidrológicos Extremos na Bacia Hidrográfica do rio São Francisco**. 68f. Dissertação de Mestrado em Meteorologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

SANTOS, E. P.; CORREIA, M. F.; ARAGÃO, M. R. S. Eventos Extremos de Chuva no Semi-Árido: Uma Aplicação do Índice RAI. **Revista Pesquisa**, Campina Grande, v.2, p.887-894, n.6. 2008.

SANTOS, S. A.; CORREIA, M. F.; BRAGA, C. C.; ARAGÃO, M. R. S., Análise Estatística de Chuvas Intensas e Inundações no Semiárido da Bacia do Rio São Francisco: A Cheia de 1985. **Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal**, v. 7, p. 278-290, n. 3. 2010a.

SANTOS, J. F., CALVO, I. P., PORTELA M. M., Spatial and temporal variability of droughts in Portugal. **Water Resources Research**.Res., 46.W03503. DOI:10.1029/2009WR008071. 2010b.

SANTOS, M. S.; **Caracterização Espaço-Temporal de Secas Utilizando Ondaletas e o Standardized Precipitation Index: Uma Aplicação Para a Parcela Mineira da Bacia Do Rio São Francisco**. 163f. Dissertação de Mestrado em em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2011.

SILVA, L. A., **A Influência do Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) Sobre a Precipitação do Nordeste do Brasil (NEB) e as Características Associadas.** 134f Dissertação de mestrado em Meteorologia. INPE – São José dos Campos – SP, 2007.

SMAKHTIN, V. U.; SCHIPPER, E. L. F. Droughts: the impact of semantics and perceptions. *WaterPolicy*, Colombo: Sri Lanka, IWA, n. 10, p. 131-143. 2008.

SOUZA, L. R., **Simulação Hidrológica e Aplicação de uma Análise Multivariada no Estudo de Chuva-Vazão na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.** Dissertação de Mestrado em Meteorologia. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2012.

PAZ, A. R. **HIDROLOGIA APLICADA TEXTO BÁSICO.** Disciplina Ministrada na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, para o curso de graduação em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia na unidade de Caxias do Sul. Setembro/2004.

TUCCI, C. 2000. (org.) *Hidrologia – ciência e aplicação.* Editora da Universidade, ABRH, Porto Alegre.

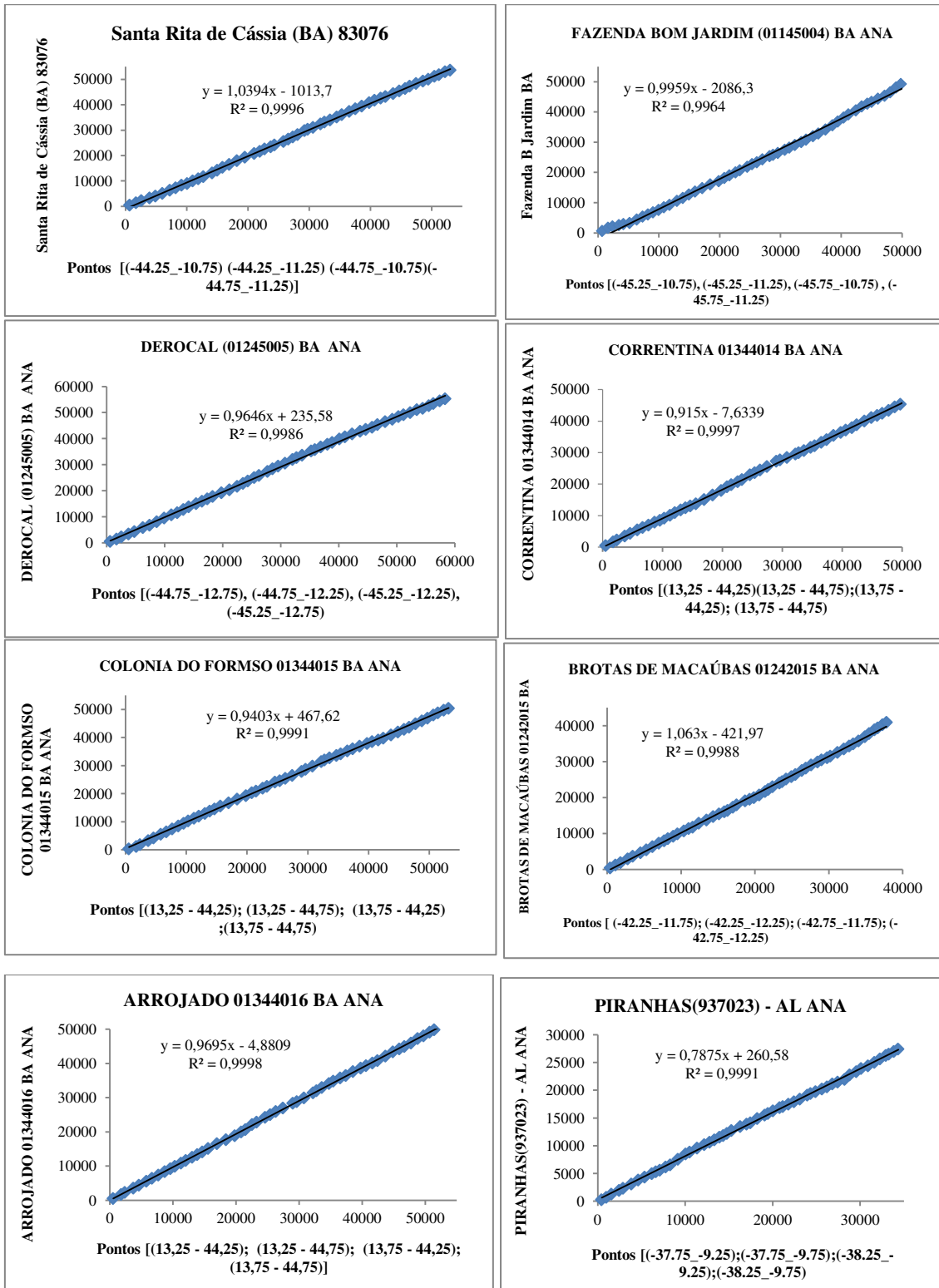
PIRES, V. **Frequência e Intensidade de Fenômenos meteorológicos extremos associados à precipitação.** Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Ciências e Engenharia da Terra, Lisboa, pp.98, 2003.

TUCCI, C. E.M. Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os recursos hídricos. Brasília. **Agência Nacional de Água**, 2002.

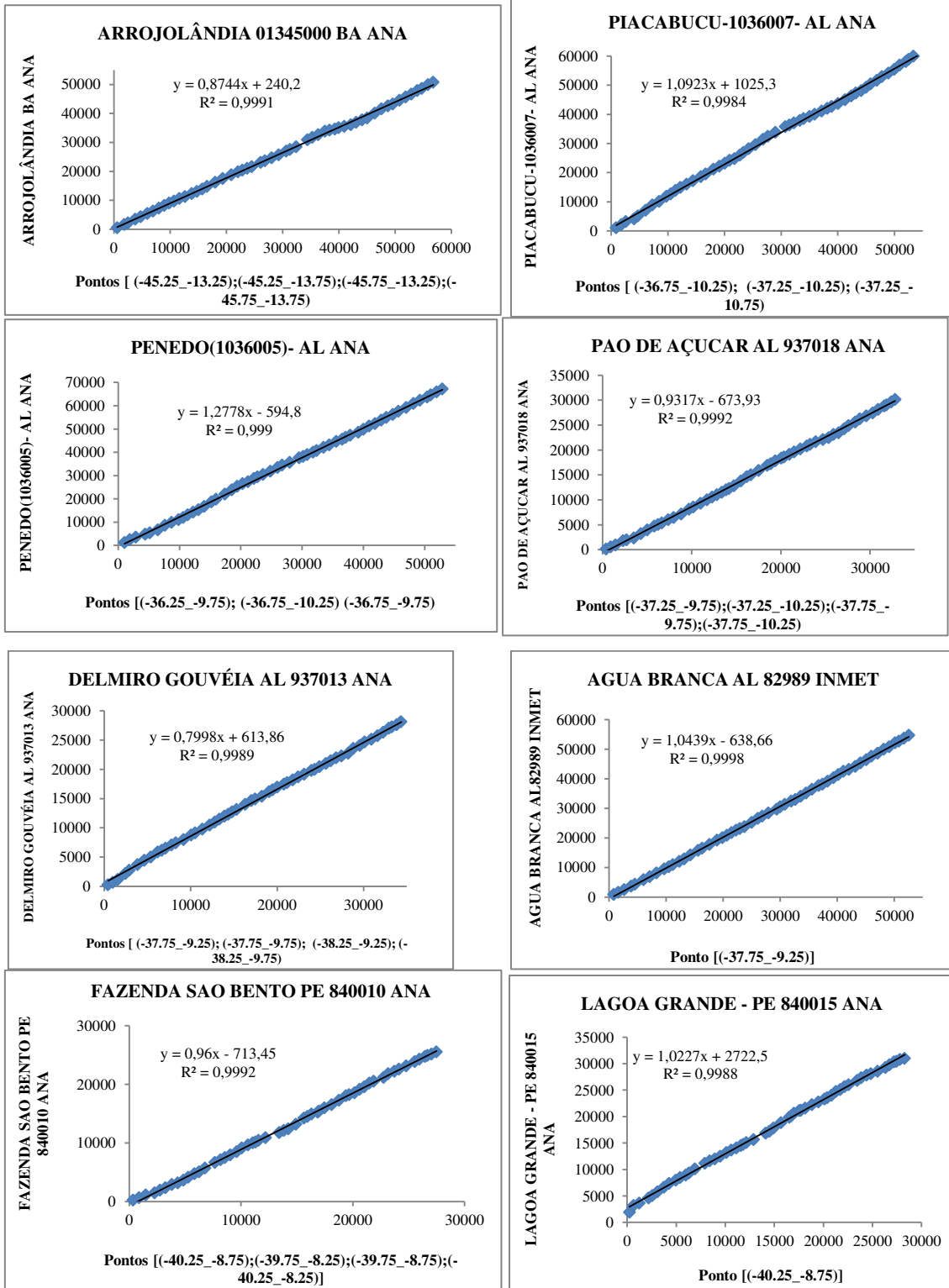
ZILLI, M. T., **Variabilidade Interanual da Precipitação de Primavera e Verão na América do Sul, suas Interconexões e seu Impacto nos Principais Aproveitamentos Hidrelétricos Brasileiros.** 212f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

APÊNDICE

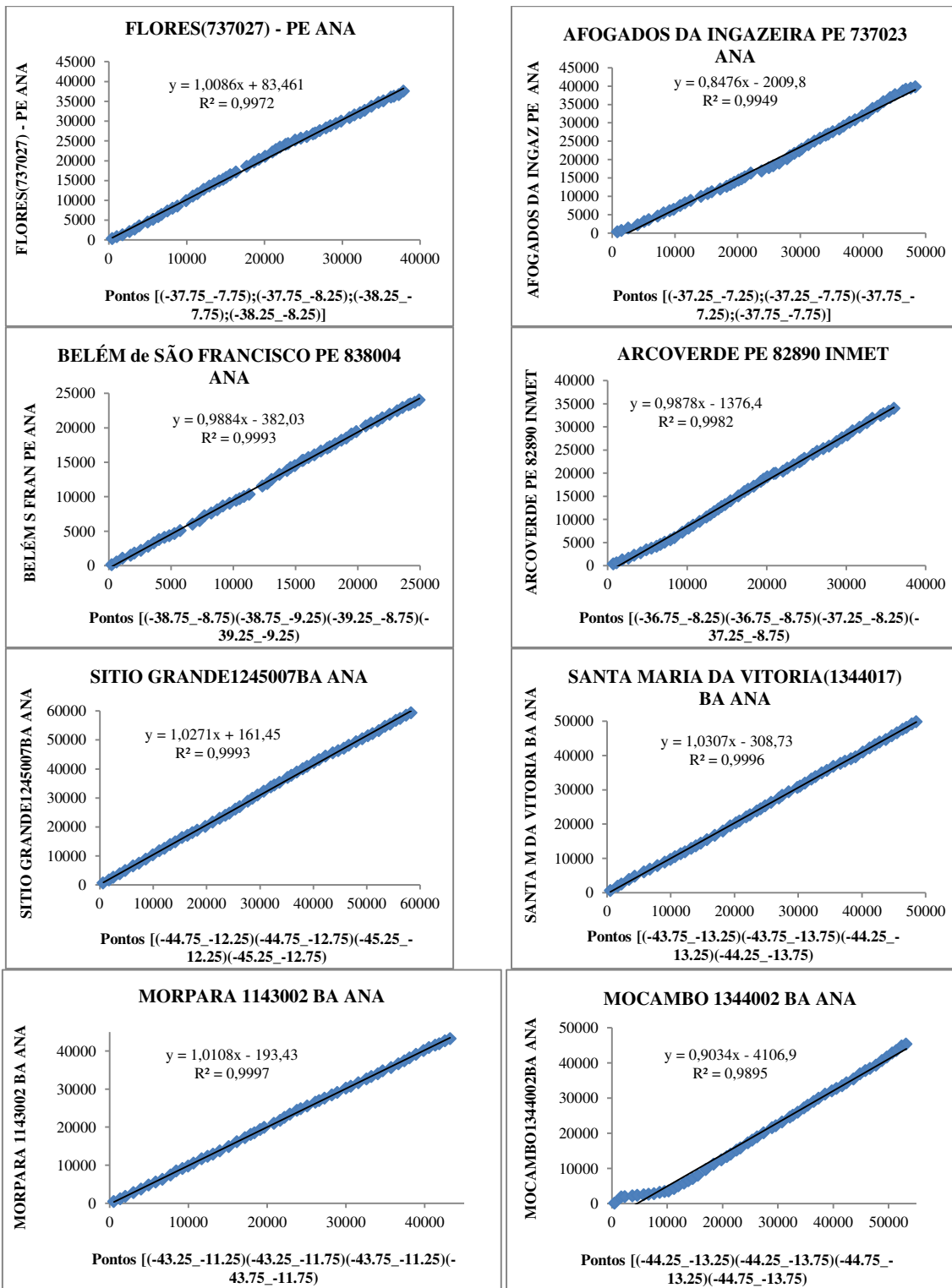
Dupla Massa aplicada à precipitação (mm) nas estações situadas na BHSF



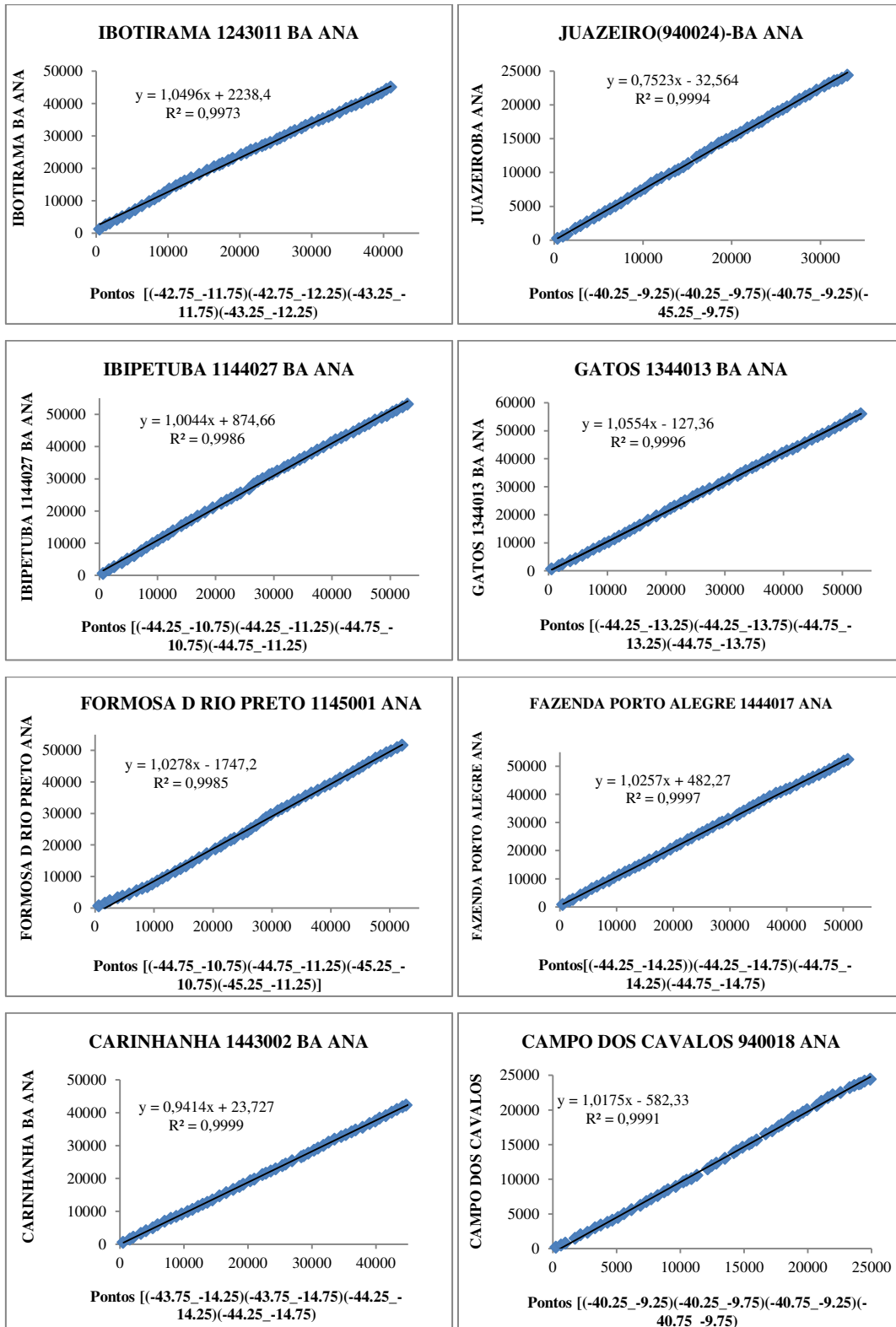
Dupla Massa aplicada à precipitação (mm) nas estações situadas na BHSF



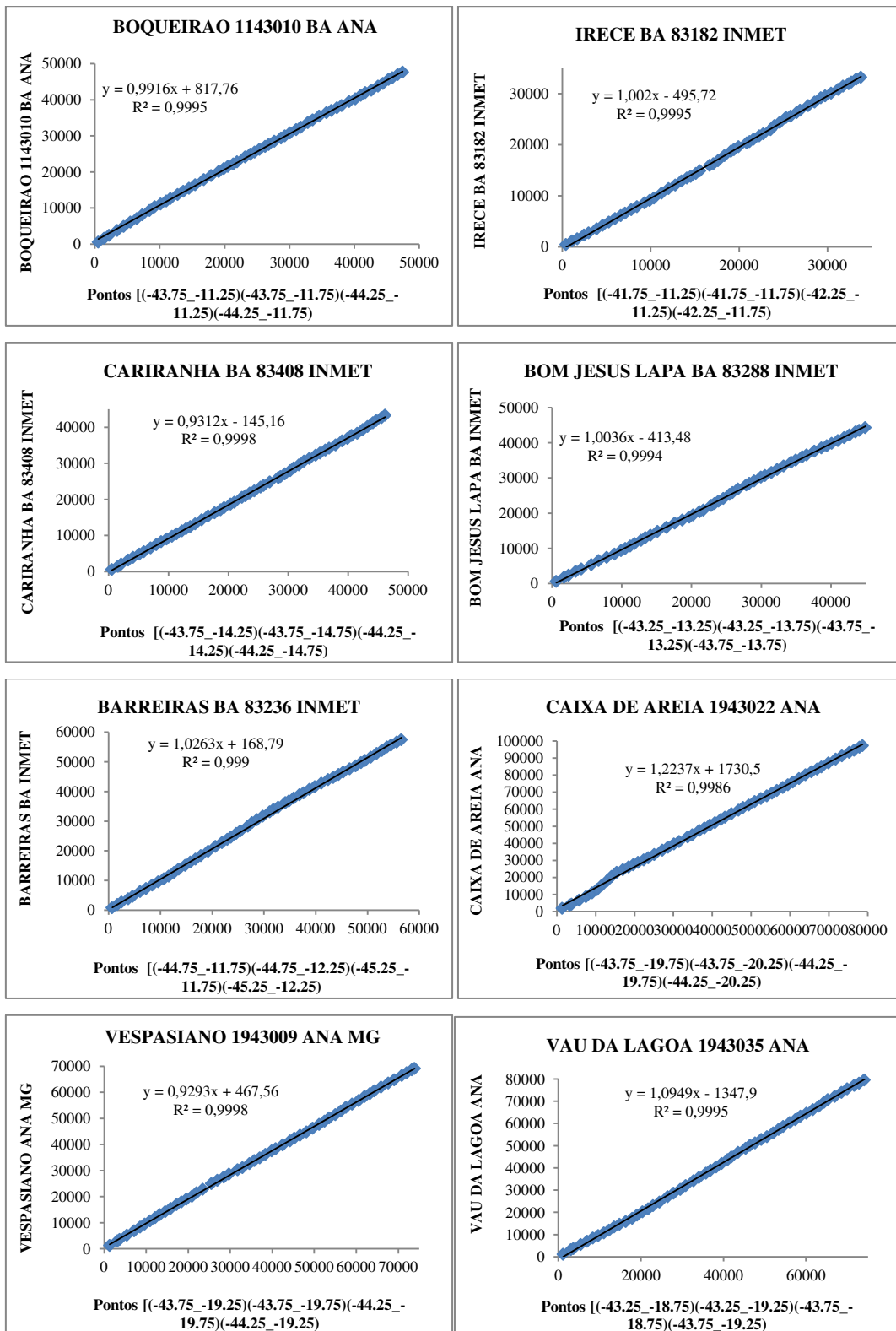
Dupla Massa aplicada à precipitação (mm) nas estações situadas na BHSF



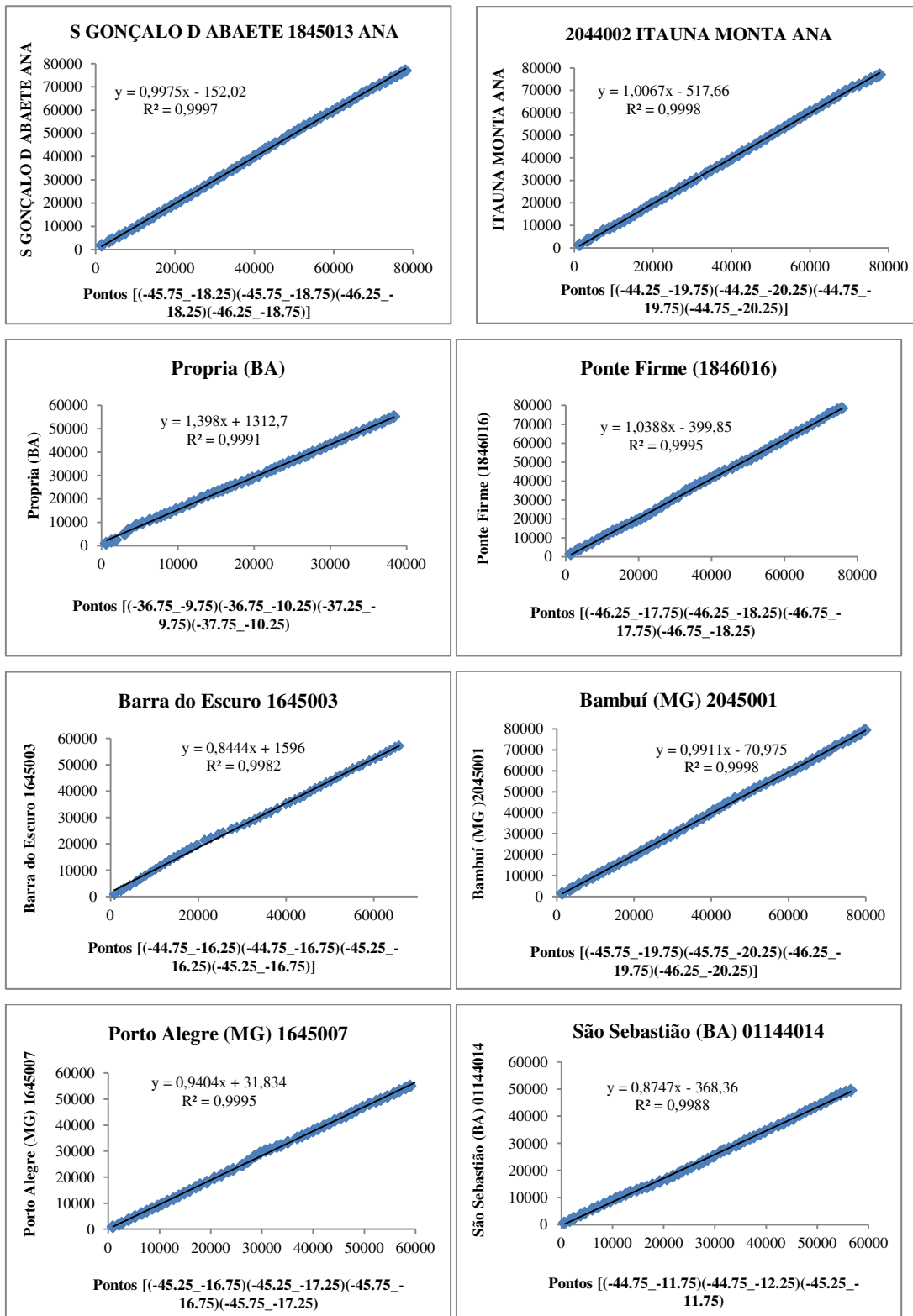
Dupla Massa aplicada à precipitação (mm) nas estações situadas na BHSF



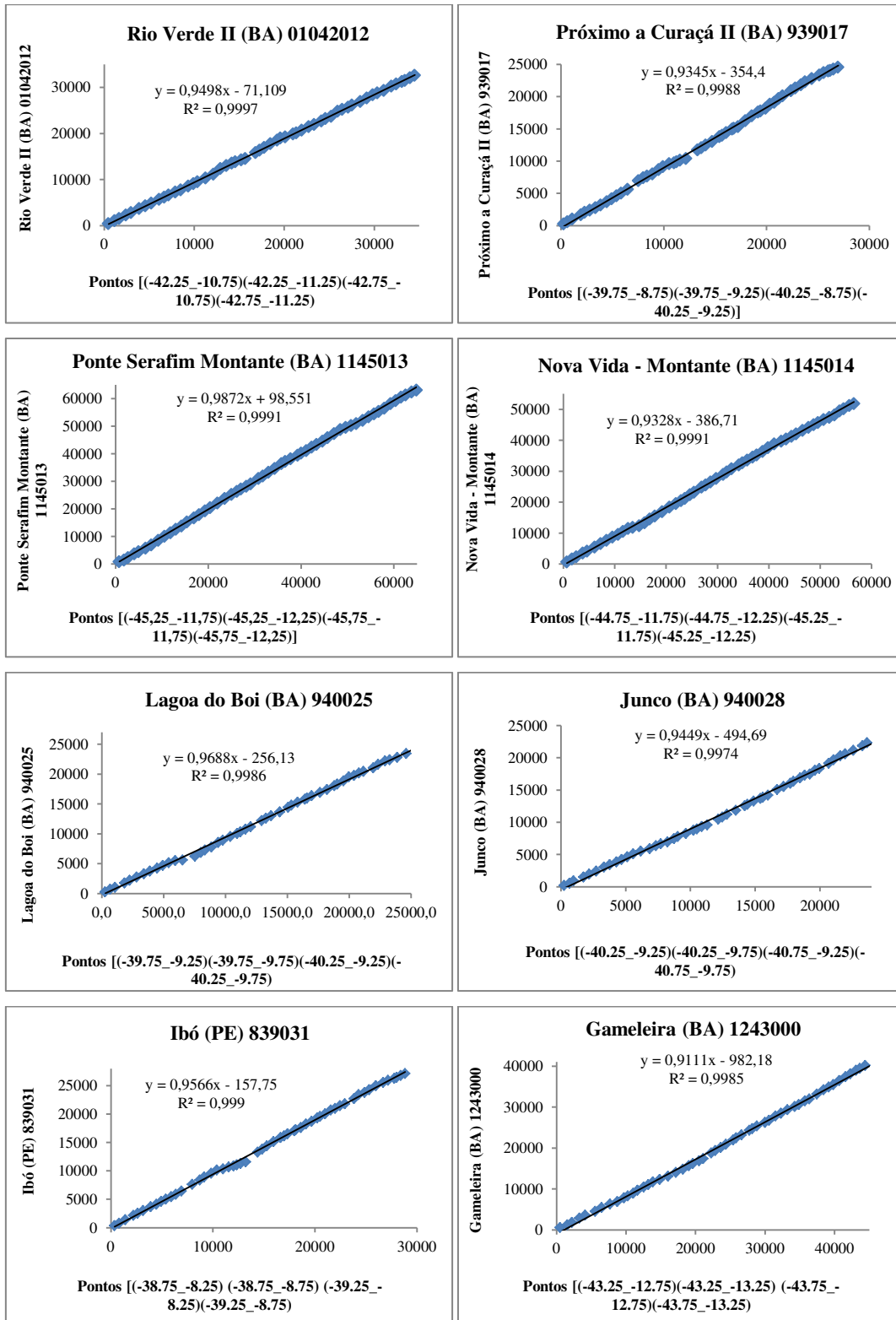
Dupla Massa aplicada à precipitação (mm) nas estações situadas na BHSF



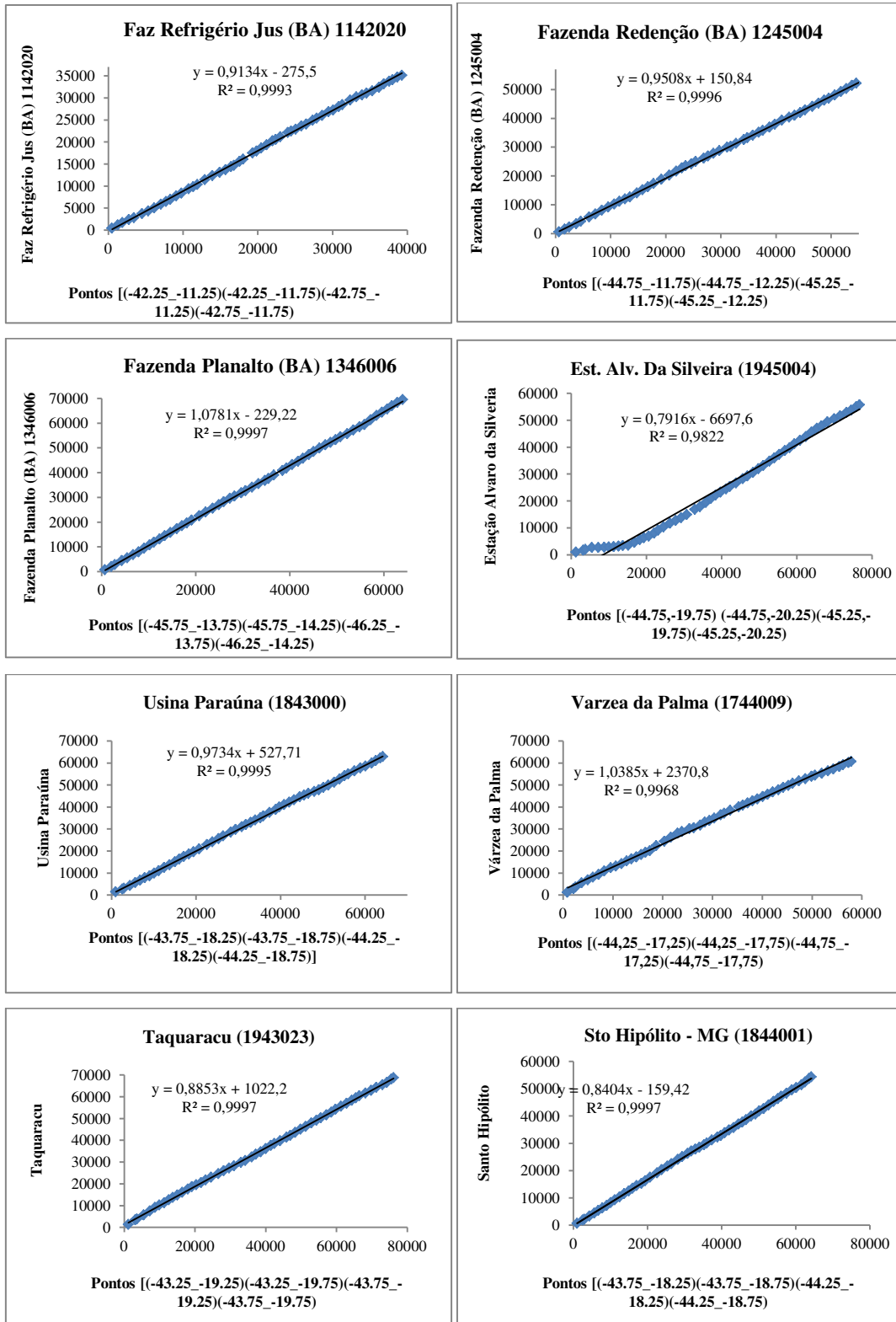
Dupla Massa aplicada à precipitação (mm) nas estações situadas na BHSF



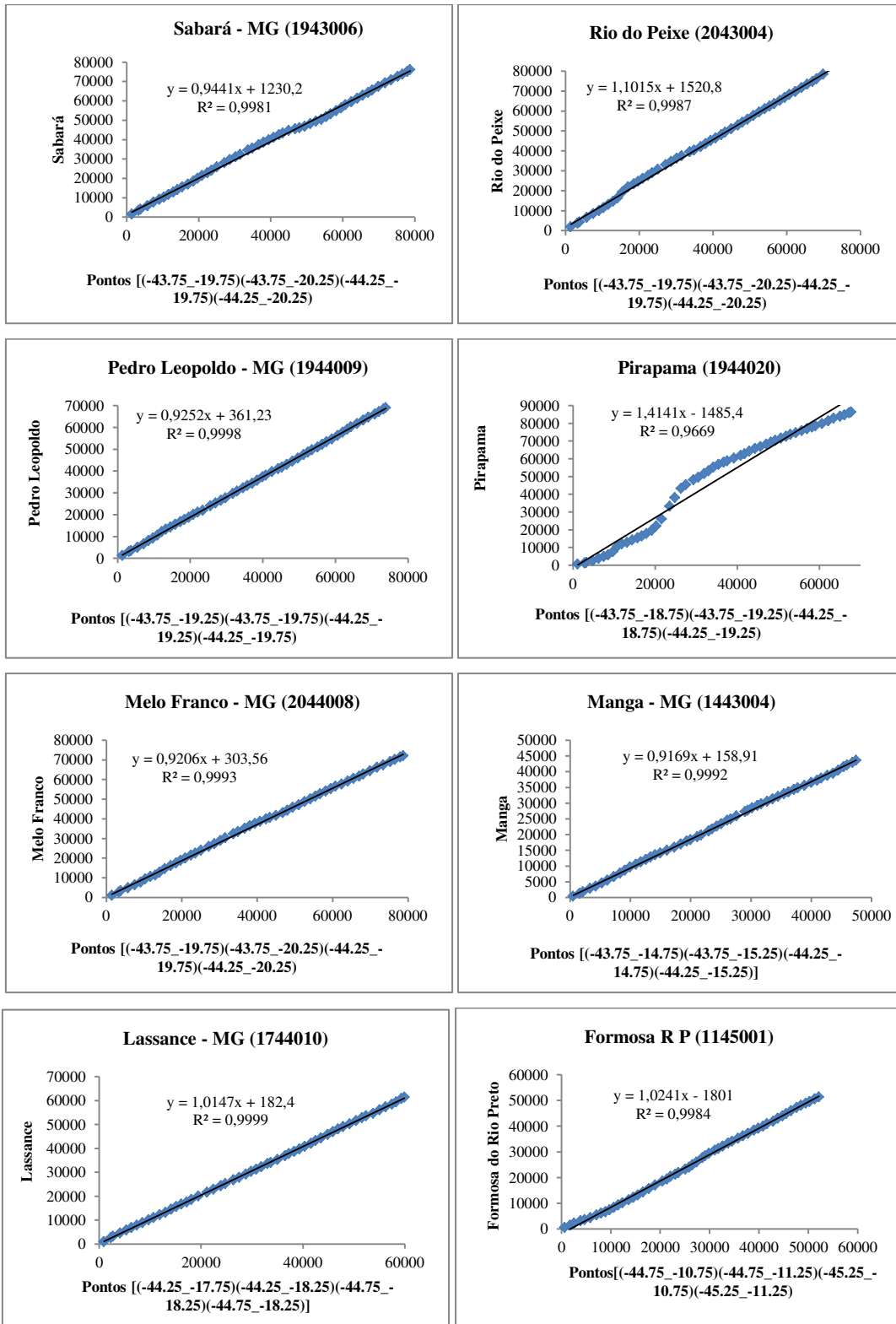
Dupla Massa aplicada à precipitação (mm) nas estações situadas na BHSF



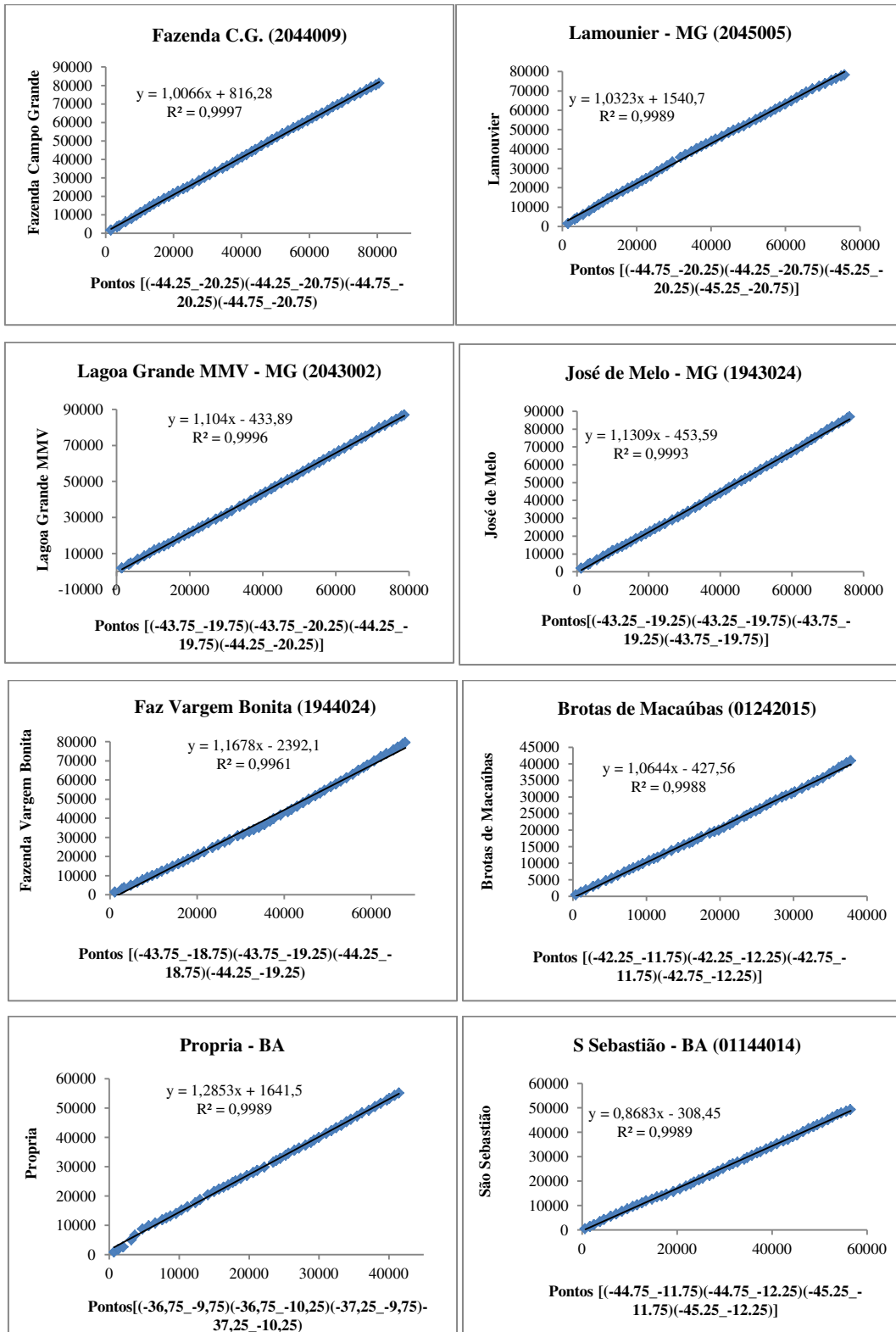
Dupla Massa aplicada à precipitação (mm) nas estações situadas na BHSF



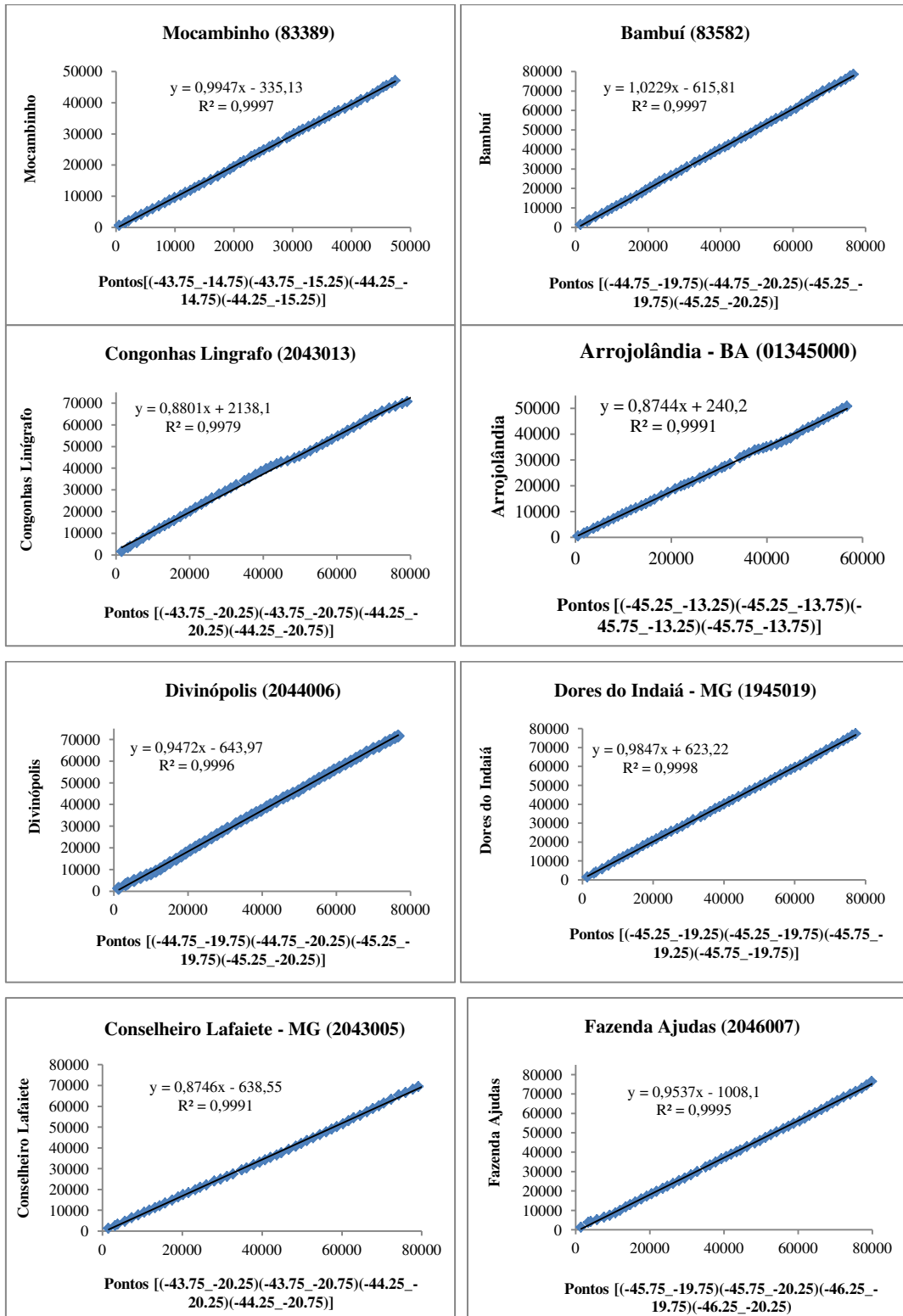
Dupla Massa aplicada à precipitação (mm) nas estações situadas na BHSF



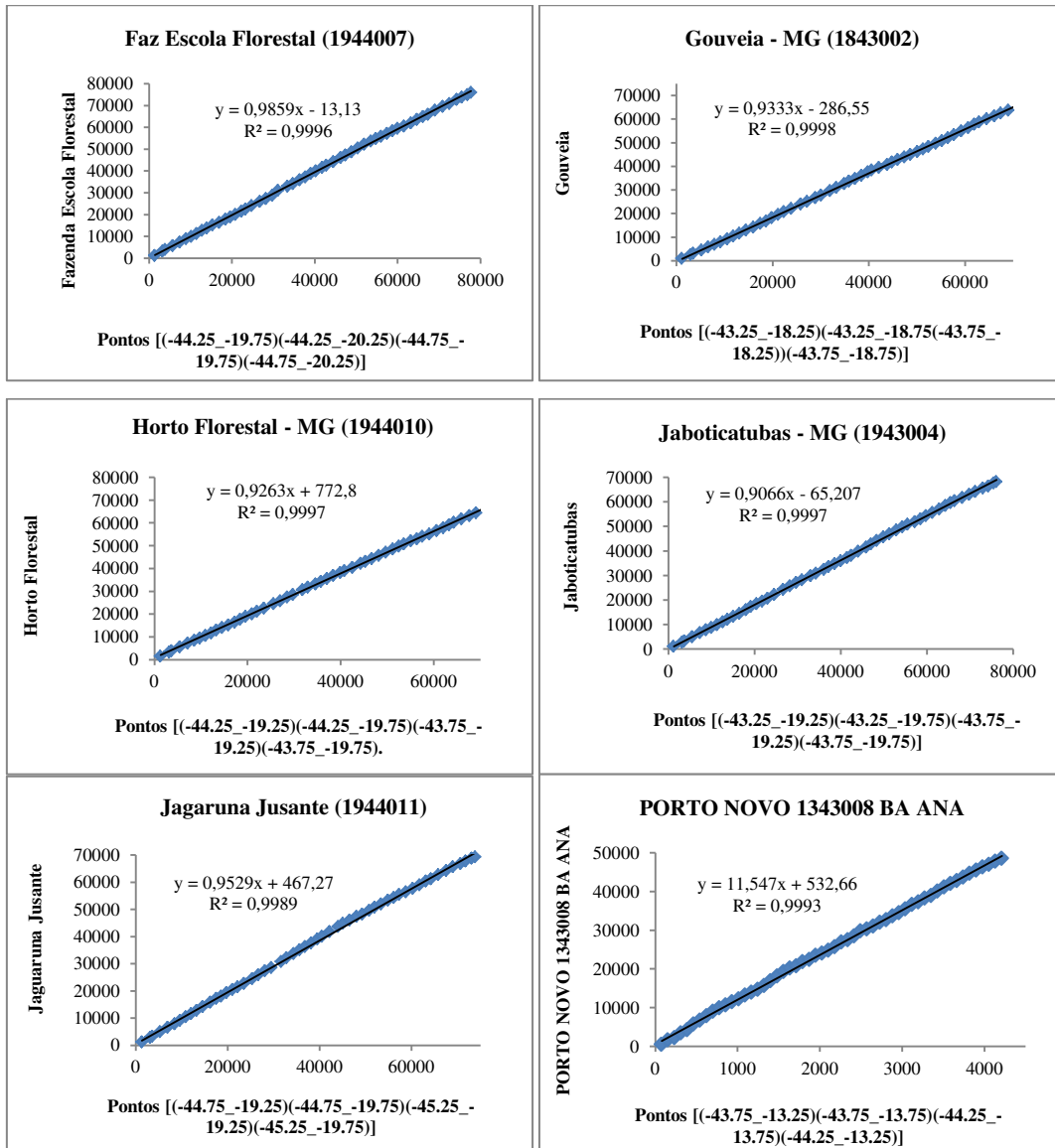
Dupla Massa aplicada à precipitação (mm) nas estações situadas na BHSF



Dupla Massa aplicada à precipitação (mm) nas estações situadas na BHSF



Dupla Massa aplicada à precipitação (mm) nas estações situadas na BHSF



Anexo

Tabela 4.1: Períodos com condições de El Niño, La Niña e Neutras no Oceano Pacífico Tropical, na região do Niños 3.4, entre 1961 e 2015. (Fonte: CDC – NOAA).

Anos	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1961	0	0	-0.1	0	0.1	0.2	0.1	-0.1	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2
1962	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4
1963	-0.4	-0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.7	1.0	1.1	1.2	1.2	1.1
1964	1.0	0.6	0.1	-0.3	-0.6	-0.6	-0.7	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
1965	-0.5	-0.3	-0.1	0.1	0.4	0.7	1.0	1.3	1.6	1.7	1.8	1.5
1966	1.3	1.0	0.9	0.6	0.3	0.2	0.2	0.1	0	-0.1	-0.1	-0.3
1967	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.2	0	0	-0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5
1968	-0.7	-0.8	-0.7	-0.5	-0.1	0.2	0.5	0.4	0.3	0.4	0.6	0.8
1969	0.9	1.0	0.9	0.7	0.6	0.5	0.4	0.5	0.8	0.8	0.8	0.7
1970	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.3	-0.6	-0.8	-0.8	-0.8	-0.9	-1.2
1971	-1.3	-1.3	-1.1	-0.9	-0.8	-0.7	-0.8	-0.7	-0.8	-0.8	-0.9	-0.8
1972	-0.7	-0.4	0	0.3	0.6	0.8	1.1	1.3	1.5	1.8	2.0	1.9
1973	1.7	1.2	0.6	0	-0.4	-0.8	-1.0	-1.2	-1.4	-1.7	-1.9	-1.9
1974	-1.7	-1.5	-1.2	-1.0	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.4	-0.6	-0.7	-0.6
1975	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-0.7	-0.8	-1.0	-1.1	-1.3	-1.4	-1.5	-1.6
1976	-1.5	-1.1	-0.7	-0.4	-0.3	-0.1	0.1	0.3	0.5	0.7	0.8	0.8
1977	0.7	0.6	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.6	0.8	0.8
1978	0.7	0.4	0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.1	0
1979	0	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5	0.6
1980	0.6	0.5	0.3	0.4	0.5	0.5	0.3	0.2	0	0.1	0.1	0
1981	-0.2	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	0
1982	0	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.5	1.9	2.1	2.1
1983	2.1	1.8	1.5	1.2	1.0	0.7	0.3	0	-0.3	-0.6	-0.8	-0.8
1984	-0.5	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.3	-0.6	-0.9	-1.1
1985	-0.9	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.3
1986	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.2	0.4	0.7	0.9	1.0	1.1
1987	1.1	1.2	1.1	1.0	0.9	1.1	1.4	1.6	1.6	1.4	1.2	1.1
1988	0.8	0.5	0.1	-0.3	-0.8	-1.2	-1.2	-1.1	-1.2	-1.4	-1.7	-1.8
1989	-1.6	-1.4	-1.1	-0.9	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1
1990	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4
1991	0.4	0.3	0.2	0.2	0.4	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	1.2	1.4
1992	1.6	1.5	1.4	1.2	1.0	0.8	0.5	0.2	0	-0.1	-0.1	0
1993	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	0.6	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.9	1.0
1995	0.9	0.7	0.5	0.3	0.2	0	-0.2	-0.5	-0.7	-0.9	-1.0	-0.9
1996	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5
1997	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.6	1.0	1.4	1.7	2.0	2.2	2.3	2.3
1998	2.1	1.8	1.4	1.0	0.5	-0.1	-0.7	-1.0	-1.2	-1.2	-1.3	-1.4
1999	-1.4	-1.2	-1.0	-0.9	-0.9	-1.0	-1.0	-1.0	-1.1	-1.2	-1.4	-1.6
2000	-1.6	-1.4	-1.1	-0.9	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8
2001	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3
2002	-0.2	-0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.1
2003	0.9	0.6	0.4	0	-0.2	-0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4
2004	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4	0.2	0.1	0	0	-0.1	-0.4	-0.7
2006	-0.7	-0.6	-0.4	-0.2	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	0.9	1.0
2007	0.7	0.3	0	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3	-0.6	-0.8	-1.1	-1.2	-1.3
2008	-1.4	-1.3	-1.1	-0.9	-0.7	-0.5	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.5	-0.7
2009	-0.8	-0.7	-0.4	-0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	1.0	1.2	1.3
2010	1.3	1.1	0.8	0.5	0	-0.4	-0.8	-1.1	-1.3	-1.4	-1.3	-1.4
2011	-1.3	-1.1	-0.8	-0.6	-0.3	-0.2	-0.3	-0.5	-0.7	-0.9	-0.9	-0.8
2012	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.1	0.1	0.3	0.4	0.4	0.2	-0.2
2013	-0.4	-0.5	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.5	-0.6	-0.4	-0.2	0	0	0	0	0.2	0.4	0.6	0.6
2015	0.5	0.4	0.5	0.7	0.9	1.0	1.2	1.5	1.8	2.1	2.2	2.3