

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS GEOGRÁFICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

Zilurdes Fonseca Lopes

**DETECÇÃO DE MUDANÇA HIDROCLIMÁTICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIO SÃO FRANCISCO**

Orientadora: Prof^ª. Dra Josiclêda Domiciano Galvíncio

Co-orientador: Prof^º. Dr. Bernardo Barbosa da Silva

TESE DE DOUTORADO

Recife - Brasil

Agosto/2014

ZILURDES FONSECA LOPES

**DETECÇÃO DE MUDANÇA HIDROCLIMÁTICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIO SÃO FRANCISCO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutora.

Recife – Pernambuco-Brasil

2014

Catálogo na fonte
Bibliotecária Divonete Tenório Ferraz Gominho CRB-4 985

L864d Lopes, Zilurdes Fonseca.
Detecção de mudança hidroclimática na bacia hidrográfica do rio São Francisco / Zilurdes Fonseca Lopes. – Recife: O autor, 2014.
165 f. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Josiclêda Domiciano Galvíncio.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, CFCH.
Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2014.
Inclui referências e apêndices.

1. Geografia. 2. Bacias hidrográficas. 3. Análise espectral – Chuvas e periodicidade. 4. Precipitação (Meteorologia) – Variabilidade. I. Galvíncio, Josiclêda Domiciano. (Orientadora). II. Título.

910 CDD (23.ed.) UFPE (BCFCH2014-64)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS GEOGRÁFICAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA



ZILURDES FONSECA LOPES

“DETECÇÃO DE MUDANÇA HIDROCLIMÁTICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO”

Tese defendida e aprovada pela banca examinadora:

1º examinador e Orientador: _____
Dra. Josiclêda Domiciano Galvício

2º examinador: _____
Dra. Werônica Meira de Souza (UFRPE)

3º examinador: _____
Dra. Leidjane Maria Maciel de Oliveira (UFPE)

4º examinador: _____
Dra. Magna Soelma Bezerra de Moura (EMBRAPA)

5º examinador: _____
Dr. Francisco de Assis Salviano de Souza (UFCG)

RECIFE-PE
14/08/2014

DEDICATÓRIA

A minha querida mãe Maria Teodora Fonseca
(*em memória*)

Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao Pai, ao Filho e ao Espírito Santo que sempre me protegeram e me sustentaram ao longo da minha vida.

A Nossa Senhora Auxiliadora que sempre me carrega nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais Maria Teodora Fonseca e Sebastião Lopes pelo amor, ensinamentos e caráter e a toda a minha família.

Ao meu marido Valdez Guimarães pelo apoio, incentivo, compreensão e disposição.

A minha orientadora pela sua amizade, seu apoio, sua confiança, sua orientação, sua compreensão e seus ensinamentos. A você Dra Josiclêda Galvêncio muitíssimo obrigada!

Ao meu co-orientador Dr. Bernardo Barbosa da Silva pelos seus ensinamentos, pela orientação e disposição.

Ao amigo Josimar Fernandes pela amizade, apoio, pelo incentivo e pela disposição em sempre ajudar.

Aos colegas de turma Elvis, Marco Antônio, Josimary, Thiago pela ajuda nas disciplinas.

Ao laboratório de Sensoriamento Remoto (SERGEO) e ao grupo do SERGEO pela ajuda, em especial ao Ygor, Pedro, Luciana e João Antônio.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

RESUMO

A mudança hidroclimática tem sido analisada por diferentes pesquisadores no mundo levando em consideração a variação climática, fatores antrópicos e características físicas da bacia hidrográfica. Este estudo teve como objetivo detectar tendência e modos oscilatórios dominantes nas séries de precipitação e vazão na bacia do rio São Francisco e também verificar se a ação antrópica pode transformar a forçante atmosférica sobre a precipitação e vazão a fim de verificar se há mudanças hidroclimática na bacia. Os componentes de tendências e modos oscilatórios que compõem o sinal da série de precipitação e vazão foram extraídos por meio da técnica de Análise Espectral Singular. A Análise de Componentes Principais foi utilizada para regionalizar as séries de precipitação e vazão. Na parte alta da bacia observou-se tendência de aumento de precipitação enquanto que o Médio e Submédio São Francisco indicaram tendência decrescente nos dados de precipitação. Os modos oscilatórios da escala intrasazonal são os principais que causam precipitação no Médio São Francisco, no entanto essa escala foi dominada pela escala interanual e decadal. Na parte alta da bacia, foram observadas oscilações frequentes de modo de 12, 6, 18 e 24 meses como parte do sinal da dinâmica base. O Submédio São Francisco apresentou como principais modos oscilatórios, depois do modo de doze meses, os de três a sete anos e também aqueles de escala temporal decadal. Os modos oscilatórios detectados nas séries de vazão foram aqueles da escala intrasazonal, interanual e decadal em todas as regiões da bacia. Quanto à regionalização, a bacia foi regionalizada em cinco regiões. Três regiões foram formadas por características comuns devido a fatores atmosféricos e uma região, composta apenas por postos de vazão com características de ação antrópica, nos municípios. Em geral, não foi observado mudança de regime de precipitação nas regiões do rio São Francisco. Quanto a vazão, percebeu-se decréscimos nos dados fluviométricos, principalmente após a década de 80, nas regiões do Médio, Submédio e Baixo São Francisco.

Palavras chaves: SSA, ACP, tendência, oscilação, vazão, precipitação

ABSTRACT

The hydroclimatic change has been analyzed by different researchers in the world taking into account climate change, human factors and physical characteristics of the watershed. This study aimed to detect trend and dominant oscillatory modes in precipitation and flow series in the basin of the River and also check if the human action can transform the atmospheric forcing on rainfall and flow in order to check for hydroclimatic changes in basin. The components trends and oscillatory modes comprising the signal range of precipitation and were extracted by Singular Spectrum Analysis technique. The principal component analysis was used to regionalize the precipitation and flow series. In the upper basin there was a trend of increased precipitation, while the Middle and Lower-middle San Francisco indicated a decreasing trend in precipitation data. The oscillatory modes of intraseasonal scale are the main causing precipitation in the Middle San Francisco, however this scale was dominated by inter-decadal scale and. In the high part of the basin, common mode oscillations were observed for 12, 6, 18 and 24 months as part of the signal dynamic basis. The Lower-middle San Francisco presented as main oscillatory modes, after the twelve-month way, from three to seven years and also those of decadal time scale. The oscillatory modes detected in flow series were those of intraseasonal scale, interannual and decadal in all regions of the basin. In terms of regionalization, the basin was regionalized into five regions. Three regions were formed by common characteristics due to atmospheric factors and a region of just flow stations with human action features in the municipalities. In general, there was no change in precipitation regime in regions of the São Francisco River. As the flow rate, decreases were realized in runoff data, especially after the 80s, in the regions of Eastern, Lower-middle and lower São Francisco.

Key words: SSA, ACP, trend, oscillation, flow and rainfall.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.2 Uso e ocupação do solo na bacia do rio São Francisco	16
2.3 Variabilidade hidroclimática na bacia do rio São Francisco	16
2.3.1 Precipitação	16
2.3.2 Vazão	17
2.4 Variabilidade Climática no Nordeste do Brasil	18
2.5 Sistemas indutores de precipitação no âmbito da Bacia do rio São Francisco	19
2.5.1 Frentes Frias	19
2.5.2 Vórtice Ciclônico de Ar Superior.....	20
2.5.3 Zona de Convergência Intertropical	20
2.5.4 Brisa marítima e brisa terrestre	21
2.5.4 Zona de Convergência do Atlântico Sul	22
2.5.6 Ondas de Leste	23
2.6 Variabilidade hidroclimática.....	24
2.6.1 Variabilidade hidroclimática natural	24
2.6.2 Variabilidade hidroclimática devido a fatores antrópicos.....	25
2.7. Análise de Componentes Principais	27
2.7.1 Autovalores e autovetores	29
2.7.2 Número de componentes principais a ser extraídos	30
2.7.3 Rotação dos componentes principais	31
2.7.4 Rotação ortogonal	31
2.7.5 Rotação oblíqua.....	32
2.7.6 Interpretação dos componentes principais	32
2.8 Análises Espectral Singular	33
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	39
3.1 Área de estudo	39
3.1.1 Pedologia	40
3.1.2 Cobertura Vegetal	40
3.2 – Métodos	41
3.2.1 Análise de Componentes Principais.....	41

3.2.2 Análises Espectral Singular.....	42
3.2.2.1 Estágio de decomposição.....	42
3.2.2.2 Estágio de reconstrução.....	44
3.3 Dados.....	48
3.3.1 Precipitação pluviométrica.....	48
3.3.2 Vazão.....	48
3.4 Preenchimento de Falhas.....	49
3.4.1 Regressão Linear Multipla.....	49
3.5 Consistência dos dados de precipitação.....	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
4.1. Consistência dos dados.....	52
4.1.1 Precipitação.....	52
4.1.2 Vazão.....	53
4.2 Precipitação anual e mensal média na bacia hidrográfica do rio São Francisco.....	54
4.3 Extração de tendência e modos oscilatórios na bacia do rio São Francisco.....	59
4.3.1 Precipitação pluviométrica.....	59
4.3.1.1 Alto São Francisco.....	59
4.3.1.2 Médio São Francisco.....	76
4.3.1.3 Submédio São Francisco.....	90
4.3.1.4 Baixo São Francisco.....	101
4.3.2 Vazão.....	107
4.3.2.1 Alto São Francisco.....	107
4.3.2.2 Médio São Francisco.....	111
4.3.2.3 Submédio São Francisco.....	122
4.3.2.4 Baixo São Francisco.....	127
4.4. Regionalização da precipitação e vazão na bacia do rio São Francisco.....	135
4.5 Teste de Mann-Kendal.....	141
4.5.1 Precipitação.....	141
4.5.2 Vazão.....	144
5. CONCLUSÕES.....	147
6. REFERÊNCIAS.....	149

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Regiões fisiográficas da bacia do rio São Francisco.....	39
Figura 2 - Espectro dos trinta primeiros autovalores da estação fluviométrica de Acorizal do rio Cuiabá	45
Figure 3- Matriz de correlação entre os componentes resultantes na etapa da DVS.....	46
Figura 4 - Consistência dos dados de precipitação (mm) de alguns postos na bacia do rio São Francisco.....	52
Figura 5 - Consistência dos dados de vazão (m ³ /s) de alguns postos na bacia do rio São Francisco.....	53
Figura 6 - Precipitação acumulada média de 1975 a 2010 na bacia do rio São Francisco.	54
Figura 7 - Precipitação média mensal na bacia do rio São Francisco de 1975 a 2010.....	55
Figura 8 - Características da série de precipitação do município de Várzea da Palma	59
Figura 9 - Características da série de precipitação do município de Onça de Pitangui.....	63
Figura 10 - Características da série de precipitação do município de Nova Lima	67
Figura 11 - Características da série de precipitação do município de Piumhi.....	70
Figura 12 - Características da série de precipitação do município de Formosa do Rio Preto.	76
Figura 13- Características da série de precipitação do município de Santana.....	79
Figura 14 - Características da série de precipitação do município de Montalvânia.	83
Figura 15 - Características da série de precipitação do município de São Romão.....	85
.Figura 16 - Características da série de precipitação do município de Afogados da Ingazeira.	90
Figura 17 - Características da série de precipitação do município de Flores.	93
Figura 18 - Características da série de precipitação do município de Santa Maria da Boa Vista.	96
Figura 19 - Características da série de precipitação do município de Delmiro Gouvêia.	99
Figura 20 - Características da série de precipitação do município de Pão de Açúcar.	101
Figura 21 - Características da série de precipitação do município de Piranha.	103
Figura 22 - Características da série de vazão do município de Vargem Bonita.	108
Figura 23 - Características da série de vazão do município de Várzea da Palma..	110
Figura 24 - Características da série de vazão do município de Coração de Jesus.	112
Figura 25 - Características da série de vazão do município de Jaíba.	114
Figura 26 - Características da série de vazão do município de Juvenília.	118
Figura 27 - Características da série de vazão do município de Morpará.....	121
Figura 28 - Características da série de vazão do município de Juazeiro.	123
Figura 29 - Características da série de vazão do município de Serra Talhada.	125
Figura 30 - Características da série de vazão do município de Pão de Açúcar.	128
Figura 31 - Características da série de vazão do município de Traipu.....	131
Figura 32 - Distribuição espacial das estações de precipitação e vazão ao longo da bacia do rio São Francisco e regiões homogêneas.	136
Figura 33 - Distribuição da precipitação e vazão media anual de acordo com os componentes principais	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Oscilações dominantes presentes nas séries de precipitação no Alto São Francisco. Os períodos estão em ordem de importância.....	74
Tabela 2 – Oscilações dominantes presentes nas séries de precipitação do Médio São Francisco. Os períodos estão em ordem decrescente de importância.....	88
Tabela 3 – Oscilações dominantes presentes nas séries de precipitação do Submédio São Francisco. Os períodos estão em ordem de importância.	100
Tabela 4 – Oscilações dominantes presentes nas séries de precipitação do Baixo São Francisco. Os períodos estão em ordem de importância	107
Tabela 5 – Oscilações dominantes presentes nas séries de vazão do Alto São Francisco. Os períodos estão em ordem decrescente de importância.	133
Tabela 6 – Oscilações dominantes presentes nas séries de vazão do Médio São Francisco. Os períodos estão em ordem decrescente de importância	134
Tabela 7 – Oscilações dominantes presentes nas séries de vazão do Submédio São Francisco. Os períodos estão em ordem decrescente de importância.	135
Tabela 8 - Oscilações dominantes presentes nas séries de vazão do Baixo São Francisco. Os períodos estão em ordem decrescente de importância.	135
Tabela 9 - Teste de Mann-Kendall dos postos de precipitação no Alto São Francisco. Preenchimento preto nível de significância para o posto que apresentou tendência significativa.	141
Tabela 10 - Teste de Mann-Kendall dos postos de precipitação no Médio São Francisco. Preenchimento preto nível de significância para o posto que apresentou tendência significativa	143
Tabela 11 - Teste de Mann-Kendall dos postos de precipitação no Submédio São Francisco. Preenchimento preto nível de significância para o posto que apresentou tendência significativa	144
Tabela 12 - Teste de Mann-Kendall dos postos de precipitação no Baixo São Francisco. Preenchimento preto nível de significância para o posto que apresentou tendência significativa	144
Tabela 13 - Teste de Mann-Kendall dos posto fluviométricos do Alto São Francisco. Preenchimento preto nível de significância para a estação que apresentou tendência significativa.	145
Tabela 14 - Teste de Mann-Kendall das estações de vazão do Médio São Francisco. Preenchimento preto nível de significância para a estação que apresentou tendência significativa.	146
Tabela 15 Teste de Mann-Kendall das estações de vazão do Submédio São Francisco. Preenchimento preto nível de significância para a estação que apresentou tendência significativa.	146
Tabela 16 Teste de Mann-Kendall das estações de vazão do Baixo São Francisco. Preenchimento preto nível de significância para a estação que apresentou tendência significativa.	146

LISTA DE SIGLAS E ABREVEATURAS

BSF	Bacia do São Francisco
TSM	Temperaturas da Superfície do Mar
PTS	Pacífico Tropical Sul
ATN	Atlântico Tropical Norte
NEB	Nordeste Brasileiro
PNMM	Pressão ao Nível Médio do Mar
VCAS	Vórtices Ciclônicos de Ar Superior
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ENOS	El Niño Oscilação Sul
OL's	Ondas de Leste
ACP	Análise de Componentes Principais
SSA	Singular Spectral Analysis
MSF	Médio São Francisco
ASF	Alto São Francisco
SBMSF	Submédio São Francisco
DVS	Decomposição do Valor Singular

1. INTRODUÇÃO

Variabilidade hidroclimática refere-se à variação nos componentes dos recursos hídricos como, por exemplo, precipitação pluviométrica, evapotranspiração, escoamento superficial. Em especial, a variabilidade da precipitação e da vazão ou até mesmo a mudança climática dessas variáveis são as mais investigadas devido a sua importância direta na gestão dos recursos hídricos das bacias hidrográficas. Muitos estudos indicam a importância das características dos padrões climáticos de grande escala, como Temperatura da Superfície do Mar e Pressão ao Nível Médio do Mar sobre a variabilidade interanual e decadal da precipitação e conseqüentemente da vazão (DETTINGER et al., 1998). Outros têm mostrado que os efeitos devido aos fatores antrópicos são de magnitudes maiores do que os de ordem climática (ZHAN et al., 2011; 2013).

Em particular, no Nordeste brasileiro a variabilidade da precipitação é influenciada por diversos sistemas climáticos de escala intrasazonal, intersazonal e decadal. Os de escala intrasazonais são os que causam precipitação na escala anual como a Zona de Convergência Intertropical e os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis. Aqueles de escala intersazonal são os relacionados com os fenômenos El Niño e La Niña e, os de escala decadal pode-se citar a Oscilação Decadal do Pacífico (MARENGO et al., 2011). Além dessa variabilidade de fenômenos atuantes na região Nordeste, há ainda, o agravante daqueles de escala maior controlar os de menor escala e, portanto, a precipitação pode ser intensificada ou suprimida.

A variação da vazão (volume escoado por unidade de tempo) depende dos processos hidrológicos na bacia hidrográfica, os quais possuem duas direções predominantes de fluxo na bacia: vertical e longitudinal. O fluxo vertical está relacionado à precipitação, evaporação, umidade e fluxo no solo, enquanto que o longitudinal está ligado aos processos de escoamento superficial, dos rios e do subsolo (TUCCI, 2002).

No entanto, ações antrópicas sobre os sistemas hídricos, por meio da alteração da superfície da bacia, têm impactos significativos sobre o escoamento e, por conseguinte sobre a vazão. Dentre as alterações da superfície pode-se mencionar a mudança e o uso do solo. A primeira está relacionada ao desmatamento, reflorestamento e impermeabilização e a segunda com a urbanização, reflorestamento para exploração sistemática e desmatamento ligado a extração de madeira, cultura de subsistência, cultura anual e cultura permanente.

O impacto do desmatamento sobre o escoamento superficial é refletido sobre as vazões mínimas, médias e máximas. A redução da cobertura de floresta aumenta a vazão mínima, média e máxima enquanto que o aumento da cobertura tem efeito contrário. A vazão mínima por sua vez depende das características do solo, após o desmatamento. Como por exemplo, quando o solo fica compactado, a capacidade de infiltração pode ser reduzida e assim o escoamento superficial aumenta que por sua vez, aumenta também a vazão mínima. Os impactos devido ao uso do solo, como a urbanização, impermeabiliza o solo com pavimentação e edificações, consequentemente reduzindo a infiltração da água no solo. Assim há um aumento na capacidade de escoamento por meio de condutos e canais que geram aumento da vazão e, por conseguinte o aumento das cheias (TUCCI, 2002).

Fatores ligados a fisiografia da bacia hidrográfica também contribuem para a variabilidade da precipitação e da vazão. Na bacia hidrográfica pode haver padrão de precipitação diferenciado devido à orografia. Assim como regime específico de vazão devido à hidrologia da bacia.

Estudos sobre variabilidade espacial da precipitação e vazão em bacia hidrográfica vêm sendo desenvolvidos relacionando os fatores atmosféricos, antrópicos e fisiográficos. Alguns desses estudos demonstram que em alguns casos os fatores antrópicos se sobrepõem aqueles atmosféricos. Em outros casos, as características fisiográficas são mais importantes do que os sistemas atmosféricos (KUMA e DUFFY, 2009).

A variabilidade temporal da precipitação e da vazão pode ser investigada por meio da detecção de modos oscilatórios que influenciam essas duas variáveis. Os diferentes regimes de precipitação observados dentro da bacia são explicados por diferentes modos temporais de alta e baixa frequência atuantes na bacia. O mesmo pode ser considerado para a vazão, uma vez que a precipitação é a variável de influência primária da vazão.

A bacia hidrográfica do rio São Francisco, a terceira maior do Brasil, a qual apresenta grande extensão territorial, e por isso, diversos sistemas meteorológicos se associam para formar diferentes regimes de precipitação ao longo da bacia. Devido majoritariamente a bacia está inserida na região Nordeste do Brasil, principalmente na parte semiárida da região, apresenta grande variabilidade espaço-temporal no campo da precipitação, uma vez que essa região apresenta grande irregularidade temporal e espacial de chuva (MARENGO et al., 2011). A bacia também tem forte intervenção antrópica. A partir da década de 1950 o vale do São Francisco sofreu grandes transformações devido a construção da represa de Três Marias,

implantação e expansão do polo siderúrgico e a industrialização no norte de Minas Gerais. No final da década de 1960, o Alto São Francisco sofreu as grandes alterações no solo. Em particular, o estado de Minas Gerais passou a ser ocupado pela agricultura comercial, por pastagens e atividades de reflorestamento, alterando profundamente a cobertura vegetal original (BRASIL, 2002). E a partir da década de 1980 foram estabelecidos os grandes projetos de irrigação e as usinas hidrelétricas do médio (Sobradinho), Submédio (Apolônio Sales e Paulo Afonso) e Baixo São Francisco (Xingó e Pão de Açúcar) (FONTES, 2011).

A identificação de modos oscilatórios dominantes, não apenas em uma sub-bacia, mas ela como um todo permite conhecer quais as principais escalas de tempo que mais influenciam a variabilidade hidroclimática na bacia tanto temporal quanto espacial e, entender os seus diferentes regimes de precipitação e vazão. O que pode ser de grande valia na otimização dos recursos hídricos. A detecção de tendência auxilia no planejamento das atividades associadas à agricultura de subsistência, por exemplo, e assim na qualidade de vida da população rural.

Diante do exposto, o objetivo geral desta pesquisa foi detectar tendências e modos oscilatórios dominantes na bacia do São Francisco e verificar se a ação antrópica pode transformar a influência atmosférica sobre a precipitação e a vazão na referida bacia. Os objetivos específicos foram: preencher as falhas das séries temporais por meio do método de regressão linear e avaliar a consistência dos dados com o método de dupla massa; extrair os componentes de tendência e os principais modos oscilatórios das séries temporais de precipitação e vazão por meio da Análise Espectral Singular; regionalizar a precipitação e a vazão através da Análise de Componentes Principais e, associá-la com as características físicas, sistemas meteorológicos e ação antrópica na bacia.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Bacia hidrográfica do rio São Francisco

O rio São Francisco é dividido em quatro grandes áreas de acordo com seus principais rios e características fisiográficas. A primeira divisão dos limites das grandes regiões fisiográficas da bacia foi feita em 1967, pelo United States Bureau Reclamation. A nova divisão também chamada de nova geografia do São Francisco foi implementada em 2002 pela comissão do Senado Federal, que acompanhava o Projeto de Revitalização do São Francisco, que estabeleceu novos limites das regiões fisiograficamente do Submédio e Baixo São Francisco com uma linha divisória passando próxima a cidade de Belo Monte (AL). Esse novo limite foi baseado em critérios de homogeneidades geológicas, geomorfológicas, hidrográficas e climáticas (BRASIL, 2003):

A Bacia do Rio São Francisco devido a sua grande extensão territorial e diversos estágios de desenvolvimento atende praticamente a todas as categorias de uso da água, por isso ela é caracterizada como uma bacia de usos múltiplos. A vazão natural média do rio é de $2.850 \text{ m}^3/\text{s}$ e, ao longo do ano, a vazão média mensal oscila entre $1.077 \text{ m}^3/\text{s}$ e $5.290 \text{ m}^3/\text{s}$. As descargas têm seus menores valores nos meses de setembro e outubro e os maiores no trimestre janeiro-fevereiro-março, sendo que em março são observadas as maiores descargas na bacia. Com relação à vazão regularizada, as barragens de Três Marias e de Sobradinho tem papel fundamental na regularização da vazão na bacia. A barragem de Três Marias garante uma vazão de $513 \text{ m}^3/\text{s}$, a jusante e, a partir da barragem de Sobradinho, a vazão regularizada passa a ser de $1.815 \text{ m}^3/\text{s}$ (BRASIL, 2004).

O uso dos recursos hídricos da bacia compreende a geração hidroelétrica com seus aproveitamentos de grande, médio e pequeno porte, com um potencial instalado superior a 10.500 MW. Abastecimento urbano, industrial e transporte hidroviário com 1.900 km de via navegável. No entanto, a maior demanda é para a irrigação que utiliza 68% da água da bacia. Três setores predominam no uso dos recursos hídricos do Alto São Francisco, primeiramente é o de abastecimento urbano com $26,7 \text{ m}^3/\text{s}$, em seguida o da irrigação com $14,4 \text{ m}^3/\text{s}$ e o terceiro setor é o da indústria com $11,47 \text{ m}^3/\text{s}$. No total são 10 usinas hidrelétricas em operação no estado de Minas Gerais, porém as maiores barragens/hidrelétricas são Três Marias, Rio das Pedras, Cajuru, Queimados e Paraúna. No Médio São Francisco a irrigação consome $58,8 \text{ m}^3/\text{s}$ da água disponível. A área de irrigação dessa região é de 162.407 ha. As demais categorias juntas consomem um pouco mais de $11 \text{ m}^3/\text{s}$. Sobradinho, Panderos,

Correntina e Rio das Fêmeas são algumas das barragens construídas na região (BRASIL, 2003). As principais barragens no Submédio São Francisco são Paulo Afonso I, II, III e IV, Moxotó, Itaparica e Xingó. Nesta região são 156.504 ha de área irrigada que em termos de percentagem corresponde 46,9%. Além do consumo da água para geração de energia elétrica e irrigação (SILVA, 2009).

2.2 Uso e ocupação do solo na bacia do rio São Francisco

Na bacia do rio São Francisco são 342.712 ha irrigados sendo que 30% são referentes a projetos públicos. O Médio São Francisco contempla 50% da área de irrigação, 27% no Submédio, 13% no Alto e 10% no Baixo. Na última região, a agricultura de sequeiro e agricultura irrigada como cana-de-açúcar, milho, mandioca, algodão, sisal, banana, abacaxi, fumo, hortaliças e café são as mais praticadas. Nos estados de Alagoas e Sergipe, nas áreas de várzea, há as atividades de piscicultura semi-intensiva associada à pecuária de médio porte (BRASIL, 2004).

Uma das regiões fisiográficas mais atingidas pela agressão ambiental é o Alto São Francisco com mais de 90 % urbanizada. Nessa região é encontrada o quadrilátero ferrífero, a maior região metropolitana da bacia e também a área mais industrializada. Por outro lado, o Baixo São Francisco apresenta dentre as regiões, a menos urbanizada com 49 % da sub-bacia. O Submédio e o Médio têm 56 % e 55% da área urbanizada, respectivamente (BRASIL, 2004). No Baixo São Francisco, os municípios de Igreja Nova, Coruripe, Junqueiro e Penedo se destacam devido a uma grande parcela na produção regional de açúcar e álcool (IBGE, 2009).

2.3 Variabilidade hidroclimática na bacia do rio São Francisco

2.3.1 Precipitação

A precipitação média anual no Alto São Francisco varia entre 1.100 a 2.000 mm seu período chuvoso compreende o trimestre novembro, dezembro e janeiro e, o menos chuvoso, junho, julho e agosto. No Médio São Francisco, a precipitação média anual é mais elevada ao longo da Serra Geral de Goiás com cerca de 1.400 mm e os menores índices são encontrados a oeste do lago de Sobradinho, com aproximadamente 600 mm. Essa área tem clima do tipo subúmido seco e semiárido de acordo com a classificação de Thornthwaite (BRASIL, 2004).

O Submédio São Francisco apresenta precipitação na faixa entre 350 e 800 mm com clima árido ou semiárido e, chuvas irregulares. Seu período principal de precipitação

ocorre no verão, no trimestre janeiro, fevereiro e março e, o menos chuvoso abrange os meses de julho, agosto e setembro. E por fim, o Baixo São Francisco, apresenta clima semiárido no interior, modificando-se progressivamente para o semiúmido-úmido em direção à foz. A estação chuvosa da região ocorre de maio a julho e a seca, ocorre de forma variável. Na faixa litorânea são quatro meses de seca, e à medida que adentra ao continente, o período seco vai aumentando até atingir sete meses, na região do semiárido. Assim, a precipitação média é maior na zona litorânea, com cerca de 1.300 mm e, aproximadamente 600 mm na parte semiárida (BRASIL, 2004).

2.3.2 Vazão

O estado de Minas Gerais contribui com 73,9% ($2.850 \text{ m}^3/\text{s}$) para a vazão média do rio São Francisco, 20% são oriundas do estado da Bahia, 2% de Pernambuco, 0,9% de Alagoas, 0,5% de Sergipe e, Goiás e Distrito Federal com 2,1% e 0,6% respectivamente. A vazão média que cada área fisiográfica contribui é a seguinte: $1.184 \text{ m}^3/\text{s}$ do Alto São Francisco, cuja contribuição vem dos rios Pirapora, das Velhas e Jequitaiá; $1.446 \text{ m}^3/\text{s}$ do Médio, sendo que o rio Juazeiro é o maior colaborador; $160 \text{ m}^3/\text{s}$ do Submédio e apenas $20 \text{ m}^3/\text{s}$ do Baixo São Francisco.

A vazão média mensal máxima ocorre em fevereiro no Alto, Médio e Submédio São Francisco, com $1.303 \text{ m}^3/\text{s}$ (rio Pirapora), $4.393 \text{ m}^3/\text{s}$ (rio Juazeiro) e $4.660 \text{ m}^3/\text{s}$ (Pão de Açúcar), respectivamente. No Baixo São Francisco, a vazão média máxima ocorre em março com $4.680 \text{ m}^3/\text{s}$, na Foz. Já a vazão média mínima ocorre em agosto no Alto com $637 \text{ m}^3/\text{s}$, nas demais áreas acontece em setembro, sendo que, no Médio São Francisco a vazão mínima é verificada no município de Juazeiro sendo de $1.419 \text{ m}^3/\text{s}$. No Submédio, em Pão de Açúcar é de $1.507 \text{ m}^3/\text{s}$ e no Baixo na Foz, de $1.536 \text{ m}^3/\text{s}$.

A disponibilidade hídrica por habitante por ano da bacia é de $7.024 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{ano}$ e considerando esse aporte de água por área fisiográfica e sua população, o Médio São Francisco é o que mais contribui com $15.167 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{ano}$, apesar de que as sub-bacias com menores contribuições hídricas estarem localizadas nessa região. O Alto São Francisco contribui com $6.003 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{ano}$, Baixo com $1.172 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{ano}$ e o Submédio com $899 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{ano}$. Todos os dados foram extraídos de Brasil, 2004.

2.4 Variabilidade Climática no Nordeste do Brasil

Uma vez que grande parte da bacia do São Francisco está inserida na região Nordeste, faz-se necessário conhecer a variabilidade climática dessa região para entender posteriormente a variação da precipitação e vazão na bacia do rio São Francisco.

Como a região Nordeste do Brasil (NEB) está localizada na região Tropical (1-18°S e 35-47°W) deveria ter uma distribuição de precipitação típica de áreas Tropicais. Não obstante, a distribuição de precipitação média anual é muito menor do que se esperaria para uma região equatorial. Na maioria da região, a precipitação anual é menor que 800 mm e vai diminuindo à medida que vai se deslocando para o interior, alcançado um valor de 300 mm. Essa má distribuição da precipitação se deve, segundo Moura e Shukla (1981), ao fato da região ficar situada na vizinhança da inversão dos ventos alísios e também de acordo com NIMER (1989) por causa da sua localização geográfica que sofre influência da alta subtropical semipermanente do Atlântico Sul.

O NEB apresenta alta variabilidade espacial na quantidade de precipitação na escala interanual. Da região costeira em direção ao interior, a diferença da precipitação entre essas duas áreas, chega a ser 40% maior na costa da região (MOURA e SHUKLA, 1981; UVO et al., 1998; KOUSKY, 1979). A região tem também como característica a alta variabilidade espaço-temporal da precipitação numa mesma estação chuvosa (MARENGO et al., 2011).

Na parte Leste do Nordeste do Brasil o sistema de alta pressão subtropical do Atlântico Sul tem papel importante na variabilidade interanual da chuva sobre a região, principalmente na estação chuvosa, quando o fluxo tem direção perpendicular à costa e dependendo da posição e intensificação da alta subtropical do Atlântico Sul, a estação chuvosa pode ser fortalecida ou enfraquecida. Outro fenômeno que influencia a precipitação interanual na região são as anomalias de Temperatura da Superfície do Mar do Atlântico (TSM). Rao (1993) verificou que a anomalia da TSM no Atlântico Tropical Sul é altamente correlacionada com a precipitação no leste do NEB.

Outro fator contribuinte para a variabilidade da precipitação no NEB é o papel dos oceanos Pacífico Tropical Sul e Atlântico. Anos secos ou chuvosos normalmente estão associados à variabilidade da Temperatura da Superfície do Mar do Pacífico Tropical Sul e Atlântico Tropical Norte, as quais influenciam na variabilidade pluviométrica dessa região.

O Pacífico Tropical influencia a chuva no NEB devido a dois fenômenos que ocorrem nesse oceano, a saber: a Oscilação Sul (OS), que é definida como a diferença

normalizada entre a Pressão ao Nível Médio do Mar (PNMM), em Tahiti, Polinésia Francesa (17 °33S, 149° 31W) e Darwin, na Austrália (12° 20S, 130° 52E), ou seja, a OS é obtida pela PNMM do Tahiti menos a PNMM em Darwin e o El Niño, que é o aquecimento anormal do Pacífico Tropical leste. Esses dois fenômenos são conhecidos como El Niño Oscilação Sul ENSO (WANG et al., 2012) ou ENOS (em português). A fase quente do ENOS é associada com precipitação deficiente no norte do Nordeste do Brasil e a sua fase negativa com intensificação das chuvas.

Coelho et al. (1999) verificaram que no outono, período chuvoso no norte do NEB, em anos de El Niño forte/moderado foram observadas anomalias negativas de precipitação no extremo norte do Maranhão, Ceará e costa leste da região NEB. Rao (1993) observaram que em anos de El Niño intenso não só a parte norte do NEB é afetada, mas toda a região.

2.5 Sistemas indutores de precipitação no âmbito da Bacia do rio São Francisco

2.5.1 Frentes Frias

Uma massa de ar, em Meteorologia, é referida para especificar uma grande porção da atmosfera que cobre milhares de quilômetros da superfície terrestre e, que possui distribuição vertical de temperatura e umidade, aproximadamente uniforme. A camada entre duas massas de ar com densidades diferentes é conhecida como superfície frontal. A interseção da superfície frontal com qualquer outra superfície de referência, como por exemplo, a superfície ao nível médio do mar, constitui uma faixa denominada de frente. Portanto, uma frente é classificada como fria quando sua passagem por um determinado local da superfície terrestre acarreta a substituição do ar quente que ali existia pelo ar frio (VAREJÃO-SILVA, 2006).

A frente fria é um importante mecanismo dinâmico que interage com a convecção não só no Sudeste e Nordeste do Brasil, mas também em toda a América do Sul (SIQUEIRA e MACHADO, 2004). De acordo com Kousky (1979) os sistemas frontais ou seus remanescentes, na parte sul do NEB (Bahia), têm papel importante na precipitação no período de dezembro a janeiro. Na costa do NEB o aumento da precipitação observado desde a Bahia até o Rio Grande do Norte é associado, no período de outono e inverno, com penetração de frentes frias que intensificam a precipitação em anos nos quais os ventos alísios de sudeste são mais fortes que o normal, sobre o oceano Atlântico oeste (RAO, 1993).

Quando as frentes frias interagem com a instabilidade tropical (NIMER, 1989) dá origem a fenômeno conhecido como Zona de Convergência do Atlântico Sul que provoca chuva, principalmente, no Sudeste do Brasil (ABREU,1998). Mas também as frentes frias

influenciam a precipitação na parte sul da região Nordeste do Brasil. Portanto esse sistema provoca chuva nas regiões do Alto e Médio São Francisco (DA SILVA e BRITO, 2009).

2.5.2 Vórtice Ciclônico de Ar Superior

O Vórtice Ciclônico de Ar Superior (VCAS) é identificado como uma circulação fechada cujo movimento é no sentido dos ponteiros do relógio (circulação horária). Essa circulação é observada geralmente no nível entorno de 12 km de altitude. De acordo Kousky e Gan (1981), os VCAS se formam na estação de verão, sendo janeiro o mês de maior ocorrência. Sua gênese é devida ao forte aquecimento do continente da América do Sul, nessa época, que leva ao desenvolvimento de um anticiclone (circulação com giro no sentido contrário ao ponteiro no relógio no Hemisfério Sul) em 200 mb e de um cavado sobre o oceano Atlântico Sul. A formação do VCAS está ligada a intensificação da crista que ocorre devido à forte advecção de ar quente no nível de 850 mb, advinda da costa sudeste do Brasil, quando um sistema frontal se aproxima dessa região (GAN e KOUSKY, 1986). Então, o cavado que está sobre o oceano Atlântico Sul, é intensificado, formando assim o vórtice.

A nebulosidade associada a esse sistema varia consideravelmente dependendo da sua intensidade e profundidade vertical, logo, o tempo também varia. A periferia do VCAS é acompanhada de muita nebulosidade e quando o VCAS passa por águas oceânicas quentes ou principalmente sobre áreas continentais, a atividade convectiva, com formação de nuvens do tipo cumulonimbus (nuvem de grande desenvolvimento vertical), se dá próximo do centro do vórtice devido a marcante variação diurna continental. No centro e parte sul do sistema, geralmente é sem nuvens, por causa da subsidência e, portanto, com tempo bom.

Nas baixas latitudes geralmente o VCAS se desloca para oeste e a atividade convectiva mais intensa é observada na direção do movimento, ou seja, no lado oeste do vórtice. Esse sistema no Atlântico Tropical Sul é geralmente encontrado entre 25-45 ° W e 10-25°S e quando penetra no Brasil, na maioria das vezes, próximo a Salvador (BA), as áreas sul e central do NEB sob a influência desse sistema ficam com tempo bom, enquanto as regiões oeste e norte do NEB são favorecidas com chuvas (KOUSKY e GAN, 1981).

2.5.3 Zona de Convergência Intertropical

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é caracterizada por uma faixa de nebulosidade que circunda o globo na região equatorial. Sua formação se dá pela convergência dos ventos alísios de nordeste oriundos do sistema de alta pressão subtropical do

Hemisfério Norte (HN) e dos ventos alísios de sudeste provenientes da alta subtropical no Hemisfério Sul (HS).

A ZCIT apresenta variabilidade sazonal, interanual e diária em sua posição e intensidade. Esse sistema tem deslocamento norte-sul, cuja posição mais ao norte do equador, sobre o oceano Atlântico, no Hemisfério Norte, ocorre em setembro em torno de 10-14°N e sua posição mais ao sul do equador acontece em março-abril atingindo latitude abaixo de 5°S (LOBO, 1982). A ZCIT é o principal mecanismo causador de chuvas sobre o norte do NEB, caracterizando o período chuvoso da região.

Estudos sobre variabilidade da precipitação no norte do NEB têm indicado que anos secos são caracterizados pela posição da ZCIT mais ao norte com seu retorno ao Hemisfério Norte no final do mês de fevereiro e início de março, isto é, em anos com precipitação abaixo do que é esperado para a região, a ZCIT migra mais cedo para o norte do equador. Isso faz com que o norte do NEB fique sob a região de subsidência, a qual inibe a precipitação (ARAGÃO, 1998; MOLION e BERNARDO, 2000). Por outro lado, anos chuvosos ocorrem quando a ZCIT atinge sua posição mais ao sul, nos meses de março e abril e, seu retorno para o Hemisfério Norte ocorre no mês de maio (UVO, 1998; LOBO, 1982), ou seja, nesse caso, a ZCIT torna-se mais intensa e as chuvas são mais abundantes no norte do Nordeste do Brasil.

2.5.4 Brisa marítima e brisa terrestre

Brisas terrestre e marítima são tipos de sistemas de circulação térmica que se desenvolvem na interface continente e oceano. Nessa interface, as características de aquecimento e resfriamento do continente e oceano desencadeia o desenvolvimento de um gradiente de pressão atmosférica que dá origem a esse tipo de circulação.

Geralmente a brisa marítima é mais forte do que a terrestre e auxilia no transporte de umidade para áreas mais afastada da costa. O sistema de brisa também determina os horários de precipitação em regiões costeiras e próximas. Na costa leste do NEB, por exemplo, o máximo de precipitação ocorre no período noturno e nos meses de outono e inverno devido à intensificação da brisa terrestre que ocorre porque nessas duas estações a temperatura do continente é menor do que a da superfície do oceano. Porém, áreas a 100-300 Km da costa apresentaram máximo de precipitação no período diurno por influência da brisa marítima (KOUSKY, 1979). Teixeira (2008) observou que a brisa terrestre possui dependência da forma côncava do litoral entre Fortaleza e norte do Rio Grande do Norte, juntamente com interação com os ventos alísios e intensidade da sua própria circulação, parece favorecer o aumento e a frequência da precipitação em Fortaleza e áreas circunvizinhas entre a madrugada

e início da manhã, em qualquer época do ano, e ainda, quando a brisa terrestre interage com a ZCIT ela também contribui para aumentar a frequência e intensidade da chuva.

2.5.4 Zona de Convergência do Atlântico Sul

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é um fenômeno típico de verão na América do Sul. Sua principal característica é a persistência de uma faixa de nebulosidade orientada no sentido Noroeste-Sudeste (NW-SE), cuja área de atuação engloba o centro sul da Amazônia, regiões Centro-Oeste e Sudeste, centro sul da Bahia, norte do Estado do Paraná e prolonga-se até o Oceano Atlântico sudoeste (FERREIRA et al., 2004). Outra característica dessa faixa de nebulosidade é a estacionaridade por vários dias, e conseqüentemente, alteração no regime de chuva com ocorrência dos altos índices pluviométricos, principalmente, no final da primavera e nos meses de verão, nas regiões afetadas (QUADROS e ABREU, 1994; GRIMM, 2011).

A ZCAS tem características marcantes como em 200 hPa (ar superior da atmosfera) a circulação sobre a América do Sul tropical é caracterizada por um anticiclone (giro do vento no sentido anti-horário) conhecido como Alta da Bolívia (AB). Um cavado (região da atmosfera em que a pressão é baixa em relação a área circunvizinha no mesmo nível) bem definido a oeste da AB, região de ocorrência do fenômeno dominada pela convecção (HOREL et al., 1989). Na baixa troposfera o giro dos ventos alísios devido a Cordilheira dos Andes contribui para o transporte de umidade da região Amazônica para latitudes médias, alimentando assim o sistema e também para a instauração da zona de convergência (QUADRO e ABREU, 1994).

Apesar de a região Amazônia ser importante no fornecimento de umidade para a ZCAS, Quadro et al. (2012) verificaram que o oceano Atlântico é a principal fonte do fluxo de umidade para esse sistema porque a evaporação local é insuficiente para fornecer toda a umidade para o total de precipitação gerada na região do fenômeno.

A ZCAS aparece na primavera e verão e algumas vezes no outono, mas nunca no inverno. Para o desenvolvimento da convecção deve existir forte convecção sobre a AS tropical, o que ocorre frequentemente no verão, e deslocamento de sistemas frontais de latitudes médias em direção ao NEB, ao longo da costa do Brasil (CAVALCANTI e ROWNTREE, 1998). Segundo Abreu (1998) os sistemas frontais canalizam a convecção nos baixos níveis da atmosfera alinhando na sua direção as instabilidades tropicais e conduz a umidade oriunda da Amazônia para o sudeste do Brasil. E ainda, determina à direção NW/SE

da ZCAS, a mesma dos sistemas frontais observadas em imagens de satélites, sobre o continente.

Em anos de ENOS e La Niña há variabilidade na atividade convectiva da ZCAS. Quadro e Abreu (1994) e Ferreira et al. (2004) observaram que em anos de ENOS a convecção tropical sobre o continente sofre ligeiro deslocamento para oeste da sua região preferencial de ocorrência e menos intensa. Por outro lado, a La Niña contribui positivamente para a manifestação da ZCAS, intensificando a sua atividade convectiva.

2.5.6 Ondas de Leste

As Ondas de Leste (OL's) são distúrbios no campo dos ventos alísios de leste e são caracterizados por aglomerados de nuvens convectivas, que se formam sobre o oceano e propagam-se de leste para oeste, acompanhando um cavado. Este normalmente se inclina para leste com a altitude. À frente do cavado é caracterizado pela divergência á superfície (movimento vertical descendente), ou seja, tempo bom. Na parte posterior do eixo do cavado é observada convergência á superfície, por conseguinte movimento vertical ascendente, logo as chuvas mais intensas ocorre após a passagem do eixo do cavado. As OL's são observadas no Pacífico leste e oeste, no oceano Atlântico e na faixa tropical próximo ao continente africano (VAREJÃO-SILVA, 2006; SPINOZA, 1996).

As OL's ocorrem ao longo do ano e nas estações de verão, outono e no inverno essas ondas atingem principalmente a costa norte e leste do NEB. Yamazaki (1975 apud SPINOZA, 1996) estudou a dinâmica dessa perturbação na região tropical do ATS e costa brasileira e observou na faixa entre 5°-10°S linhas de nuvens bem definidas deslocando-se de leste para oeste desde 10°E até 40°W e a alta pluviosidade nos meses de inverno ao longo da costa brasileira. Mota e Gandu (1998), verificaram que as anomalias positivas de precipitação na faixa litorânea norte e leste do NEB em junho de 1994 estavam associadas as ondas de leste.

Esse sistema tem uma periodicidade de ocorrência, uma velocidade de fase e um comprimento de onda. Yamazaki (1975 apud SPINOZA, 1996) encontraram ondas que apresentaram períodos de 4 dias, velocidade média de propagação de 10 m/s e comprimento de ondas de aproximadamente 4000 km. Os estudos de Chan (1990) apontaram que os trimestres março/abril/maio e junho/julho/agosto as ondas apresentaram características opostas. As ondas em março/abril/maio foram mais curtas (em torno de 4800 km) e mais lentas (velocidade de fase de 11 m/s) enquanto que as de junho/julho/agosto foram mais longas (6200 km) e mais rápidas (12m/s). Segundo Varejão-Silva (2006) as OL's duram de

uma a duas semanas deslocando-se de 6° a 7° de longitude/dia o que corresponde à velocidade típica de 25 km/h.

2.6 Variabilidade hidroclimática

A variabilidade hidroclimática vem sendo analisada levando em consideração a influência dos sistemas indutores de chuva, as características físicas da bacia e as atividades humanas. Esses estudos em grande parte têm relacionado variabilidade de temperatura, precipitação e vazão com variabilidade natural e antrópica, sendo que, alguns estudos indicam que os impactos devido à ação humana são de magnitudes maiores do que aqueles de ordem natural (HAO et al., 2008; VANZELA et al., 2009; ZU et al., 2010; ZHAN et al., 2011; 2013).

2.6.1 Variabilidade hidroclimática natural

Dettinger et al. (1998) mostraram argumentos convincentes da importância dos padrões dos sistemas climáticos de grande escala espacial e temporal como a Temperatura da Superfície do Mar e Pressão ao Nível Médio do Mar na escala interanual e decadal. Brito-Castillo et al. (2003) mostraram que a variabilidade interanual da precipitação e vazão nas estações de verão e inverno, na bacia hidrográfica da Califórnia, entre 1944 e 1999 foi devido apenas as condições climáticas. Os períodos úmidos e secos foram associados à influência dos fenômenos El Niño e La Niña.

Gochis et al. (2007) mostraram que no noroeste do estado do México, região semiárida, três regiões representaram a variabilidade da precipitação. Elas explicaram 85% da variação da precipitação e ainda, que o regime de vazão natural dessa região é dominado pela precipitação da estação de verão, cujo sistema atmosférico atuante é a monção da América do Norte. Nas quinze sub-bacias analisadas, a vazão foi maior nos meses de julho, agosto e setembro devido a atuação da monção. Nesses meses, o volume da vazão chega ser até 80 % da vazão total anual.

Dettinger e Diaz (2000) destacam o efeito das diferenças geográficas no fluxo de água em diferentes rios no mundo. Foram analisados dados mensais de vazão de 1.345 localidades. A vazão sazonal variou regionalmente de acordo com a precipitação máxima, evaporação e contribuições de neve e gelo. Em regiões secas dos Estados Unidos e México, a variação da vazão foi interanual. Nos rios tropicais os fluxos foram mais constantes. A variação da vazão foi correlacionada com o El Niño em algumas partes da América, Europa e

Austrália. Na América do Norte, Europa e nos trópicos, as séries de vazão refletiram a variação climática do oceano Pacífico, ao passo que, o leste dos Estados Unidos, Europa e América do Sul, as variações refletidas na vazão condiz com as variações climáticas do Atlântico Norte.

Souza e Da Silva (2013) por meio da análise de ondeleta investigaram quais escalas exercem maior influência sobre a variabilidade da precipitação na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, no estado do Ceará. Os resultados revelaram que a variação da precipitação na escala sazonal e interanual estão condicionadas ao El Niño e a escala decadal.

2.6 2 Variabilidade hidroclimática devido a fatores antrópicos

Todos os organismos modificam seu ambiente e os seres humanos não são exceções (VITOUSEK et al., 1997) e quando este ambiente é desenvolvido ele interrompe o ciclo hidrológico, que é o caso do uso e ocupação do solo (PRICE, 2009). Segundo Lambin et al. (2003) a cobertura do solo é definida pelos atributos da superfície do solo e subsuperfície imediata incluindo a biota, o solo, topografia, superfície e água subterrânea e estrutura humana. O uso do solo para produzir bens e serviços representa a alteração humana no sistema Terra consideráveis. A modificação da estrutura e funcionalidade do ecossistema altera a maneira como os ecossistemas interagem, como por exemplo, a atmosfera com os seus sistemas aquáticos. O âmbito e a natureza dessa modificação mudam drasticamente devido o crescente aumento da população humana e a expansão da tecnologia.

Mudanças no uso e cobertura do solo influenciam a condição para a transformação da precipitação em escoamento superficial. A maioria dos estudos sobre esse tema relaciona chuva e escoamento superficial e como a alteração do solo influencia essa relação. Os resultados têm demonstrado grandes efeitos na variação do escoamento de algumas bacias hidrográficas (YANG, 2011; TOMER e SCHILLING, 2009).

Os resultados de Tali (2012) revelaram que a mudança do uso do solo aumentou os picos das descargas e o volume de escoamento superficial na bacia. Esse efeito foi mais severo nas áreas a montante do rio onde as taxas de desmatamento foram muito maiores e a expansão agrícola foi excessiva. O estudo revela ainda, que antes de 1991 a relação precipitação/escoamento era linear. Após esse ano houve aumento no escoamento superficial e tendência decrescente na precipitação.

Brown et al. (2005) analisam alguns estudos onde foram utilizadas bacias hidrográficas emparelhadas com características similares e apenas a vegetação foi modificada no

experimento. Os resultados mostraram o aumento médio anual da água na bacia, apenas pela mudança na vegetação.

Nas áreas urbanas, os componentes do ciclo hidrológico são modificados pelo desenvolvimento de prédios, telhados, estradas, instalações industriais e áreas residenciais. À medida que o desenvolvimento urbano se expande a quantidade de solo florestal, zonas úmidas e outras formas de espaço aberto, no sistema natural, vão diminuindo (RENTSCH, 2011). Como consequência os solos tornam-se superfícies infiltráveis o que leva a diminuição na taxa de infiltração e, conseqüentemente, no aumento da quantidade e na taxa de escoamento superficial. Esta afirmativa observou-se nos estudos de Yang et al. (2011) que mostraram que um aumento de 10% na área de superfície impermeável na bacia do rio White, na China, ocasionou um acréscimo em torno de 15% no fluxo da bacia.

A urbanização pode influenciar o escoamento superficial. O solo urbano afeta o tempo e a magnitude da entrada da precipitação na bacia hidrográfica. Além disso, áreas urbanizadas podem contribuir para o aumento dos índices de precipitação devido ao aquecimento, as chamadas ilhas de calor. Essa ilha de calor pode alterar a convecção das massas de ar em áreas urbanas e juntamente com a rugosidade da superfície urbana e do dossel, tais como edifícios, a infraestrutura ou árvores podem afetar a circulação do ar, além dos aerossóis que também podem influenciar o clima local (O'DRISCOLL et al., 2010).

Barragem é utilizada como forma de gerenciamento dos recursos hídricos para armazenar água em reservatórios para diversas utilidades, tais como recreação, irrigação e controle de cheias, abastecimento de água e também para mitigar as conseqüências de mudanças climáticas sobre a bacia o que altera o ciclo hidrológico diminuindo ou aumentando do fluxo do rio (BARNETT et al., 2008; HAO et al., 2009; SINGER, 2006).

As análises de tendência e de regressão dos estudos de Hao et al. (2009) para o rio Tarim em Xinjiang, na China, indicam que as atividades humanas tais como agricultura, produção industrial e construção de reservatório foram os principais fatores que causam diminuição na vazão do rio Tarim. A construção de cinco reservatórios no leito principal do rio, entre 1970 e 1972, interrompeu o fluxo a jusante que compreendeu uma área de 321 km. O resultado desse rompimento foi que os lagos Lop Nor e Taitima secaram completamente, o primeiro em 1970 e o segundo em 1972.

Geralmente os reservatórios construídos a montante de um rio são para controle de cheias e, sequestram quase o dobro do escoamento anual de água que é armazenado e liberado no período de estiagem para diversos fins (SINGER, 2007). Quando essa água é represada e liberada, o fluxo do rio é alterado como ocorreu no rio Mississipe, segundo Rayne e Forest

(2010) afirmaram que a barragem construída a montante desse rio, na década de 1960, foi propositalmente para mudar o regime hidrológico nas regiões a jusante do rio. Antes da construção da barragem a menor descarga média mensal, na parte sul do rio Saskatchewan, na estação de Saskatoon, ocorria em janeiro. Após a construção da barragem os picos de vazão passaram a ocorrer em janeiro com um pico secundário no mês de junho. Além disso, o período de inundação mudou da primavera e início do verão para meado de inverno.

Segundo Jones (2011), globalmente a variação da vazão tem sido bastante diferentes em rios gerenciados daqueles não gerenciados. A capacidade de armazenamento nos reservatórios dos Estados Unidos tanto para operação de controle como para a irrigação causam decréscimos na vazão máxima e acréscimo no fluxo mínimo. Os resultados de Yang et al.(2004) demonstraram que devido à regularização de quatro barragens na parte superior da bacia do rio Yenisei, na Sibéria, o regime mensal da vazão foi alterado reduzindo o pico da vazão em 15 a 30% no período de verão e aumentado a vazão mínima, em 5 a 30 % nos meses de inverno.

Fontes (2011), no seu estudo sobre o rio São Francisco após as grandes barragens foca nas mudanças recentes do regime hidrossedimentológico e na dinâmica fluvial do baixo curso do rio, isto é, do Baixo São Francisco. Nesse estudo os impactos da cascata das grandes barragens a montante foram divididos em três períodos de acordo com a implantação e operação das barragens. O primeiro período (1978-1987), leva em consideração a influência apenas da barragem de Sobradinho, que segundo o autor “é plausível considerar Sobradinho como uma segunda nascente (artificial, neste caso) do São Francisco, na qual as vazões são controladas pelo homem, e, apenas parcialmente depende dos índices pluviométricos e deflúvios de montante”. O segundo período (1988-1993) leva em consideração a influências das barragens de Sobradinho, Itaparica, Paulo Afonso IV e Moxotó e as consequências são maior redução no aporte de sedimentos e maior controle das altas vazões e eventuais cheias nessa região. E por fim, o terceiro período (1994-2003) que corresponde à influência da usina hidrelétrica de Xingó marcando definitivamente o controle antrópico sobre o sistema fluvial natural a jusante da barragem.

2.7. Análise de Componentes Principais

A Análise de Componentes Principais (ACP) é uma técnica de análise exploratória multivariada muito utilizada na redução da dimensionalidade de dados. Esta técnica é útil quando se tem dados em grande número de variáveis e acredita-se que há redundâncias nessas

variáveis, ou seja, algumas variáveis são correlacionadas e principalmente altamente correlacionadas (estão medindo o mesmo constructo). Nesse caso, então é possível transformar as p variáveis correlacionadas em um conjunto relativamente pequeno de k variáveis não correlacionadas, de tal modo que, as k variáveis derivadas, se consideradas como variáveis independentes maximizará a variância explicada para as variáveis originais. As novas k variáveis são denominadas de componentes principais e representam grande parte da variância das variáveis originais (DUNTEMAN, 1989; MOROCO, 2007). Essa transformação ocorre sem perda significativa de informação e essas componentes podem ser mais tarde utilizadas como índices ou indicadores que resumem as informações disponíveis nas variáveis originais. Além disso, a ACP busca eliminar algumas variáveis originais que possuam pouca informação.

A ACP baseia-se na matriz de variância-covariância ou na matriz de correlação. Normalmente a matriz de correlação (R) é a mais utilizada para extração dos autovalores e autovetores. A preferência pela matriz de correlação é devido à padronização dos dados, o que torna todas as variáveis do conjunto de dados com o mesmo peso na análise. A padronização é requerida quando as variáveis forem medidas em escalas diferentes ou quando tiverem na mesma unidade, mas a variância das variáveis diferir consideravelmente (DUNTEMAN, 1989).

ACP é largamente usada para agrupar áreas de afinidades para fornecer regionalização detalhada e relacionar com sistemas atmosféricos de diversas escalas, potencial econômico (REZENDE et al., 2007), dentre outros. Esteban et al. (2006) aplicaram essa técnica para obter padrões de circulação atmosférica que explicassem as principais configurações da pressão ao nível médio do mar e a 50hpa (hecto pascal), na parte oeste da Europa, para um período anual e diário. Neste estudo a parte oeste da Europa foi agrupada em vinte áreas homogêneas. Kostopoulou e Jones (2007) usaram essa técnica para compreender a variabilidade climática na parte leste do Mediterrâneo e sugerem que a técnica é adequada para fins de classificação climatológica, pois a multidimensionalidade dos dados foi reduzida e os principais padrões de variabilidade foram identificados.

As diversas áreas de aplicabilidade da Análise de Componentes Principais mostram a eficácia da técnica tanto para homogeneização de regiões seja em escala espacial ou temporal (ROMERO et al., 1998, FRAGOSO e GOMES, 2008; ESTEBAN et al., 2006) para definir padrões de variáveis meteorológicas e hidrometeorológicas como para redução de dados (JAYAWARDENE et al., 2005).

Para o Nordeste do Brasil, Coutinho et al. (2010) utilizaram essa técnica com o objetivo de averiguar se em uma região onde a precipitação apresenta alta variabilidade espacial, o padrão de precipitação pode ser representado por poucos componentes, ou se é necessário um número maior que dez, para explicar o regime de precipitação. Para esse estudo, três componentes foram suficientes para explicar o regime de precipitação do estado do Ceará.

Guedes et al. (2010) utilizaram para uma região que apresenta clima do semiárido nordestino, da pré-amazônia e do Planalto Central do Brasil, o estado do Piauí. Foram utilizadas 27 estações para o período de 1963 a 2000. Duas componentes explicaram 88% da variação dos dados, sendo que o fator1 foi associado com a precipitação no norte do estado e o fator2 com a precipitação ao longo da faixa oeste, no entanto, não houve nenhum fator que explicasse a precipitação na parte leste.

Kumar e Duffy (2009) aplicaram a técnica para entender a estrutura espacial da precipitação, vazão e temperatura na bacia hidrográfica do rio Colorado. Os resultados mostraram que os agrupamentos foram formados de acordo com os fatores atmosféricos, antrópicos e fisiográficos que mais influenciaram essas variáveis. Houve formação de grupo devido à ação antrópica sobre os recursos hídricos da bacia.

Segundo Guntelman (1989) ACP com matriz de covariância com grandes diferenças nas variâncias entre as variáveis causam problemas. O maior deles é que variáveis com grandes variações automaticamente agrupam os maiores pesos nos componentes principais e variáveis com pequenas variações automaticamente juntam os pesos insignificantes. Isso ocorre, segundo o mesmo autor, devida a forma de maximização da variância de uma composição linear, que é atribuí os maiores pesos para variáveis que possuem as maiores variações.

2.7.1 Autovalores e autovetores

As componentes principais de um conjunto de dados são combinações lineares de todas as variáveis desse conjunto. Nessa combinação linear há variáveis que contribuirão mais e outras que tem menor contribuição. Vale ressaltar que na ACP obtém tantas componentes quantas variáveis existirem. Quem determina quais variáveis contribuem mais ou menos para um componente principal são os chamados autovetores. Eles podem também ser usados para

determinar a carga da variável sobre o eixo principal. As variáveis cujos autovetores são maiores tem maior contribuição para um determinado componente principal (DUNTEMAN, 1989). Portanto, na ACP há também tantos autovetores quanto variáveis.

Os autovalores indicam o quanto de variância um componente principal contém da variação total das variáveis originais. Portanto, é por meio dos autovalores que os componentes principais são retidos para uma análise. Os autovalores e autovetores são extraídos da matriz de variância-covariância ou da matriz de correlação.

2.7.2 Número de componentes principais a ser extraídos

Segundo Field (2009), nem todos os componentes principais são extraídos numa análise e, há um debate sobre os critérios que levam a decidir se um fator é estatisticamente importante. A decisão de quantos componentes serão retidos dependerá da quantidade de informação que se está disposto a perder ou do objetivo da análise e ficará a cargo do pesquisador. De acordo com Dunteman (1989) se a necessidade for simplesmente descrever um conjunto de variáveis sem considerar uso subsequente, então retendo os k maiores componentes principais pode ser adequando. Se a necessidade for usar os componentes principais como preditores de variável dependente, então as correlações com as variáveis seriam consideradas também.

Porém, Hair et al. (2005) advertem para os números de componentes selecionados. Segundo os autores há consequências negativas na seleção de componentes em excesso ou a menos para representar os dados. Se poucos componentes são selecionados a estrutura correta não é revelada e, dimensões importantes podem ser omitidas. No caso contrário, a interpretação se torna mais difícil quando os fatores forem rotacionados. A seguir são indicados os quatro principais critérios de retenção dos componentes principais:

1 – Critério de Cattell: os componentes retidos deverão ser aqueles cujos autovalores são maiores que um. Essa técnica é utilizada por meio de um gráfico. Deve-se procurar um ponto de inflexão onde os componentes que aparecem antes do ponto são considerados significativos e são retidos para a rotação; aqueles que aparecem depois (em uma cauda) são assumidos sem importância. O gráfico é conhecido como Diagrama de Declividade.

2 – Critério de Kaiser: recomenda que todos os componentes principais com autovalor maior que um deverão ser retidos. A base do critério é que autovalores representam uma grande parte da variância explicada por um componente e que autovalor de um representa um

montante substancial de variação (FIELD, 2009). No entanto, esse critério ao reter apenas autovalores maiores que um, pode desperdiçar muita informação que melhor represente determinadas variáveis (DUNTEMAN, 1989)

3 – Critério de Jolliffe: é recomendado por este critério selecionar os componentes principais cujos autovalores forem maiores que 0,7.

4 - O critério de percentagem de variância: é baseado no percentual acumulativo da variância total extraído por sucessivos componentes principais. Neste critério se as razões teóricas e práticas exigirem certa comunalidade para cada variável, a pesquisa deverá incluir tantos fatores quantos necessários para representar adequadamente uma das variáveis originais. Em ciências naturais os componentes extraídos devem explicar pelo menos 95% da variância ou até que o último componente explique apenas uma pequena parcela (menos de 5%). Este critério contrasta com os demais citados acima, os quais focalizam apenas no montante total da variância explicada negligenciando o grau de explicação para as variáveis individuais (HAIR et al., 2005)

2.7.3 Rotação dos componentes principais

Quando se extrai os componentes principais a maioria das variáveis geralmente tem cargas altas no componente mais importante e cargas baixa nos demais, o que dificulta a interpretação (FIELD, 2009). A rotação dos componentes é usada para distinguir os componentes e assim melhorar a interpretabilidade e utilidade científica da solução (SHARMA, 1996). Dessa forma, pode-se determinar qual constructo (característica) é medido pelo componente um e, qual constructo é medido pelo componente dois e, assim por diante, dessa forma reduzem-se algumas das ambiguidades que frequentemente acompanham soluções de fatores não rotacionados (HAIR,2005).

Os dois tipos de rotação comumente mais usados são a ortogonal e a oblíqua e a escolha entre um dos dois depende da inter-relação que se supõe para os fatores. Se o intuito é encontrar fatores independentes os métodos de rotação ortogonal são os indicados, enquanto que, se o objetivo da pesquisa é encontrar fatores correlacionados entre si, deve-se dar preferência aos métodos de rotação oblíqua.

2.7.4 Rotação ortogonal

Na rotação ortogonal são utilizadas as cargas as quais são as correlações entre as variáveis originais e os componentes principais. Na rotação ortogonal os componentes principais são rotacionados enquanto são mantido independente (não correlacionados), esta

solução oferece facilidade na interpretação e nos relatos dos resultados (TABACHINICK, 2002 e FIELD, 2007).

Há vários tipos de rotação ortogonal, porém os três mais utilizados são: varimax, quartimax e equamax. A rotação varimax tem como objetivo simplificar os fatores por meio da maximização da variância das cargas dentro dos fatores entre as variáveis. As cargas que já são altas na extração dos componentes tornam-se mais altas após a rotação e, as cargas que já são baixas tornam-se menores. Essa maximização é feita sobre uma coluna da matriz padrão de fatores. A rotação varimax também tende a reaproximar a variância entre os fatores de modo que se tornem relativamente iguais em importância; a variância é tomada dos primeiros componentes principais extraídos e distribuídos positivamente entre eles. A rotação quartimax simplifica as variáveis aumentando a dispersão das cargas dentro das variáveis, por meio dos fatores. A operação é aplicada sobre as linhas da matriz padrão de fatores. E por fim, a rotação equamax, é um híbrido entre varimax e quartimax que tenta simultaneamente simplificar os fatores e as variáveis. Portanto, a rotação varimax simplifica os fatores, quartimax as variáveis e equamax ambos (TABACHINICK, 2002).

2.7.5 Rotação oblíqua

A rotação oblíqua oferece uma gama contínua de correlações. As correlações entre os fatores são determinadas por uma variável denominada delta (δ) pelo software, por exemplo. Os valores de delta e gama (Γ) determinam a quantidade da máxima correlação permitida entre os fatores. Quando o valor menor que zero, as soluções são cada vez mais ortogonais; a cerca de -4 a solução é ortogonal. Quando o valor é zero, as soluções podem ser altamente correlacionadas. Valores próximo de 1 podem produzir fatores que são altamente correlacionados. Embora exista uma relação entre os valores de delta e gama e o tamanho da correlação, a correlação máxima a um dado tamanho de gama e delta depende do conjunto de dados (TABACHINICK, 2002 e FIELD, 2007).

2.7.6 Interpretação dos componentes principais

Visto que as componentes principais são combinações lineares das variáveis originais, podem-se utilizar as cargas para interpretar o significado da combinação linear. Neste caso, os dados devem ser padronizados. Quanto maior for a carga de uma variável mais influencia ela possui na formação da pontuação do componente principal e vice-versa.

Como na extração dos componentes principais (CP), há um debate de quantas variáveis compõem um CP e a forma de atribuir variáveis a um CP é por meio da sua carga. Stevens (1992) sugere vários critérios levando em consideração à significância do tamanho da amostra. Segundo o mesmo autor, apenas variáveis com carga maior que 0,4 devem ser atribuídas ao um componente principal (o que explicaria por volta de 16% da variância da variável). De acordo com Field (2009) pesquisadores consideram variáveis com carga de 0,3 importante. Porém Sharma (1996) comenta que tradicionalmente investigadores utilizam cargas de 0.5 ou maior como ponto de corte.

Nesse contexto de significância prática das cargas fatoriais, Hair et al. (2005) sugerem algumas normas praticas frequentemente usadas como meio de fazer exames prévios da matriz fatorial para tamanho de amostra igual a 100 ou maior. Segundo os autores cargas $\pm 0,30$ atingem um nível mínimo; cargas $\pm 0,40$ são consideradas mais importantes e cargas $\pm 0,50$ ou maiores são consideradas com significância prática. Como as cargas fatoriais são a correlação entre a variável e o fator, quando essas cargas são elevadas ao quadrado elas representam a quantidade da variância explicada pelo fator. Desse modo, uma carga de 0,30 significa que 10% da variância é explicada pelo fator enquanto que uma carga de 0,50 representa 25% da variabilidade que o fator explica.

2.8 Análises Espectral Singular

A Análise Espectral Singular ou em inglês Singular Spectral Analysis (SSA) é referida como uma técnica moderna e poderosa para análise e previsão de séries temporais que combina os elementos da análise clássica de séries de tempo, estatística multivariada, dinâmica de sistemas e processamento de sinais (GOLYANDINA et al., 200 e ZHIGLJAVSK, 2010). O objetivo da SSA (a sigla em inglês será usada para ficar padronizada com a literatura internacional) é decompor uma série original em uma soma de um número pequeno de componentes de sinais independentes e interpretáveis tais como tendências, padrões oscilatórios e ruído sem estrutura em vez de modelos paramétricos para os dados (HASSANI, 2007 e SELA et al., 2010).

Sua gênese está associada com os trabalhos de Broomhead e King (1986a, 1986b) e Broomhead et al. (1987) e Vautard e Ghil (1989). A SSA está projetada para extrair informações a partir de séries temporais curtas e ruidosas sem conhecimento *a priori* do sistema dinâmico que as geraram (YIOU et al., 1997 e SCHOELLHAMER, 2001).

De acordo com Golyandina et al. (2001) e Myung (2009), sobre os aspectos metodológicos e de aplicações da SSA alguns trabalhos são mundialmente conhecidos como os de Vautard et al. (1992), Ghil e Taricco (1997), Allen e Smith (1996), Danilov e Zhigljavsky (1997) e Yiou et al. (2000). No entanto a técnica se consolidou com a publicação dos livros *Singular spectrum analysis: a new tool in time series analysis* de Elsnesr e Tsonis (1996) e *Analysis of time series structure: SSA and related techniques* de Golyandina et al. (2001).

Segundo Kumar e Daffy (2009) a SSA é baseada na Função Ortogonal Empírica ou Análise de Componentes Principais e tem sido usada para identificar componentes de baixa frequência em dados. Essa técnica é baseada na ideia de uma janela deslizante sobre uma série de tempo específico e, procura por padrões que representam uma maior proporção da variância da série de dados.

A SSA é realizada por meio de uma matriz de covariância defasada pelo produto da matriz trajetória da série temporal e sua tranposta. De acordo com Ghil et al. (2002) há dois métodos para o cálculo da matriz de covariância defasada: o de Broomhed e King (1986a), onde o comprimento da janela é deslocado ao longo da série temporal produzindo uma sequência de $N = N - M + 1$ vetores no espaço do encaixe. E o de Vautard e Ghil (1989) onde a matriz de covariância é estimada diretamente dos dados como uma matriz Toeplitz. A estimativa da matriz de covariância pelo primeiro algoritmo apresenta menos variância, enquanto que o segundo torna-se mais eficaz na redução do ruído quando apenas poucas centenas de dados são disponíveis.

A SSA básica é fundamentada em dois estágios, quais sejam: decomposição e reconstituição da série temporal. No primeiro estágio, a série temporal é decomposta em valores singulares e o principal parâmetro dessa etapa é o comprimento da janela. A escolha do comprimento da janela é baseada em duas considerações: quantidade de informação que se deseja extrair versus o grau de confiança estatística. A primeira requer uma janela tão grande quanto possível, e a segunda, exige muitas repetições das características de interesse quanto possíveis (VAUTARD e GHIL, 1989). O comprimento da janela é o principal parâmetro no estágio de decomposição.

Segundo Golyandina et al. (2001) para análise da estrutura da série temporal o comprimento da janela não deve ser maior que a metade da série. No caso do comprimento da janela ser muito grande, quando se extrai a tendência, por exemplo, o autotriple correspondente à tendência pode se misturar com outros componentes da série, como os de

periodicidade. Por outro lado, quando o comprimento da janela é pequeno, pode ocorrer a mistura dos componentes interpretáveis da série temporal.

Hassani (2007) sugere que o comprimento da janela deve ser suficientemente grande de modo que cada vetor defasado incorpore parte essencial do comportamento da série original, porém não deve ser superior que a metade da série ($N/2$). A autora recomenda ainda que se há informações que a série temporal possa ter um componente periódico, com um período inteiro, tal como um componente sazonal, por exemplo, é aconselhável assumir o comprimento da janela proporcional aquele período, para uma melhor separabilidade do componente periódico. A escolha inadequada do comprimento da janela dificulta um bom agrupamento e como consequência diminui a precisão na aproximação da série (ESQUIVEL, 2012).

No segundo estágio é feita a reconstituição da série temporal. Para se reconstruir a série, primeiramente deve-se separar o sinal da série do ruído que é obtida por meio da inspeção da quebra do diagrama screen (semelhante ao da ACP) dos autovalores ou dos valores singulares. Porém, essa separação só é bem feita quando o ruído intrínseco que perturba o sistema determinístico básico e o ruído extrínseco que afeta as observações são ambos branco, ou seja, não são correlacionados de um passo de tempo para outro (GHIL et al., 2002). No caso em que os ruídos são correlacionados é mais difícil visualizar a separação dos pares oscilatórios do ruído por meio do diagrama screen. Uma técnica muito utilizada para a identificação dos pares oscilatórios dos autoelementos é a de Monte Carlo (ROBERTSON e MECHOSO, 1997; GHIL et al., 2002;).

Pela metodologia sugerida por Golyandina et al. (2001) a separação do sinal da série do ruído é baseada em uma propriedade denominada de separabilidade. A separabilidade é uma propriedade dentro do algoritmo básico da SSA que caracteriza como os diferentes componentes da série original podem ser separados um do outro. As características dos autotriples da decomposição do valor singular da matriz trajetória podem ajudar muito a fazer o agrupamento adequado para a extração dos componentes da série. O agrupamento dos autotriples depende do objetivo do estudo como: agrupamento para extração de tendência, agrupamento para extração de componentes periódicos, agrupamento para suavização da série, dentre outros. Os autotriples são organizados em dois grupos: o sinal e o ruído. O primeiro é formado pelos componentes que contém uma estrutura periódica e/ou de tendência enquanto o segundo não se verifica essa estrutura na série temporal. Para a identificação dos autotriples algumas informações contidas nos autovetores, vetores fatores e valores singulares

são considerados, visto que cada autotriples consiste de cada um deles (GOLYANDINA, 2011).

Os valores singulares podem se visualizados por meio do screen plot em que seus valores são apresentados em ordem decrescente da sua magnitude. Os “planaltos” explícitos representam números ordinais dos pares dos autotriples e estão relacionados ao sinal da série. Enquanto que a “calda” do espectro dos valores singulares se refere ao ruído. O primeiro valor singular sempre está associado ao componente de tendência. Autovalores com valores próximos o suficientes podem ser considerados como um par e pode ser associado a um componente periódico (GOLYONDINA, 2001, HASSINI, 2007 e ESQUIVEL, 2012).

A correlação ponderada é uma condição para que duas séries sejam separáveis. Duas séries são separáveis somente se a correlação ponderada for nula ou próxima de zero, isto é, os componentes altamente correlacionados pertencem a um mesmo grupo de autotriples (ESQUIVEL, 2012). A matriz w-correlação indica as correlações entre os componentes obtidos por meio da decomposição do valor singular através de uma escala de cores variando do branco ao preto. Tonalidade mais escura significa que os componentes são altamente correlacionados e estão relacionados ao sinal da série temporal. Enquanto que tonalidade mais clara tem correlação baixa e, portanto é referida como ruído (GOLYONDINA, 2001). O comprimento da janela e a forma de agrupamento das matrizes são dois parâmetros da SSA básica que depende das propriedades das séries originais e também do objetivo da análise.

A SSA é baseada na ACP, no entanto a natureza dos dados é diferente o que implica também interpretações diferentes dos autovetores. Os autovetores na análise espectral singular são considerados como fragmentos da série temporal em vez de distribuição espacial de valores em um único tempo. Assim, os autovetores representam mais padrões de tempo característicos exibidos pelos dados do que padrões espaciais (WILKS, 2006).

Segundo Wilks (2006) existem semelhanças entre análise de Fourier e SSA. Na análise de Fourier as Funções Ortogonais Empíricas Temporais (T-EOF) correspondem às funções seno/cosseno enquanto que os componentes principais temporais (T-CP) na SSA correspondem às amplitudes. As diferenças entre as duas técnicas ficam por conta das funções bases. As funções bases ortogonais na análise de Fourier são senoidais fixos, enquanto que, na análise espectral singular são as T-EOF de dados adaptativos. Desse modo, as amplitudes na função de Fourier são constantes de tempo independente ao passo que na SSA os T-EOF são

funções de tempo. Assim, a análise espectral singular pode representar variações temporais que podem ser localizadas no tempo e, não é necessário recorrer à série temporal completa.

Outra similaridade com a análise de Fourier é que a SSA pode detectar e representar oscilações periódicas ou quase periódicas das características básicas de uma série temporal. Essas características são representadas, na análise espectral singular, por pares de T-CP e seus autovetores correspondentes. Esses pares de autovalores são iguais ou aproximadamente iguais. O padrão de tempo característico representado pelos pares de autovalores tem a mesma forma ou forma muito similar. Ao contrário das funções seno e cosseno, a forma dos pares de T-CP é determinada pelo padrão de tempo dos dados básicos (WILKS, 2006).

A SSA tem sido aplicada em diversas áreas do conhecimento tais como climatologia, meteorologia, geofísica, economia, medicina, engenharia, dentre outras (ZHIGLJAVSKY, 2010). No entanto, é uma técnica mais aplicada na área de meteorologia, climatologia, física não linear e processamentos de sinais.

Particularmente na área climatológica, a SSA tem sido aplicada para diversos objetivos, tais como, estimativa de baixa frequência periódica e quase periódica para examinar estes componentes no que diz respeito às condições fisiográficas e hidrológicas em bacia hidrográfica como em Kumar e Duffy (2010), extrair informações sobre tendência e efeitos sazonais de series temporais de vazão (DESTRO et al., 2010), variabilidade interdecal (EDEN e JUNG, 2000), tendências de aquecimento global (GHIL e VAUTARD, 1991) e variabilidade intrasazonal (PAEGLE et al., 1999; SULTAN et al., 2008).

Krepper et al, 2003 analisaram o fluxo da bacia do rio Uruguai juntamente com a precipitação com a técnica da Análise Espectral Singular a fim de verificar como o sinal das sub-bacias se relaciona com o sinal da bacia como um todo. Eles encontraram picos de aproximadamente 6 e 3,6 anos no fluxo do rio. Quanto à precipitação apenas duas a três sub-bacias da parte alta apresentaram picos como os observados no fluxo do rio Uruguai. A precipitação na parte baixa da bacia indicou tendência positiva.

Marques et al. (2006) testaram a SSA para extrair componentes de tendência e oscilatórios e sua habilidade na previsão de algumas séries temporais hidrológicas como temperatura da água, precipitação e vazão. Foi constatado que a Análise Espectral Singular foi capaz de extrair componentes importantes com comportamento hidrológico irregular característico, tais como precipitação e escoamento superficial.

Aplicação da SSA para extração das componentes de tendências e de periodicidade de séries temporais tem sido muito satisfatória (ROBERTSON e MECHOSO, 1998; IONITA

et al., 2011). Destro et al. (2010) a utilizaram para séries de vazão para o rio Cuiabá, em Mato Grosso, e concluíram que a técnica foi capaz de modelar a tendência não linear da vazão e sugeriram que o método fosse utilizado como ferramenta de auxílio na gestão dos recursos hídricos, no que diz respeito a tomada de decisão.

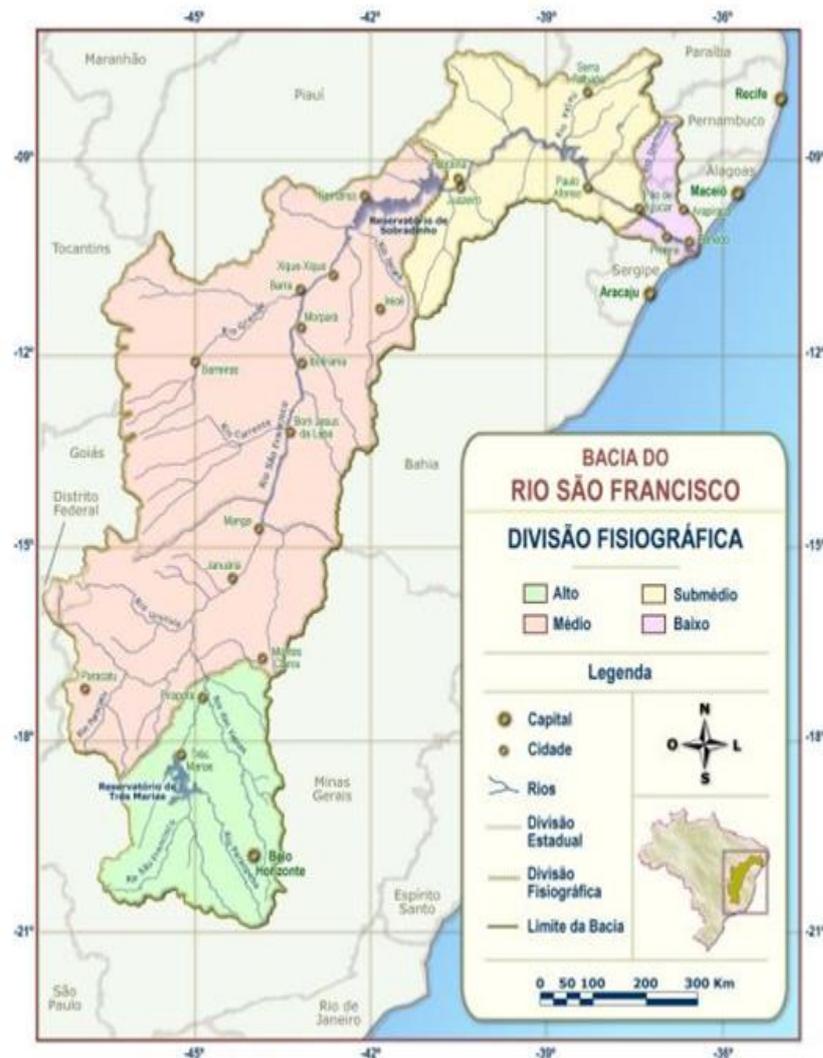
Krepper et al. (2006) investigaram a variabilidade sazonal da precipitação e escoamento superficial na bacia do rio Paraguai. Eles estavam interessados na relação entre os modos oscilatórios anuais, interdecadal e na tendência. A bacia do rio Paraguai foi dividida em duas partes: a parte alta representada por Puerto Bermejo e parte baixa foi delimitada pela confluência do rio Apa na confluência com o rio Paraná. A SSA foi aplicada para analisar a estrutura temporal da série de precipitação e de vazão. Os resultados revelaram que existe tendência na contribuição da precipitação para a parte alta e baixa da bacia, sendo que esta última apresentou uma oscilação quase decadal. O fluxo sazonal apresentou modos altamente significativos na banda de baixa frequência, como tendência positiva. E o sinal de baixa frequência representou papel importante no comportamento do fluxo durante eventos extremos a partir da segunda metade do século.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A área de estudo é a bacia do rio São Francisco. O rio São Francisco nasce na serra da Canastra no município de São Roque, estado de Minas Gerais, e deságua no oceano Atlântico entre os estados de Sergipe e Alagoas. Pela nascente histórica, seu curso principal é de 2.814 km, e pela nascente geográfica, via rio Samburá, é de 2.863 km no município de Medeiros (MG). O rio segue uma direção norte-sul desde a sua nascente até a confluência com o rio Urucuia, e a partir desse ponto, inicia-se um grande arco com direção sul-nordeste até a cidade de Cabrobó (PE), depois gira para o leste e logo em seguida para o sudeste, até a sua foz entre as cidades de Aracaju (SE) e Maceió (AL) (BRASI, 2003), ver Figura 1.

Figura 1 - Regiões fisiográficas da bacia do rio São Francisco



Fonte: BRASIL, 2003

A bacia tem uma área de drenagem que corresponde a 636.920 km² que equivale 7,5% do território nacional abrangendo os estados de Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Sergipe, Alagoas e Goiás e o Distrito Federal, sendo que 86% da bacia esta inserida nos dois primeiros estados, 16 % em Pernambuco, Alagoas e Sergipe e apenas 1% em Goiás e Distrito Federal. Em adição, mais da metade da bacia, ou seja, cerca de 56% esta situada no chamado “polígono da seca”(PLANVASF, 2000)

São marcantes os contrastes acentuados no que tange aos aspectos socioeconômicos abrangendo áreas de acentuada riqueza e alta densidade demográfica, como a parte alta da bacia onde se encontra a Região Metropolitana de Belo Horizonte, no estado de Minas Gerais. E áreas de pobreza crítica e população dispersa como as áreas que integram o polígono da seca nos estados da Bahia, Pernambuco, Alagoas e Sergipe (IBGE, 2009).

3.1.1 Pedologia

O solo entre o Alto e Submédio São Francisco é predominantemente dos tipos latossolos e podzólicos, mas também há os tipos cambissolos, areias quartzosas e litossolos. No Baixo São Francisco são identificadas duas regiões distintas de pedologia na direção leste-oeste, a saber: a primeira, se estende a jusante do município de Propriá até a foz do rio São Francisco e pode ser caracterizada por uma variedade maior de tipos de solo, no entanto, a abrangência é pequena. Dentre os solos que se destacam na área estão às areias Quartzosas marinhas, Quartzosas marinhas, solo indiscriminados de Mangue, Podzólicos, Podzol, Latossolos, Solos Aluviais e Gleis Pouco Úmidos (BRASIL, 2004; CUNHA et al.; 2008).

3.1.2 Cobertura Vegetal

A mata Atlântica é encontrada no Alto São Francisco, no entanto, 96% já foram desmatadas. Também nessa região a Caatinga é de predominância arborea e apresenta estrato de 6 a 8 m de altura. A floresta estacionária decidual é encontrada no Médio São Francisco a qual é caracterizada pela estacionaridade foliar dos elementos arbóreos dominantes (BRASIL, 2002).

No Baixo São Francisco a cobertura natural cobre uma extensa área de Caatinga do tipo xerófito. Na região, há duas variações fisionômicas desse tipo de vegetação: a Caatinga arborea densa, a qual se caracteriza estruturalmente por estrato arboreo denso com espécies que variam de oito a dez metros de altura, estrato formado por arbustos espinhosos e perenes e também por estrato herbáceo estacional. A segunda variação fisionômica, a Caatinga arborea

aberta, tem uma cobertura lenhosa de estrutura aberta e porte baixo deixando amostra o estrato campestre. Próximo aos litorais de Alagoas e Sergipe ocorre dois tipos de ambientes: a restinga e os mangues. No Médio São Francisco e Alto São Francisco também são encontrada a caatinga, no entanto, grande parte da caatinga na segunda região já foi desmatada

3.2 – Métodos

3.2.1 Análise de Componentes Principais

A Análise de Componentes Principais foi aplicada com o objetivo de regionalizar precipitação e vazão na bacia hidrográfica do São Francisco de acordo com os fatores atmosféricos, antrópicos e fisiográficos e assim, averiguar quais fatores são de maior importância para variação da precipitação e vazão na bacia.

Para obtenção dos Componentes Principais (CP) suponha que se tem p variáveis aleatórias que serão representadas por $X_1, X_2, X_3, \dots, X_p$ e o interesse é a redução dos dados de modo que resulte em um número menor de variáveis que explique a maior parte da variância no conjunto das variáveis observadas. A matriz de correlação ou de covariância (S) de tamanho N é obtida por (KUMAR e DAFFY, 2009):

$$S = C \cdot C^T \quad (1)$$

onde $C = (X - \mu)$, X corresponde a série temporal e μ é o valor médio de X , T indica transposta de C . Se matriz S for simétrica e real, assim ela poderá ser decomposta como:

$$S = E\Lambda E^T \quad (2)$$

onde as colunas da matriz diagonal (E) são autovetores ortonormal e a diagonal da matriz Λ autovalores de S . O componente principal é obtido dos autovetores por:

$$A = EX \quad (3)$$

Os pesos dos fatores foram calculados de acordo com a equação abaixo.

$$\rho_{x_i A_i} = \frac{\lambda_j e_{ji}}{\sqrt{\sigma_{ii}} \sqrt{\lambda_j}} = \frac{e_{ji} \sqrt{\lambda_j}}{\sqrt{\sigma_{ii}}} \quad (4)$$

onde, σ_i é a i -ésima coluna de Λ na equação (2), e_j é a j -ésima coluna na matriz E .

Critérios da adequação da amostra foram testados pelo teste de esfericidade de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) e Bartlett.

O teste de KMO representa a razão da correlação a quadrado para a correlação parcial ao quadrado entre as variáveis. Essa estatística varia de 0 a 1, sendo que, zero indica que a soma de correlações parciais é grande com relação a soma das correlações apontando dispersão no padrão das correlações (nesse caso a análise dos fatores provavelmente não é indicada). Valor próximo de um indica que padrões de correlações são relativamente compactos, desse modo, a análise de fatores deveria dar preferência a valores distintos e confiáveis. Neste estudo o valor do teste de KMO foi de 0,975 que significa que a análise de fatores em componentes principais é apropriada para os dados. A extração dos componentes principais foi realizada utilizando a matriz de correlação e Análise de Componentes Principais. Os escores dos componentes principais foram selecionados por meio do método de Anderson-Rubi que assegura que os escores dos componentes principais não sejam correlacionados (FIELD, 2009).

3.2.2 Análises Espectral Singular

A finalidade da aplicação deste método foi de detectar tendências e modos oscilatórios dominantes nas séries de precipitação e vazão para compreender a variabilidade da precipitação e vazão ao longo da bacia do São Francisco. A técnica foi aplicada de acordo com a metodologia do algoritmo básico da Análise Espectral Singular (SSA) em Golyandina et al, 2001.

O algoritmo básico da SSA em Golyandina et al. (2001) é baseado em dois estágios, a saber: decomposição e reconstrução da série temporal. A decomposição ainda é dividida em duas etapas: encaixe e Decomposição do Valor Singular (DVS). Enquanto que o de reconstrução da série é subdividido pelos passos de agrupamento e da média diagonal. Todos eles serão descritos a seguir.

3.2.2 1 Estágio de decomposição

a) Primeira etapa: encaixe

Considere uma série temporal original unidimensional real e não nula $Y_t = Y_0, \dots, Y_{N-1}$ de tamanho N. Essa série temporal é transformada em séries multidimensionais

$X_i = \{X_1, \dots, X_K\}$ com vetores defasados $X_i = (Y_{i-1}, \dots, Y_{i+L-2})^T \in R^L$ no tempo de dimensão L .

onde: $K = N - L + 1$ representa o número de vetores defasados no tempo e L é denominado de comprimento da janela e, representa a quantidade de componentes em que a série original é decomposta. Esse parâmetro deve ser um valor inteiro entre $1 \leq L \leq N$.

O resultado desta etapa é a matriz trajetória da série Y_t formada pelos vetores defasados como colunas:

$$X = (x_{ij})_{i,j=1}^{L,K} = \begin{bmatrix} Y_0 & Y_1 & Y_2 & \dots & Y_{K-1} \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 & \dots & Y_K \\ Y_2 & Y_3 & Y_4 & \dots & Y_{K+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{L-1} & Y_L & Y_{L+1} & \dots & Y_{N-1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Portanto, a matriz trajetória tem elementos iguais na diagonal, isto é, $i + j$ é constante.

Neste estudo L foi obtido de acordo com Golyandina et al. (2001) e Hassini (2007) onde foi sugerido que a dimensão da série original deve ser dividida por dois e o resultado seja múltiplo de doze, no caso do interesse da pesquisa seja a sazonalidade da série também.

b) Segunda etapa: decomposição do valor singular

Nesta etapa, o objetivo foi decompor a matriz trajetória (X) em seus valores singulares. Considere a matriz de variância-covariância, $S = XX^T$ de dimensão $L \times L$, da qual são obtidos os autovalores de S , designados por $\lambda_1, \dots, \lambda_L$ os quais são dispostos em ordem decrescente de sua magnitude ($\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_L \geq 0$) e seus autovetores correspondentes, denotados por U_1, \dots, U_L .

Considerando ainda a transformação $V_i = \frac{X^T U_i}{\sqrt{\lambda_i}}$, onde $i = 1, \dots, d$, onde d corresponde a quantidade de autovalores da matriz S diferentes de zero. Então, o resultado da decomposição em valores singulares da matriz X é escrito matematicamente como:

$$X = X_1 + \dots + X_d = \sum_{i=1}^d X_i \quad (6)$$

onde $X_i = \sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T$; o conjunto ou tripla $(\sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T)$ é comumente nomeado de autotriple da matriz trajetória X , sendo que i é o i -ésimo autotriples, sendo $1 < i < L$ (MYUNG, 2009); $\sqrt{\lambda_i}$

é denominado de valores singulares ou espectro de X ; U_i e V_i são os vetores singulares da matriz trajetória ou ainda vetores singulares esquerdos e direitos, respectivamente, da matriz X .

Segundo Esquivel (2012) outras nomenclaturas para os vetores U_i e V_i aparecem na literatura da SSA, tais como para U_i autovetor principal e fator de função ortogonal empírico. E V_i como fator vetor e ainda de componente principal.

A decomposição das séries utilizadas neste estudo foi feita levando em consideração que, a mesma tenha uma periodicidade anual e, como sugerido por Golyandina et al. (2001), Hassini (2007) e Golyandina e Osipov (2007), o comprimento da série deve ser um número divisível por doze e próximo ou igual a metade do tamanho da série. E ainda, que o período deve ser um número inteiro de modo a assegurar a separabilidade entre os componentes.

3.2.2.2 Estágio de reconstrução

A finalidade deste estágio é decompor a matriz X_i em subgrupos de acordo com seus componentes semelhantes (tendência, periodicidade, etc) para depois a série temporal ser reconstruída.

a) Primeira etapa: agrupamento

A etapa do agrupamento particiona a matriz X_i da expressão (5) ou o conjunto de índice $\{1, \dots, d\}$ em m subconjuntos de $[I_1, \dots, I_m]$. Fazendo $I = [i_1, \dots, i_p]$, então a matriz resultante X_I correspondente ao grupo I e é definida como $X_I = X_{i_1} + \dots + X_{i_p}$.

Essas matrizes são calculadas para $I = I_1 + \dots + I_m$ e a expansão leva a decomposição:

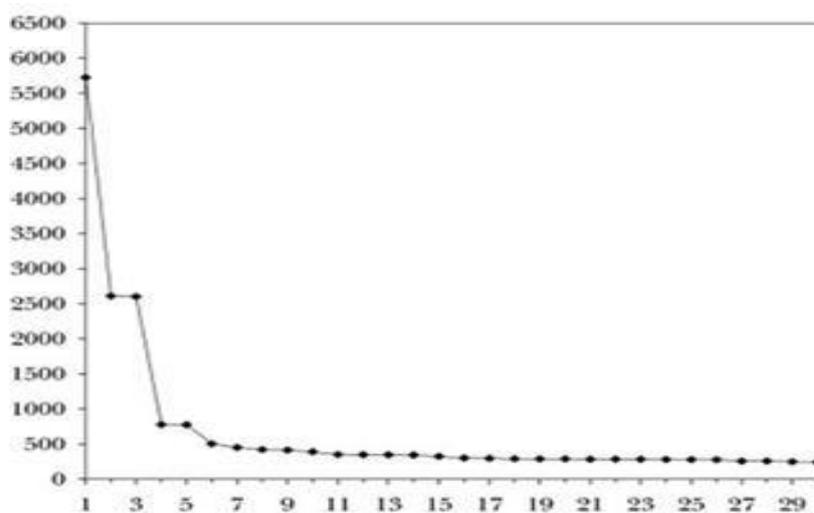
$$X = X_{I_1} + \dots + X_{I_m} \quad (7)$$

O procedimento de escolher os subconjuntos I_1, \dots, I_m é denominado de agrupamento de autotriples. A escolha dos autotriples utiliza o conceito de separabilidade (ESQUIVEL, 2012).

Os componentes de tendência e de periodicidade ou quase periódico no estágio de reconstrução do sinal foram selecionados de acordo com GOLYANDINA et al. (2001) e Hassini (2007). Segundo esses autores, um componente de tendência é identificado no espectro dos autovalores, como um autovalor isolado e de maior valor absoluto, neste caso,

corresponde à tendência geral da série. Enquanto que um componente periódico ou quase periódico é caracterizado por um par de autovalores de mesmo período e de valores singulares iguais ou próximos. Com o propósito de exemplificação a Figura 2 indica que os autovalores um, seis e sete estão relacionados ao componente de tendência e os pares 2-3, 4-5 e 8-9 estão associados aos componentes oscilatórios e os demais são considerados como ruídos.

Figura 2 – Espectro dos trinta primeiros autovalores da estação fluviométrica de Acorizal do rio Cuiabá



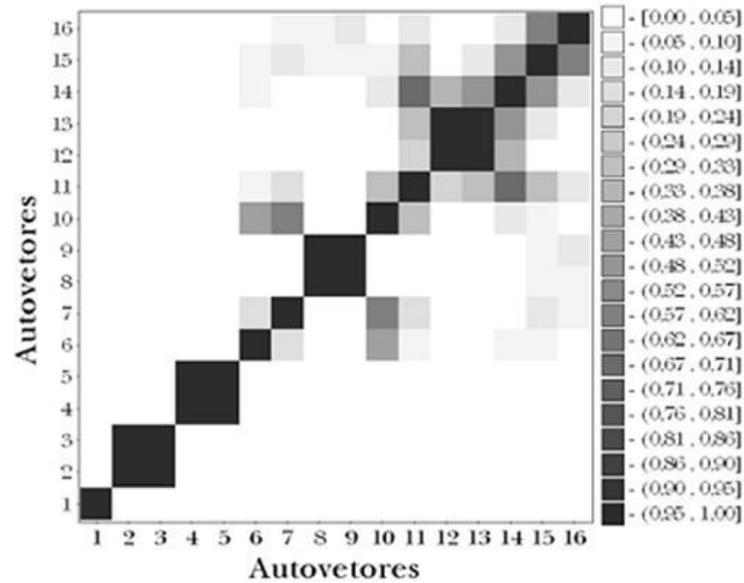
Fonte: Destro *et al.* 2012

Uma condição necessária para que duas séries (sinal e ruído) sejam separáveis é a existência da correlação ponderada nula (ou próxima de zero) dos componentes reconstituídos. A correlação entre os componentes resultantes da DVS pode ser analisada por meio da matriz w-correlação que indica os valores absolutos das correlações, ver Figura 3.

b) Segunda Etapa: média diagonal

Nesta última etapa do algoritmo básico da SSA, cada matriz resultante da decomposição e que foram agrupadas é transformada em uma nova série de tamanho N.

Figure 3– Matriz de correlação entre os componentes resultantes na etapa da DVS



Fonte: Destro *et al.* 2012

Seja Y uma matriz $L \times K$ com elementos y_{ij} , onde $1 \leq i \leq L$ e $1 \leq j \leq K$. Definindo que $L^* = \min(L, K)$, $K^* = \max(L, K)$ e $N = L + K - 1$. Considerando ainda, que $y_{ij}^* = y_{ij}$ se $L < K$ e $y_{ij}^* = y_{ji}$ se for diferente.

Desse modo a transformação da matriz Y em séries g_0, \dots, g_{N-1} é realizada pela seguinte fórmula:

$$g_k = \begin{cases} \frac{1}{k+1} \sum_{m=1}^{k+1} y_{m,k-m+2}^* & \text{para } 0 \leq k < L^* - 1 \\ \frac{1}{L} \sum_{m=1}^{L^*} y_{m,k-m+2}^* & \text{para } L^* - 1 \leq k < K^* - 1 \\ \frac{1}{N-K} \sum_{m=k-K^*+2}^{N-K^*+1} y_{m,k-m+2}^* & \text{para } K^* \leq k < N \end{cases} \quad (8)$$

A matriz Y é a matriz trajetória de algumas séries (h_0, \dots, h_{N-1}) , então $g_i = h_i$

para todo i , se \mathbf{Y} for uma matriz Hankel. A diagonalização aplicada a matriz resultante X_{I_k} produz a série $\tilde{F}^{(k)} = \tilde{F}_0^{(k)}, \dots, \tilde{F}_{N-1}^{(k)}$ e por conseguinte, a série inicial Y_0, \dots, Y_{N-1} é decomposta em uma soma de m série como:

$$Y_n = \sum_{k=1}^m \tilde{Y}_n^{(k)} \quad (9)$$

3.2.3 Teste de Mann-Kendall

O teste sequencial de Mann-Kandell foi utilizado a fim de averiguar se as tendências positivas e negativas detectadas por meio da técnica SSA são significativas ou não. A metodologia aqui utilizada foi de acordo a de Back (2001). O teste consiste na soma de t_n do número de termos m_i de uma série temporal X_i de comprimento N ($1 \leq i \leq N$) cujos termos anteriores ($j < i$) são inferiores aos mesmos ($X_j < X_i$). A estatística de hipótese é dada pela relação abaixo:

$$t_n = \sum_{i=1}^N m_i \quad (10)$$

Onde t_n é o somatório, m_i é o número de termos da série relativo ao valor X_i cujos termos antecessores ($j < i$) são inferiores ao mesmo ($X_j < X_i$).

No caso se séries longas, na ausência de tendência (hipótese nula, H_0), t_n apresentará uma distribuição normal com média zero e variância:

$$E(t_n) = \frac{N(N-1)}{4} \quad (11)$$

$$Var(t_n) = \frac{N(N-1)(2n+5)}{72} \quad (12)$$

A significância estatística de t_n para a hipótese nula, usando um teste bilateral, pode ser rejeitada para grandes valores da estatística $u(t)$:

$$u(t) = \frac{(t_n - E(t_n))}{\sqrt{var(t_n)}} \quad (13)$$

O valor da probabilidade é calculado por meio de uma tabela da normal reduzida de modo que: $\alpha_1 = prob(|u| > |u(t)|)$. A hipótese nula é rejeitada a um nível de significância

α_0 , se $\alpha_1 > \alpha_0$ ou $\alpha_1 < \alpha_0$. A hipótese nula é rejeitada quando existe uma tendência significativa na série temporal. O sinal da estatística $u(t)$ indica se a tendência positiva ou negativa.

3.3 Dados

3.3.1 Precipitação pluviométrica

Inicialmente foram obtidos dados 736 postos pluviométricos, no site da Agência Nacional de Águas (ANA) ao longo da bacia, das quais 201 foram do Submédio, 334 do Médio, 140 do Alto e 61 estações do Baixo São Francisco. Ainda foram adquiridos dados junto a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e Secretaria de Estado de Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Alagoas (SEMARH/AL). Foram comparadas as estações da ANA com as da UFCG e SEMARH/AL. Raras foram às exceções em que as estações das demais instituições não constavam no conjunto dos dados da ANA.

Foram verificadas falhas nos dados de todas as estações. Em muitas havia períodos longos de falhas, em outras o período de dados era curto. Após a verificação das falhas das estações, e verificado se a estação que seria usada para preenchimento estaria próxima da estação a ser preenchida, foi escolhido o período da análise de que foi de 1975 a 2010, assim garantiram-se pelo menos trinta e cinco anos de dados.

O número de estações pluviométricas foi reduzido a quarenta e cinco no Alto, quarenta e uma no Médio, treze no Submédio e duas no Baixo São Francisco, ou seja, para a análise da variabilidade hidroclimática na bacia foram usadas 101 estações pluviométricas. As regiões fisiográficas do Submédio e Baixo São Francisco foram pobremente representadas porque havia muitas falhas e/ou poucas estações com dados no período de estudo. Kumar e Duffy (2010) utilizaram doze estações para a bacia do rio Colorado cuja área é 637000 Km².

3.3.2 Vazão

Os dados das estações fluviométricas foram obtidos por meio do site da ANA, sendo que quatro foram do Submédio, trinta e uma do Médio, duas do Baixo e oito estações do Alto São Francisco, totalizando 45 estações. O mesmo procedimento de preenchimento de falhas aplicado aos dados de precipitação foi adotado para o preenchimento dados fluviométricos. Na ACP o período da análise é de trinta e cinco anos que compreende a implementação e

funcionamento das maiores barragens/reservatório ao longo da bacia. No caso da SSA o período foi aquele disponível no site da ANA.

3.4 Preenchimento de Falhas

Dentre diversos métodos de preenchimento de falhas na literatura (optou-se pelo método de regressão linear (BERTONI e TUCCI, 2007). Oliveira et al.(2010) compararam as seguintes metodologias para preenchimento de falhas nos dados de precipitação, na região central do estado de Goiás, regressão linear, ponderação regional, ponderação regional com base em regressões lineares e vetor regional. Destes, a regressão múltipla e regressão potencial múltipla foram as que apresentaram melhor desempenho no preenchimento das falhas.

3.4.1 Regressão Linear Múltipla

A regressão linear define um vasto conjunto de técnicas estatísticas usadas para modelar relações entre variáveis e predizer o valor de uma variável dependente (ou resposta) a partir de um conjunto de variáveis independentes ou preditoras. A relação entre duas ou mais variáveis pode ser de dependências funcional, ou seja, a magnitude da variável dependente é em função da(s) variável(is) independente(s) assim, a variável dependente implica geralmente uma relação de causa e efeito (MOROCO, 2007).

O modelo de regressão linear multivariado é apresentado da seguinte forma $Y_j = \beta_0 + \beta_1 x_{1j} + \beta_2 x_{2j} + \dots + \beta_p x_{pj} + \varepsilon_j$, onde Y_j é o valor observado para a variável dependente Y, no j-ésimo nível da variável X, β_0 é a ordenada da origem, isto é, valor de Y_j quando $x_{ij} = 0$, β_i uma medida da influência de X_i em Y por unidade de variação de X_i ; ε_j é o erro do modelo ou resíduos e reflete os erros de medição e a variação natural de Y. Nos modelos de regressão univariado (modelo com uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes) é considerado que apenas Y é afetado pelo erro de medição enquanto as variáveis X são medidas sem erro ou quando muito esse erro é desprezível em face da amplitude de variação de X (MOROCO, 2007) e $j = 1, 2, \dots, n$. O modelo de regressão univariado exige que os erros sejam aleatórios, independentes e com distribuição normal de média zero e variância constante $[N(0, \sigma)]$.

Primeiramente foram verificadas as falhas para a estação ou estações de cada município. No caso de município que havia mais de uma estação, as mesmas foram comparadas para averiguação de falhas no mesmo período. Houve casos em que uma estação foi suficiente para preencher as falhas da outra. Também existiram casos em que mais de uma estação, do mesmo município, foram usadas no preenchimento de outra estação de um determinado município. Mais também houve casos, em que estação de município vizinho foi utilizada no preenchimento de falhas de uma determinada estação, de um determinado município, porém, dando preferência para estação de mesma latitude. No caso da vazão foi levado em consideração também o mesmo regime hidrológico dos postos fluviométricos.

Inicialmente trabalhou-se com uma amostragem de 200 casos no preenchimento das falhas. No entanto, devido às muitas falhas apresentadas nas séries pluviométricas, que em muitos casos, as duas estações continham falhas no mesmo período, as amostras variaram, mas nunca foram inferiores a 30 casos como recomendado (FIELD, 2009; HAIR, 2005 e WILKS, 2006).

Depois de selecionado o período comum entre as estações o método de regressão linear múltipla foi efetuado. Os seguintes procedimentos na hora de rodar o modelo de regressão linear foram adotados. Primeiro, no caso que havia mais de uma estação para preenchimento de uma estação, isto é, quando havia mais de um previsor para o modelo, o método de entrada dos previsores foi primeiramente averiguar qual estação tinha maior coeficiente de correlação, e então, a estação foi selecionada para o preenchimento. Segundo, nos casos em que mais de uma estação foi utilizada para preenchimento das falhas, o método para frente (forward) foi selecionado como sugerido por Field (2009). Na maioria das vezes o coeficiente de correlação da estação previsora foi superior a 0,7 como sugeridos por outros autores (Oliveira et al.,2010).

3.5 Consistência dos dados de precipitação

A homogeneidade das séries temporais foi verificada por meio do Método Dupla Massa o qual é muito utilizado na análise de consistência de dados de séries temporais (PINHEIRO, SOUZA e MENEZES, 2005; BURIOL et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2010). A metodologia pode ser encontrada em Berttoni e Tucci (2007). Esse método tem como principal finalidade identificar se ocorreram mudanças no comportamento da variável ao longo do tempo ou no local de observação. Essa metodologia consiste no princípio que uma

quantidade acumulada plotada contra outra quantidade acumulada, durante o mesmo período, resulta em uma reta, sempre que as quantidades forem proporcionais.

Para a confecção gráfica devem-se selecionar os postos de uma região, acumular valores mensais, anuais ou a escala temporal que se deseja acumular para cada posto. No eixo das ordenadas deve-se plotar os valores correspondentes ao posto a ser consistido e nas abscissas os valores correspondentes a um ou mais postos confiáveis, adotado como base de comparação.

Portanto, para confecção da mesma, primeiro foi calculada a média anual do grupo das estações que serviram de referência e posteriormente o acúmulo. Da mesma forma, foi realizado para a estação a consistir. Isso foi feito respeitando período em comum entre as estações que são umas dos preceitos do método e também a mesma sub-bacia.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

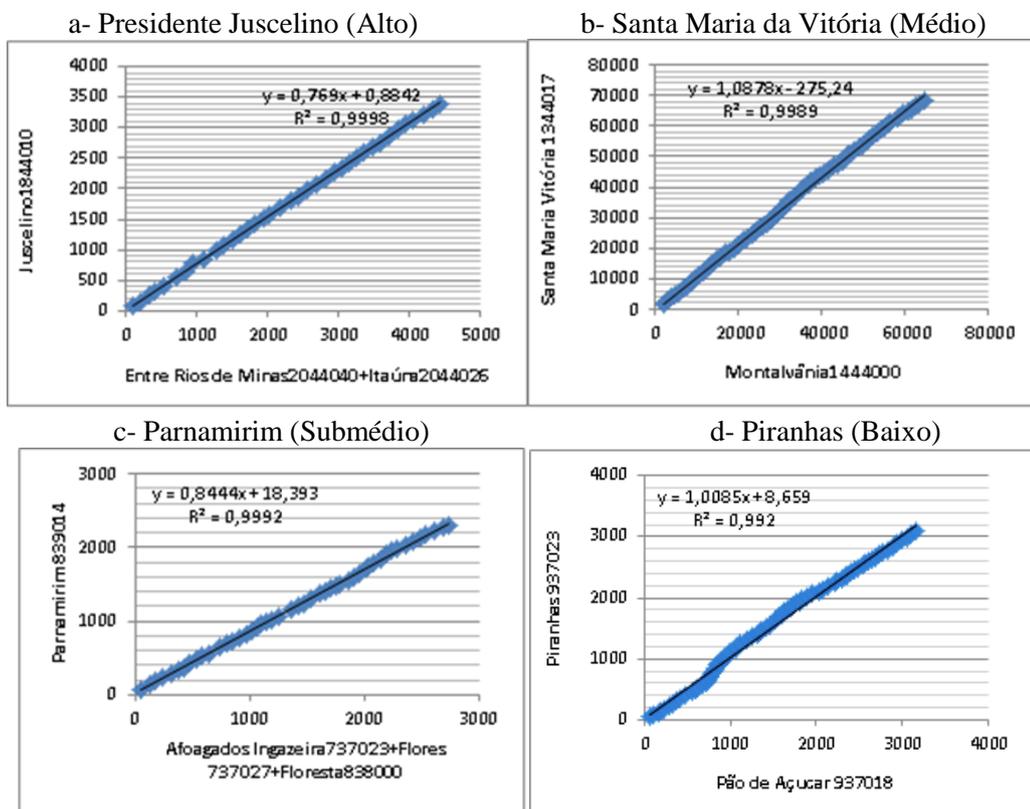
4.1. Consistência dos dados

4.1.1 Precipitação

A Figura 4 mostra um dos resultados da aplicação do método de dupla massa para cada uma das sub-regiões da bacia do São Francisco. As observações entre as estações são proporcionais, isto é, não foi observada nenhuma alteração na reta que pudesse ser atribuída a qualquer mudança da variável ao longo do tempo, nem no local de observação ou até mesmo, no preenchimento de falhas das estações. Os resultados das demais estações podem ser consultados no apêndice.

Portanto a qualidade dos dados, e em especial, a do preenchimento de falhas foram considerados aceitáveis uma vez que as pequenas mudanças na declividade da reta foram devidas a própria variabilidade randômica existente. De acordo com Chow (1964 apud GUANDIQUE, 2008) “uma variação na inclinação só pode ser considerada como importante se persistir no mínimo por cinco anos, além da necessidade da existência de alguma evidência de anormalidade da estação”.

Figura 4 - consistência dos dados de precipitação (mm) de alguns postos na bacia do rio São Francisco.



4.1.2 Vazão

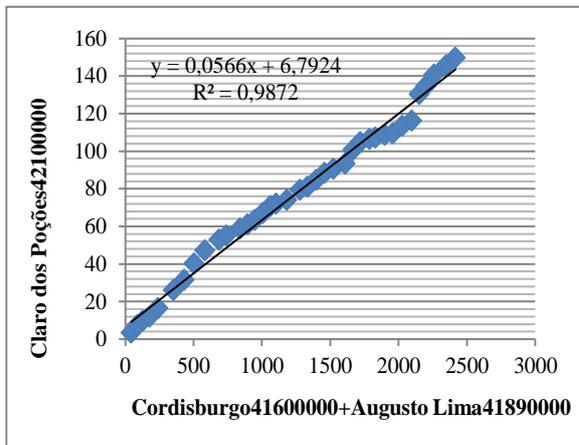
A consistência dos dados de vazão por meio do método de dupla massa foi feita entre as estações de uma mesma bacia hidrográfica, exceção foi feita para a estação de Claro dos Poções que pertence à bacia Paracatú e foi consistida com as estações da bacia do rio Das Velhas. Isso pode explicar os desvios em torno da reta, Figura 5.

No Médio São Francisco não se observou mudança na declividade da reta. Algumas estações revelaram excelente homogeneidade entre elas, como Carinhanha 45298000, Montalvânia 45131000, Formosa do rio Preto 46790000, dentre outras. Isso tudo corrobora que o preenchimento de falhas nessas estações correspondeu à variabilidade da vazão observada, ou ainda, que não houve nenhuma alteração nos dados de vazão nessas estações.

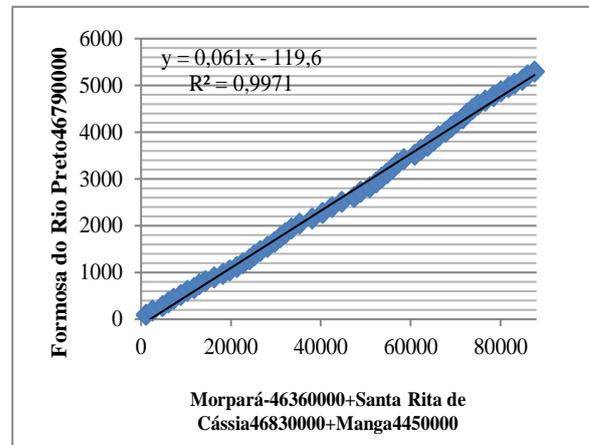
As estações de Juazeiro e Serra Talhada, a pesar de situada na mesma região fisiográfica e pertencerem à mesma sub-bacia, revelaram que não há uma boa proporcionalidade dos dados entre elas visto que a declividade da reta não foi constante como observado na Figura 5c.

Figura 5 – consistência dos dados de vazão (m^3/s) de alguns postos na bacia do rio São Francisco.

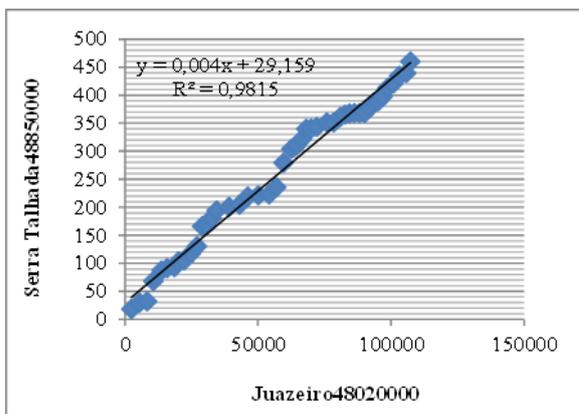
a- Claro dos Porções (Alto)



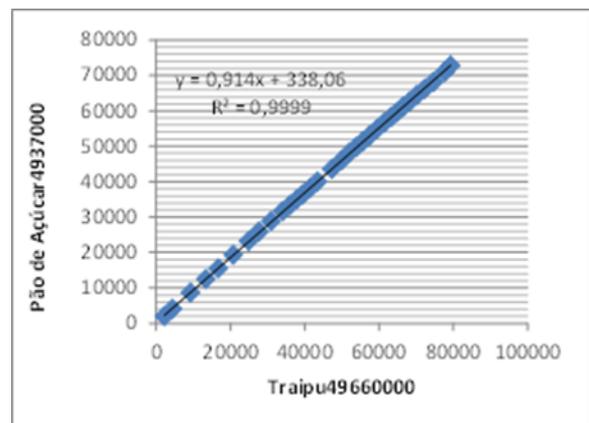
b- Formosa do Rio Preto (Médio)



c- Serra Talhada (Submédio)



d- Pão de Açúcar (Baixo)



4.2 Precipitação anual e mensal média na bacia hidrográfica do rio São Francisco

A precipitação acumulada média de 1975 a 2010 é representada na Figura 6. Nota-se que “marcha” da precipitação na bacia do rio São Francisco foi de Oeste para Leste e de Sul para o Norte, sendo que os maiores índices de precipitação ocorreram no ASF e parte centro-sul do MSF. O BSF também recebeu um pouco mais precipitação do que a área compreendida entre o centro-norte do Médio e o Submédio São Francisco. Portanto, o Submédio e o centro-norte do MSF são as duas regiões onde ocorreram os menores índices pluviométricos, nesses trinta cinco anos de dados.

A distribuição média mensal da precipitação de 1975 a 2010, na bacia do São Francisco, pode ser observada na Figura 7. Como já observado na precipitação anual, o Alto e o centro-norte do Médio São Francisco têm comportamento pluviométrico também análogo mensalmente. Entre os meses de outubro a janeiro os maiores índices de precipitação foram registrados nessas duas áreas.

Figura 6 – Precipitação acumulada média de 1975 a 2010 na bacia do rio São Francisco.

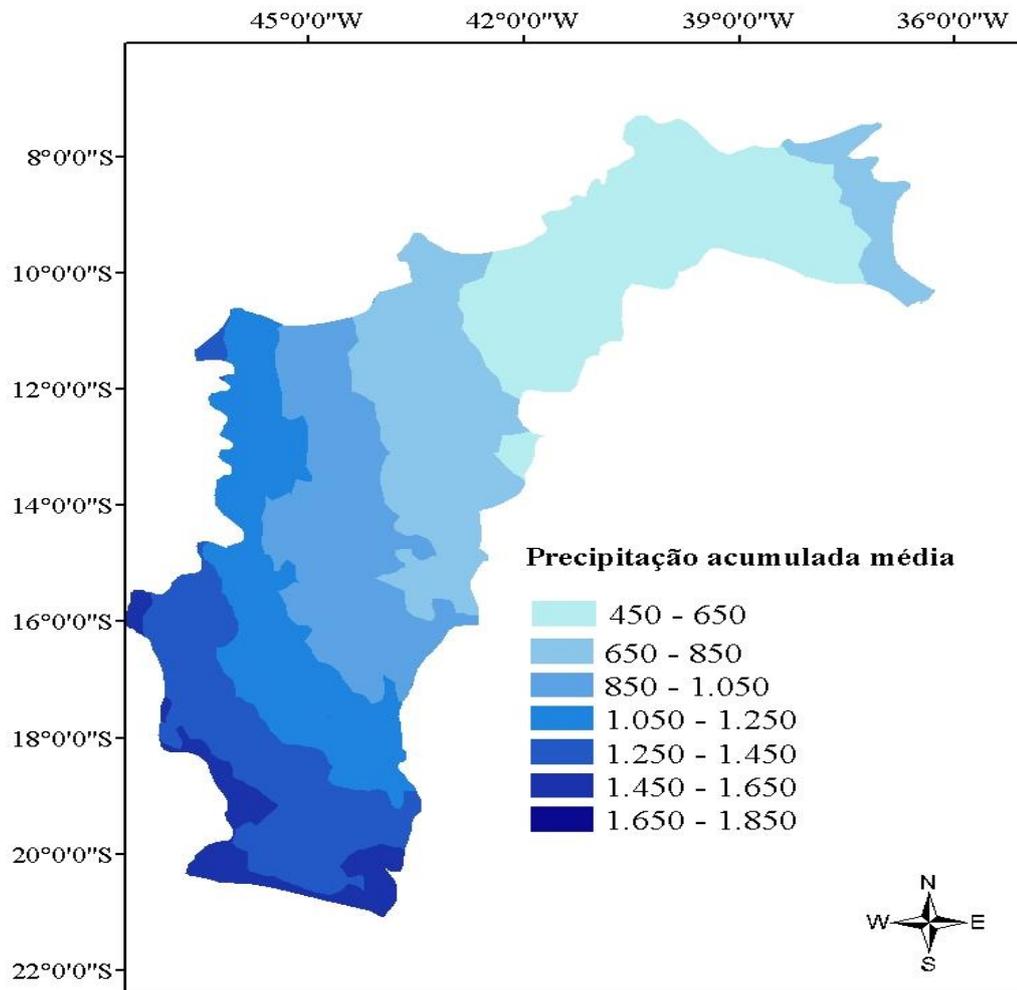
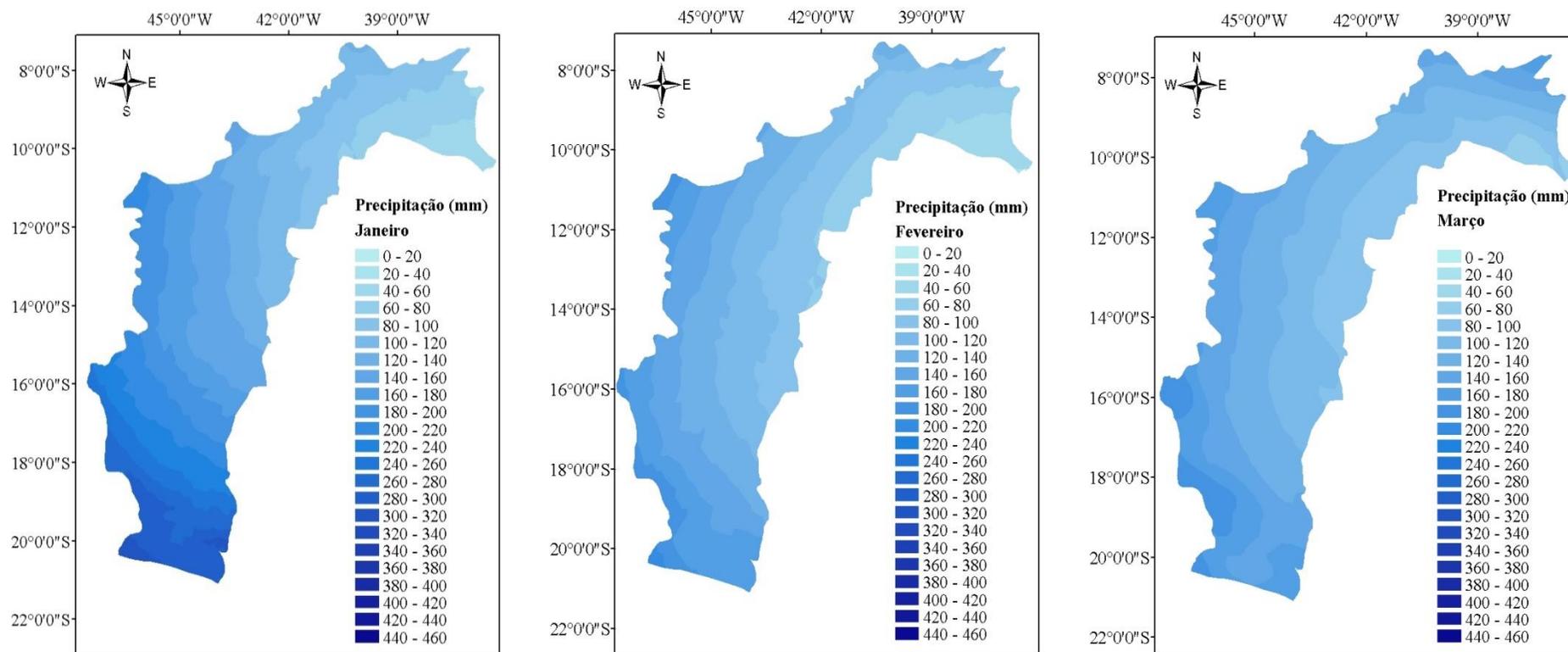


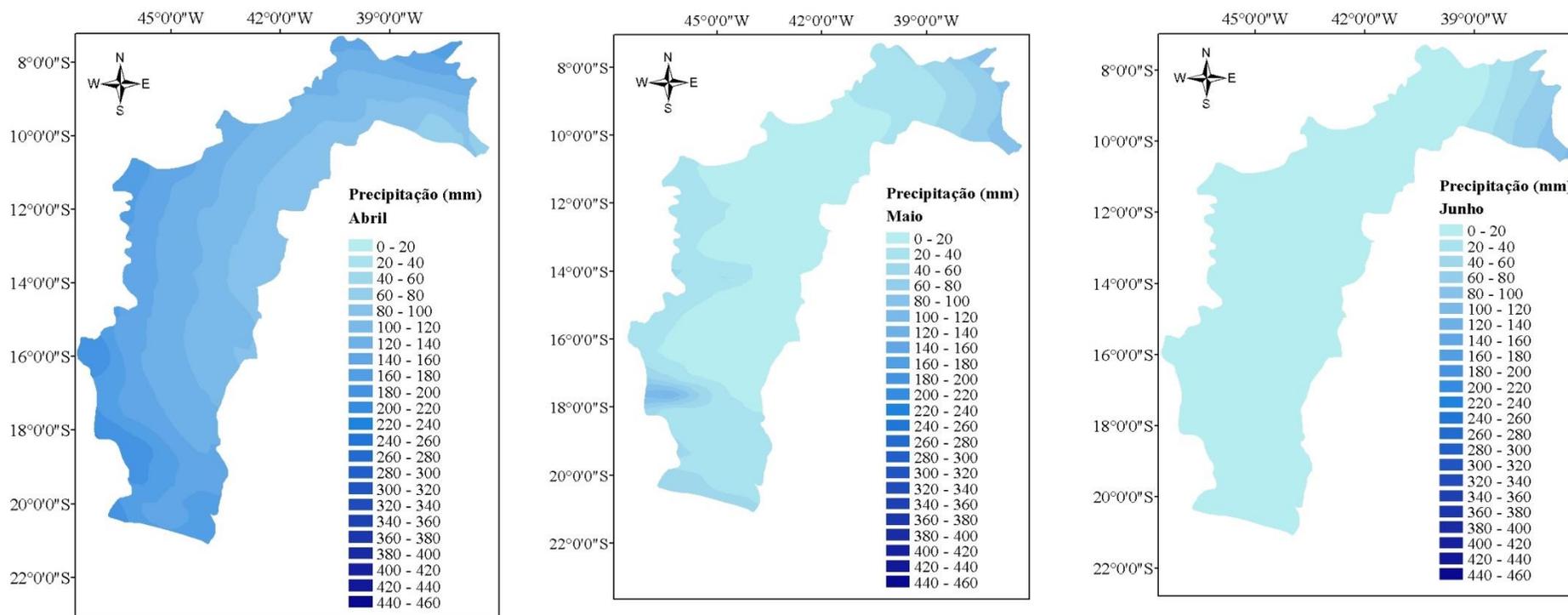
Figura 7 - Precipitação média mensal na bacia do rio São Francisco de 1975 a 2010



continua

Figura 7 - Precipitação média mensal na bacia do rio São Francisco de 1975 a 2010

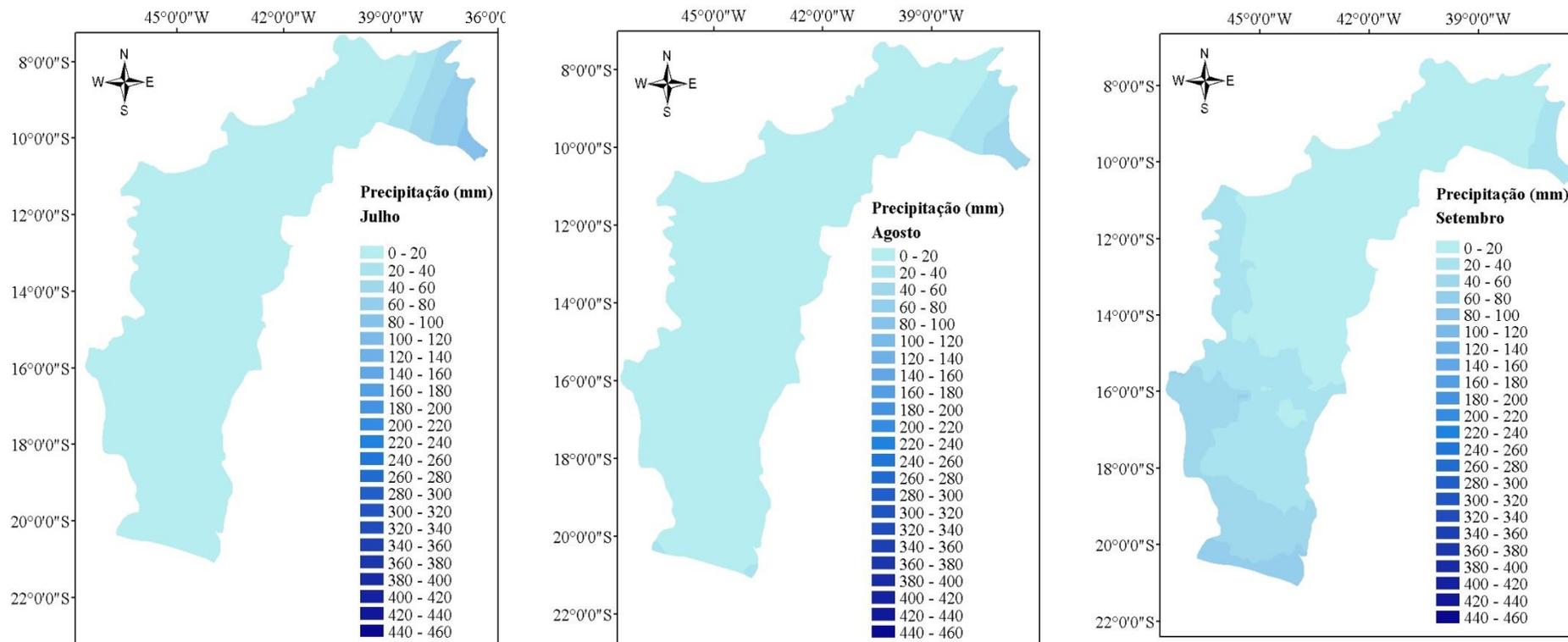
continuação



continua

Figura 7 - Precipitação média mensal na bacia do rio São Francisco de 1975 a 2010

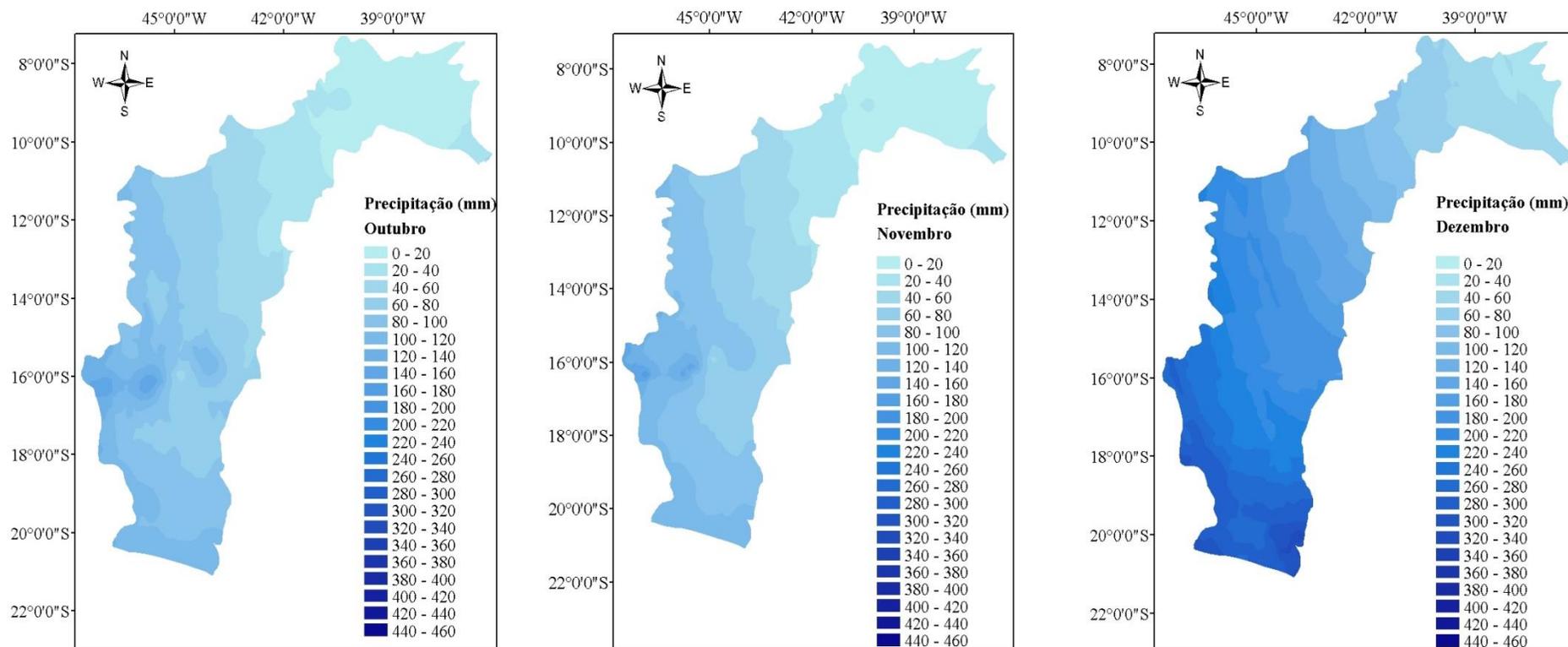
continuação



continua

Figura 7 - Precipitação média mensal na bacia do rio São Francisco de 1975 a 2010

continuação



De fevereiro a abril a precipitação ocorreu ao longo da bacia, sendo que, o mês de março a chuva foi mais homogênea. De maio a agosto a precipitação tem maiores valores no BSF. O ASF tem estações seca e chuvosa bem definida. A estação seca compreende os meses de maio, junho, julho e agosto e a chuvosa os meses de novembro a março. Já o MSFC é uma região de transição entre a área úmida e a semiárida da bacia. Na parte centro-sul a precipitação teve comportamento semelhante ao ASF e a centro-norte análogo ao SBMSF. A estação chuvosa do Submédio foi de janeiro a abril com maior precipitação em março e a estação seca compreende os meses de julho a setembro. O Baixo São Francisco tem seu período de maior ocorrência de precipitação de maio a agosto caracterizando a sua estação chuvosa e seu período seco de setembro a novembro. Observou-se que a “marcha” da precipitação na bacia do rio São Francisco foi de Oeste para Leste e de Sul para Norte.

4.3 Extração de tendência e modos oscilatórios na bacia do rio São Francisco

4.3.1 Precipitação pluviométrica

4.3.1.1 Alto São Francisco

A Figura 8 corresponde os componentes do sinal da série de precipitação em Várzea da Palma (código 1744009). No caso deste município, o comprimento da série foi de 840 meses ($N=840$) e o comprimento da janela foi escolhido igual a 420 meses ($L=420$) o que resultou em 421 vetores defasados ($K=421$).

Figura 8 - Características da série de precipitação do município de Várzea da Palma

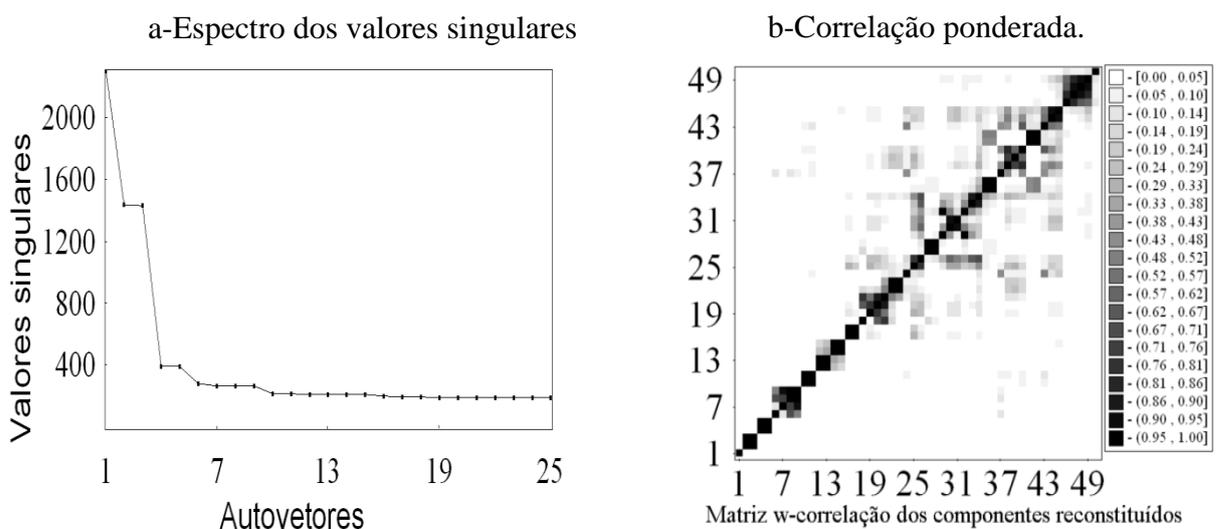
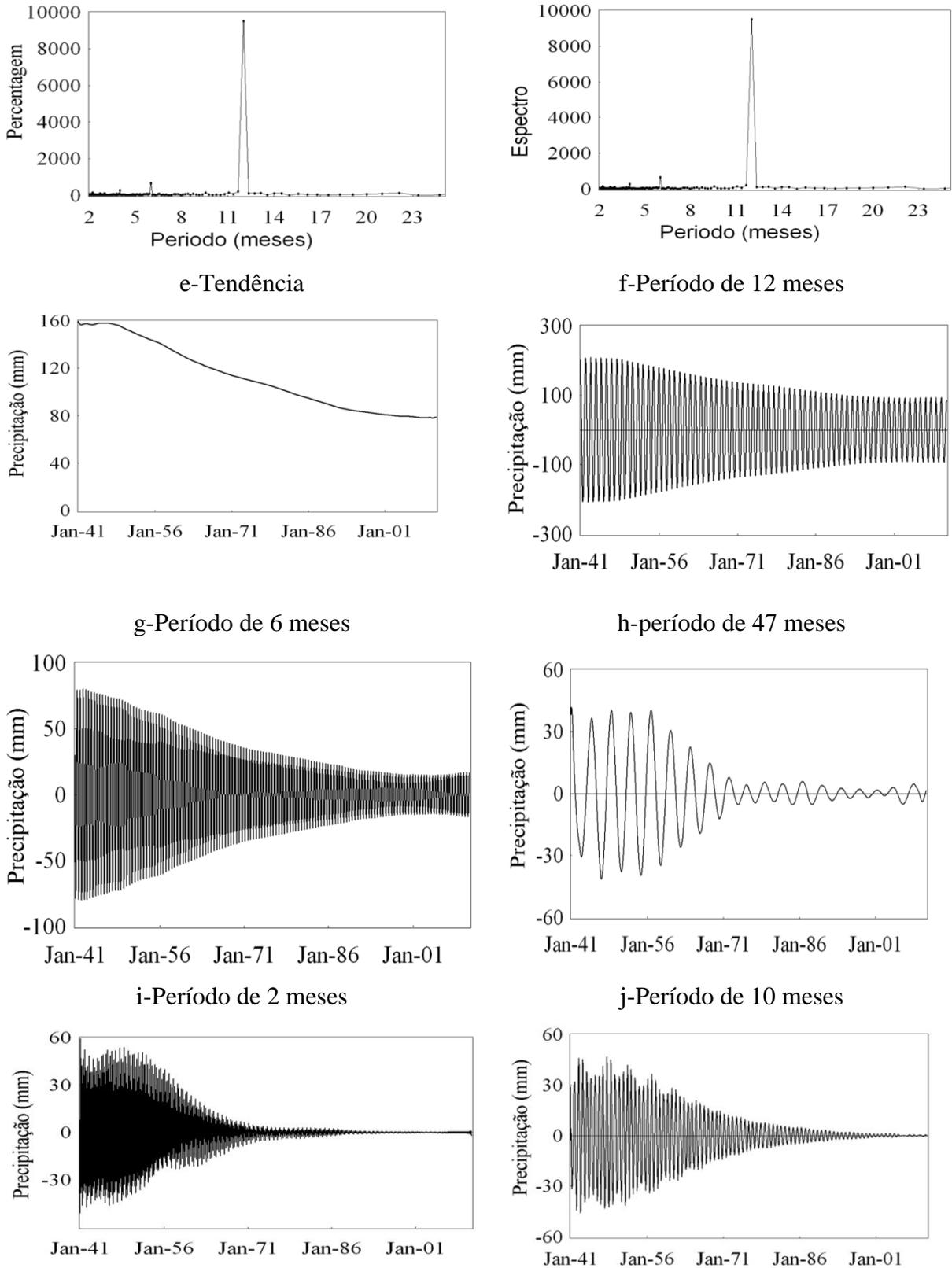


Figura 8— Características da série de precipitação do município de Várzea da Palma

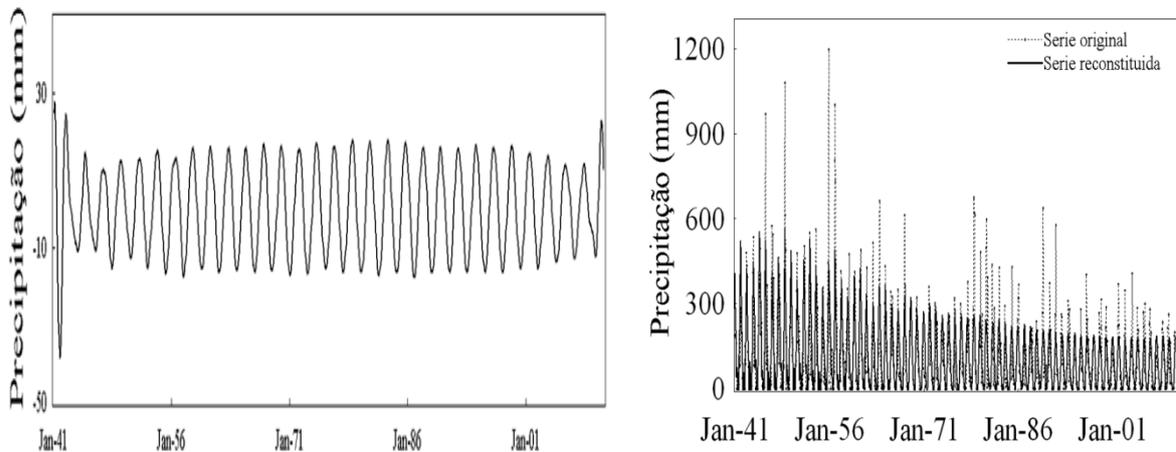


continua

Figura 8– Características da série de precipitação do município de Várzea da Palma

l-Período de 26 meses

m-Série original mais a reconstituída



Na Figura 8a que mostra o espectro dos autovetores, os componentes do sinal da série correspondem a um platô e, o ruído foi identificado como uma sequência de autovetores próximos e decrescentes. Pode-se verificar na Figura 8b que há dois blocos de componentes, o primeiro, compreende os componente de 1 ao 17 onde eles estão altamente correlacionados (tonalidade escura) e, corresponde ao sinal da série. E o segundo bloco, que exibe muitos componentes com correlações baixas (tonalidade mais para o cinza) que caracteriza o ruído da série.

Na Figura 8a que mostra o espectro dos autovetores, os componentes do sinal da série correspondem a um platô e, o ruído foi identificado como uma sequência de autovetores próximos e decrescentes. Pode-se verificar na Figura 8b que há dois blocos de componentes, o primeiro, compreende os componente de 1 ao 17 onde eles estão altamente correlacionados (tonalidade escura) e, corresponde ao sinal da série. E o segundo bloco, que exibe muitos componentes com correlações baixas (tonalidade mais para o cinza) que caracteriza o ruído da série.

A distinção entre os componentes de tendência e periódico ou quase periódico do ruído foi realizada por meio da matriz de correlação entre os autovetores na Figura 8b. Um autotriple foi caracterizado como componente de tendência se ele estiver fortemente correlacionado com ele mesmo e mantiver correlação zero ou próxima de zero com os demais da matriz. E dois autotriples são considerados da mesma componente periódica se forem fortemente correlacionados entre si e tiverem correlação zero ou próximo de zero com os demais autotriples dos outros componentes como sugerido por Hassini, 2007.

A Figura 8a mostra que autovetor um é consideravelmente maior do que os demais evidenciando que ele contém informação sobre a tendência. Na Figura 13b nota-se que ele tem forte correlação consigo mesmo e não está correlacionado com os demais autovetores da matriz. Observa-se também na Figura 8a, que os autovetores dois e três têm valores singulares próximos. E na Figura 8b esse par de autovetores está correlacionado entre si e não correlacionado com os demais autotriples. Portanto, os autovetores dois e três (2-3) formam um componente periódico da série.

Além do par 2-3 de autovetores observados no espectro dos valores singulares, outros são observados como os pares: 4-5, 8-9, 10-11, 12-13, 14-15 e 16-17. Esses pares reproduzem os principais modos oscilatórios que contribuíram para a variabilidade da precipitação no município de Várzea da Palma. Os pares 2-3 e 4-5 dão origem aos períodos de doze (Figura 8i) e seis meses (Figura 8j), respectivamente. Juntos eles explicaram 30,82% da variação total da precipitação, sendo que, o período de doze meses explicou 28,67% e de seis meses 2,15% (Figura 8c).

O par 10-11 corresponde a uma oscilação de 47 meses, ou seja, uma oscilação de três anos e nove meses (Figura 8h) que corresponde a escala do fenômeno El Niño (e explicou 0,649% da precipitação). O par 12-13 é um modo oscilatório de três meses (Figura 8i) e o par 14-15 período de dez meses (Figura 8j) e explicou 0,629% da variação total dos dados. O par 16-17 é um modo oscilatório de 26 meses (dois anos e dois meses) (Figura 8l) e explicou 0,544% da precipitação. A tendência da série foi reconstituída pelo autovetor um (Figura 8e) que aponta a tendência geral da série e explicou 36,97% da variabilidade da precipitação dos dados originais.

Por meio da Figura 8e, nota-se que a precipitação no município de Várzea da Palma apresentou tendência negativa e linear (tendência geral). Esse decréscimo pode ser atribuído ao modo oscilatório de 47 meses que mostrou decréscimo bem acentuado na sua amplitude após a década de 70. Como esse modo oscilatório corresponde a escala do fenômeno El Niño e o mesmo tende a aumentar os índices pluviométricos no Sudeste do Brasil, então com a sua não atuação após a década de 70 todos os demais modos oscilatórios com escala inferior a 47 meses apresentaram diminuição na sua amplitude. A série de precipitação reconstituída aponta que antes da década de 1960 o período foi mais úmido enquanto que após a década de 1970 o município ficou mais seco (Figura 8m).

Portanto o sinal da série de precipitação do município de Várzea da Palma foi reconstituído com 73,28% da variação total, Figura 8m. Dentre os fenômenos que correspondem ao sinal da série estão aqueles de escala sazonal e intersazonal e interanual na escala temporal do El Niño.

A análise espectral para o município de Onça de Pitangui (código 1944011) é apresentada na Figura 9. Esse município evidencia precipitação com tendência positiva. A série tem comprimento de 840 meses (70 anos) e o comprimento da janela foi escolhido com 420 meses ($L=420$), que resultaram em 421 autovetores defasados ($K=421$). O sinal da série foi reconstituído com os primeiros 20 autovetores dos 421. Dois autovetores são relacionados ao componente de tendência, os quais são: autovetor um que dá origem a tendência geral da série e autovetor dez que corresponde a uma tendência específica (Figura 9e e 9f).

O componente referente aos modos oscilatórios da série de precipitação de Onça de Pitangui foi formado por 14 autovetores, que formaram sete modos oscilatórios. As oscilações, de acordo com sua ordem de importância, têm períodos de 12 meses (par 2-3) (Figura 9h), seis meses (par 4-5) (Figura 9i), três meses (par 6-7) (Figura 9j), dois meses (par 8-9) (Figura 9l), cinco meses (par 11-12) (Figura 9m), três meses (par 13-14) (Figura 9n), 18 meses (par 15-18) (Figura 9o) e 12 meses (par 19-20) (Figura 9p). A variabilidade explicada

Figura 9 - Características da série de precipitação do município de Onça de Pitangui.

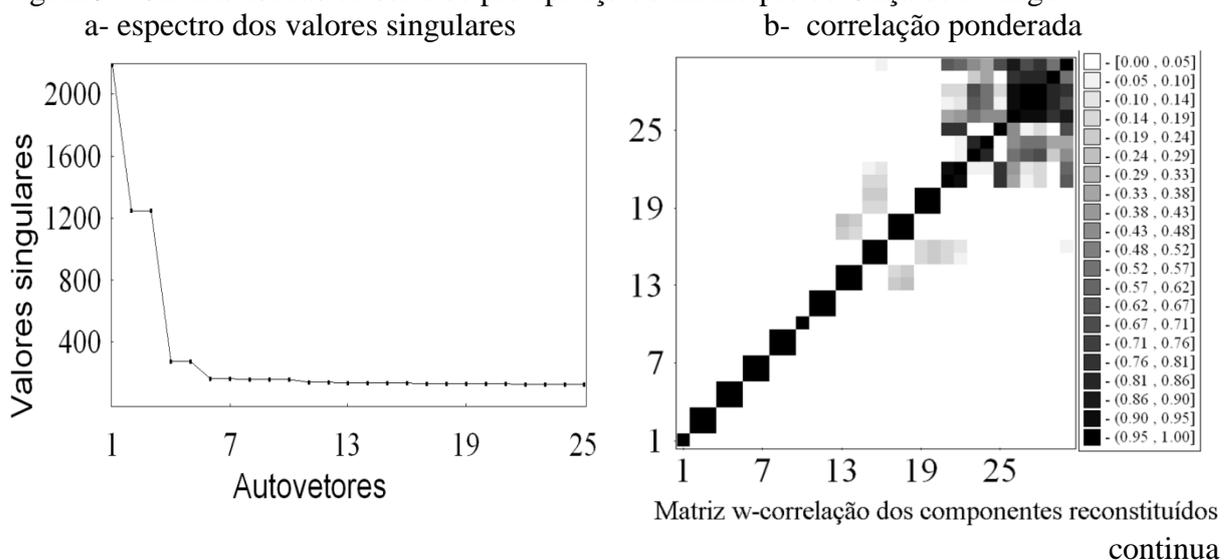


Figura 9 - Características da série de precipitação do município de Onça de Pitangui.

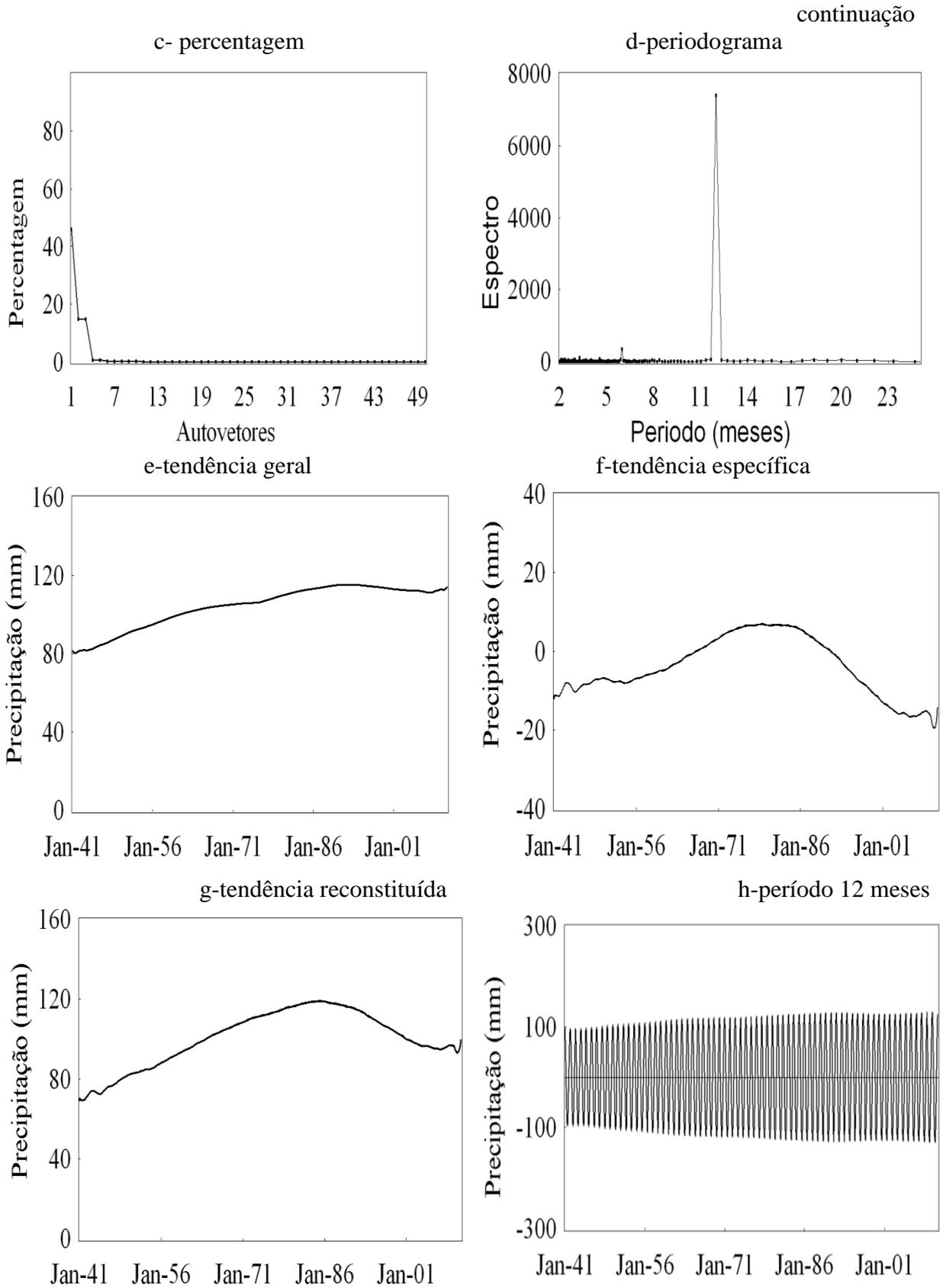


Figura 9 - Características da série de precipitação do município de Onça de Pitangui.

continuação

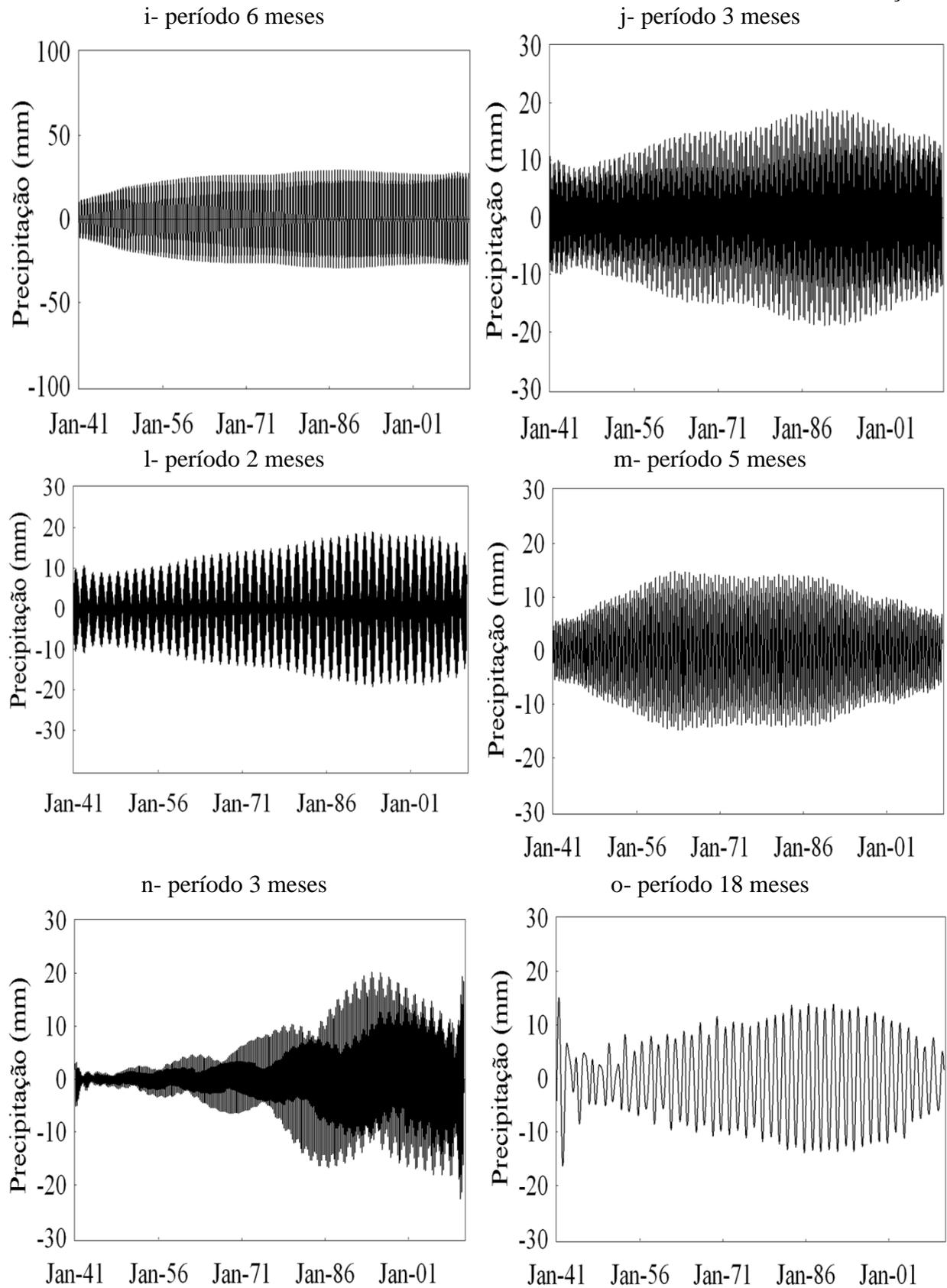
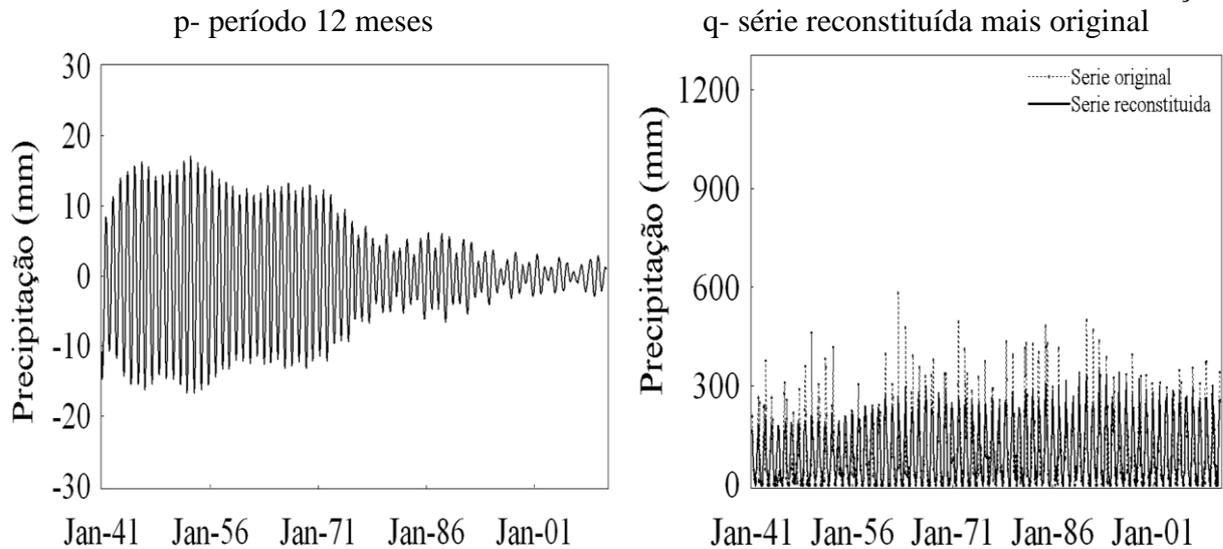


Figura 9 - Características da série de precipitação (mm) do município de Onça de Pitangui. continuação



por esses períodos foi de 34,17% da variação total da série original. O principal modo oscilatório que contribuiu para a variação da precipitação foi de 12 meses (Figura 9h) que contribuiu com 29,85 %. O segundo modo mais importante foi o de seis meses que tem contribuição de 1,46% (Figura 9i), aproximadamente.

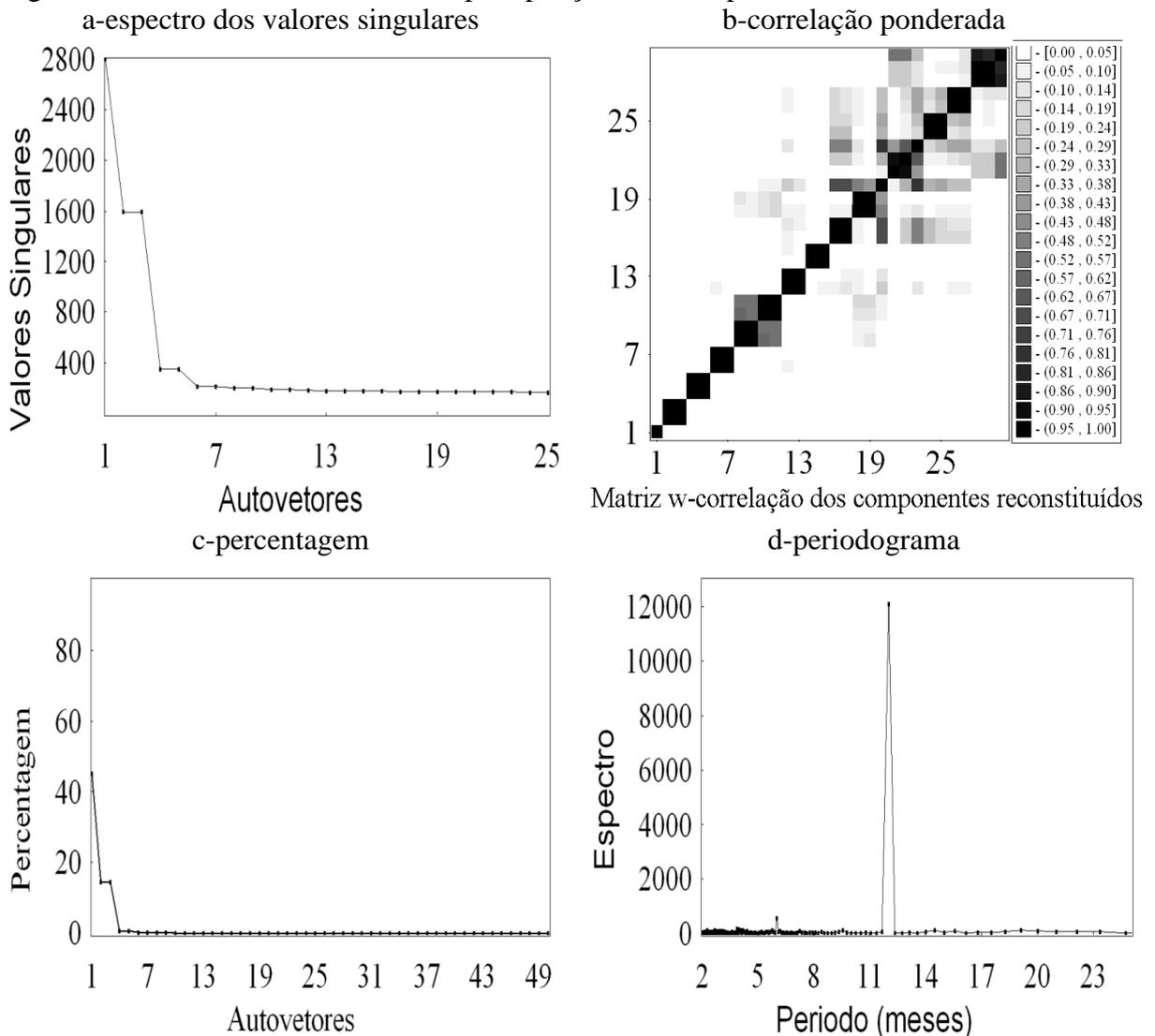
A tendência geral da série (Figura 9e) indicou aumento de precipitação de 1948 até 1997, com um pequeno decréscimo por volta de 1975. A partir de 1997, a tendência da precipitação foi negativa e voltou a ficar positiva após 2008. Nesses setenta anos de dados observa-se que houve um aumento mais acentuado da precipitação entre as décadas de sessenta e oitenta, salientado pela tendência, principalmente, entre as décadas de setenta e oitenta (Figura 9f). Esse aumento pode ser atribuído ao aumento de precipitação das oscilações com períodos de seis (Figura 9j), três (Figura 9l) e cinco meses (Figura 9p). A redução da precipitação a partir de 1997 foi atribuída aos modos oscilatórios de período de três (Figura 9j e 9n), cinco meses (Figura 9m), três meses (Figura 9n) e 18 meses (Figura 9o). Porém, a Figura (9p) revela que o município de Onça de Pitangui ficou mais úmido após a década de 1950.

Em termo de variabilidade explicada por cada componente, o de tendência geral da série explicou 45,96% e os oscilatórios 33,26%. A percentagem relativa foi assim distribuída: o modo oscilatório de 12 meses explicou 29,85%, de seis 1,47%, de cinco 0,851%, de doze meses, cujo par de autotriples é 19-20, explicou 0,346% e por fim, o de 18 meses 0,359%.

Assim, a série reconstituída apresenta 79,2% da variação total dos dados e os 20,78% foi considerados como variabilidade devido ao ruído da série.

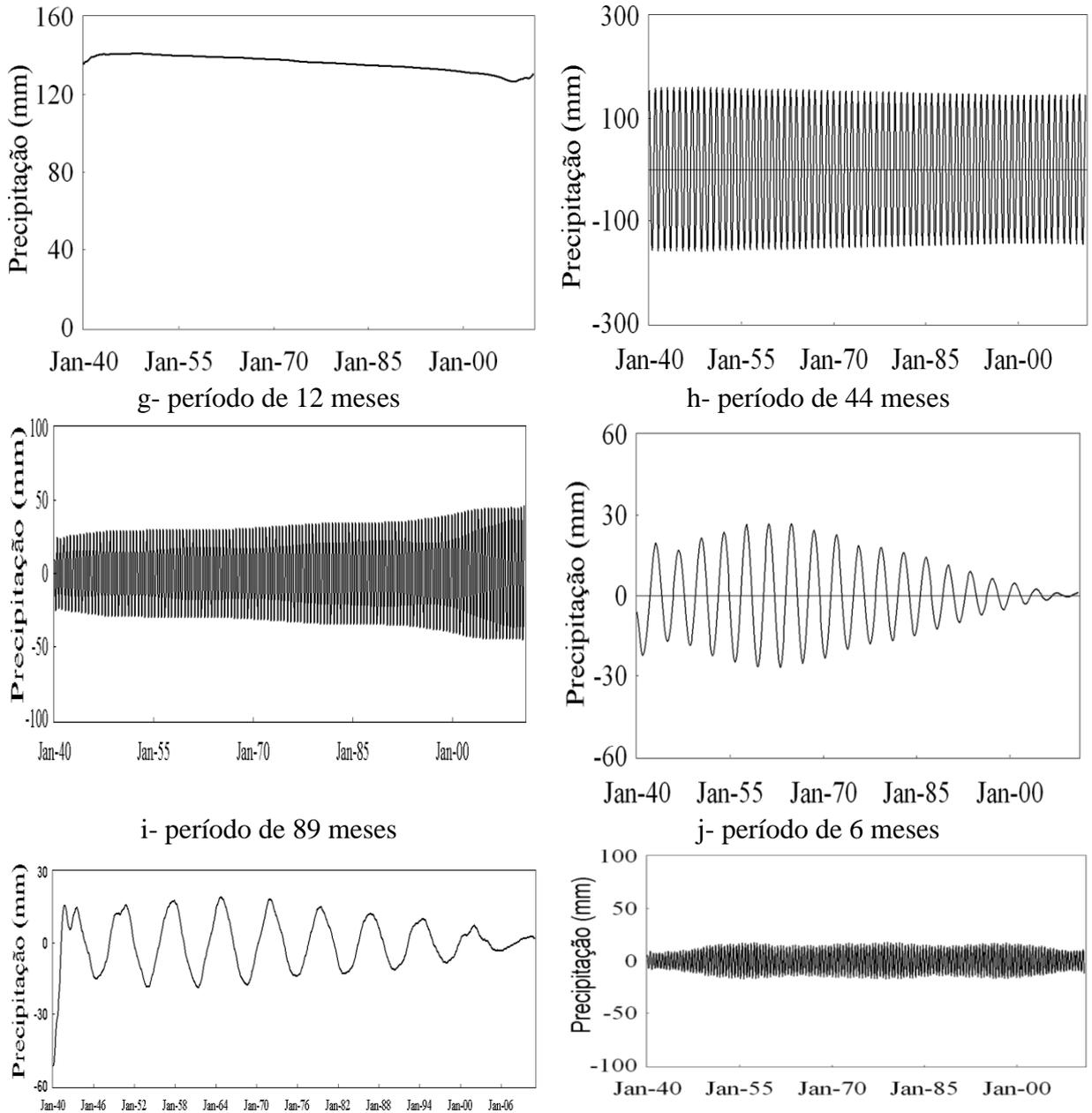
A Figura 10 corresponde à precipitação da estação do município de Nova Lima (2043004) e a Figura (10a) mostra os 30 primeiros autovetores dos 445 vetores defasados. A dimensão da série foi de 852 meses, isto é, 71 anos e o comprimento da janela compreendem 420 meses, que pode detectar modos oscilatórios de até 34 anos. Pode-se perceber que o primeiro autovetor tem maior valor absoluto dentre os 30 mostrados, indicando que ele é um componente de tendência.

Figura 10 - Características da série de precipitação do município de Nova Lima

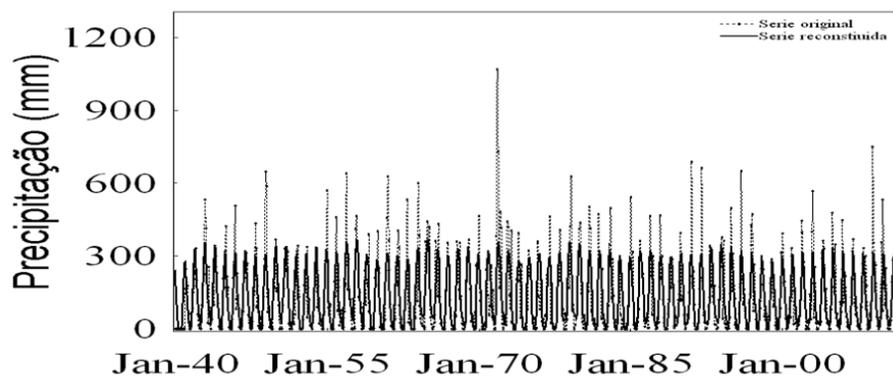


continua

Figura 10 - Características da série de precipitação do município de Nova Lima. continuação e-tendência



(l)



Na Figura (10a), observam-se também em destaque os pares de autovetores 2-3 com valores singulares de 1605,37 e 1601,02 e o par 4-5 com valores singulares de 351,87 e 351,09 que, correspondem aos modos oscilatórios de períodos de 12 e seis meses, respectivamente. Esses dois modos oscilatórios são os principais que influenciam a precipitação no município de Nova Lima. Juntos, são responsáveis por aproximadamente 30,6% da variação da precipitação dos dados originais, sendo que, 29,19% são atribuídos à periodicidade de 12 meses. A tendência por sua vez, explicou 45,17% (Figura 10c).

Outros modos oscilatórios foram também detectados. Como eles têm valores singulares bem menores que os dois acima, são difíceis de serem observados no espectro dos valores singulares. O par 6-7 dá origem a um componente com período de 44 meses (aproximadamente três anos e seis meses) (Figura 10h) e o par 12-13 corresponde uma oscilação de 89 meses (sete anos e quatro meses) (Figura 10i) e o par 14-15 oscilação de seis meses (Figura 10j) e mostrou um pequeno decréscimo nos dados de precipitação.

Logo, nesse município dois modos oscilatórios com período maior do que a escala sazonal fazem parte do sinal da série. Esses dois modos tem período compatível com os fenômenos El Niño/La Niña que tem amplitude maior entre outubro a julho do ano seguinte e, sua fase positiva nos anos de 1971 a 1974 podem ter contribuído com o pico de precipitação notado em 1971 nesse município. Percebe-se que a influência da oscilação de três anos vai diminuindo a partir de 1975 e na “era 2000” praticamente não houve a sua influência. O mesmo foi observado com a oscilação de sete anos. A série reconstituída explica cerca 77% da variação dos dados e precipitação desse município manteve-se praticamente igual ao longo desses 70 anos.

A Figura 11 expõe os componentes que reproduzem o sinal da dinâmica dos principais modos oscilatórios e a tendência da precipitação no município de Piumhi cujo código de identificação é 2045012. Foram dez pares de autovetores selecionados os quais são 2-3 (Figura 11f) que revela a principal periodicidade que colabora para precipitação nesse município.

Os pares 4-5 dá origem a oscilação de seis meses (Figura 11g), par 6-7 tem período de três meses (Figura 11h), par 8-9 representa uma oscilação de 20 meses (Figura 11i), par 14-15 corresponde a oscilação de quatro meses (Figura 11j), par 16-17 (Figura 11l) oscilação de dois meses, par 18-19 oscilação de dois meses (Figura 11m), par 28-29 (Figura 11n) modo

Figura 11 – Características da série de precipitação do município de Piumhi.

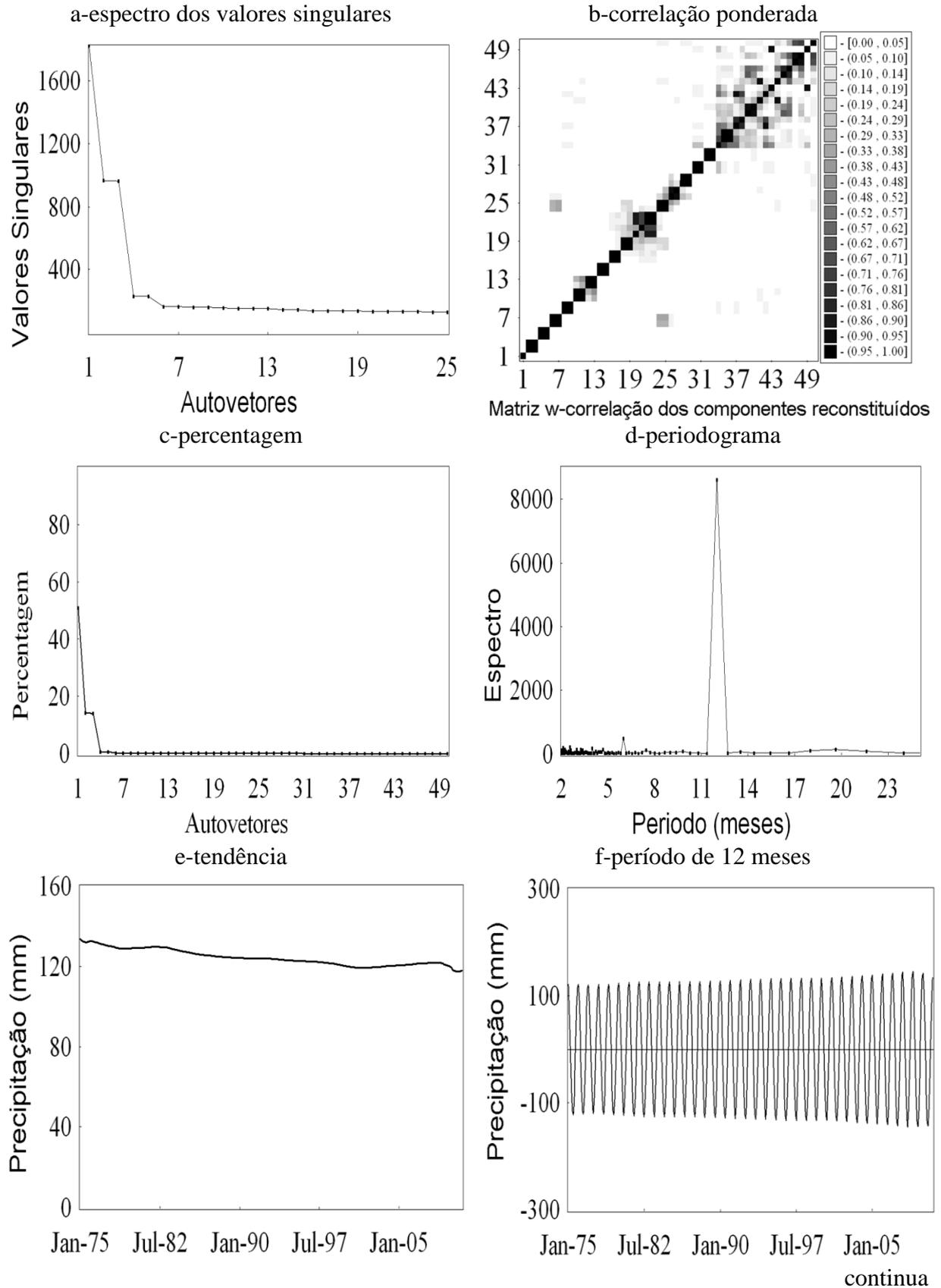
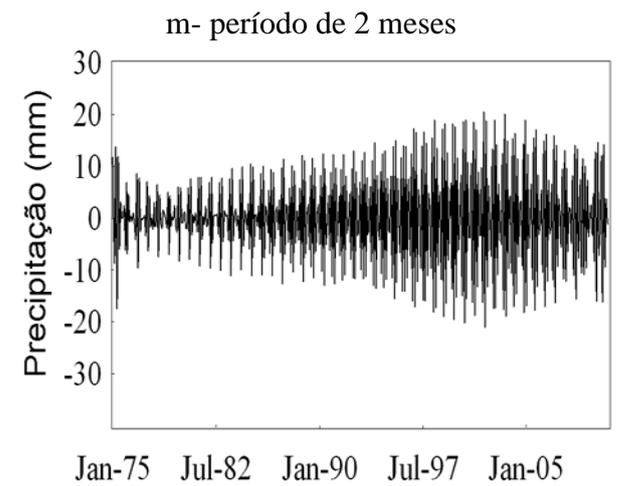
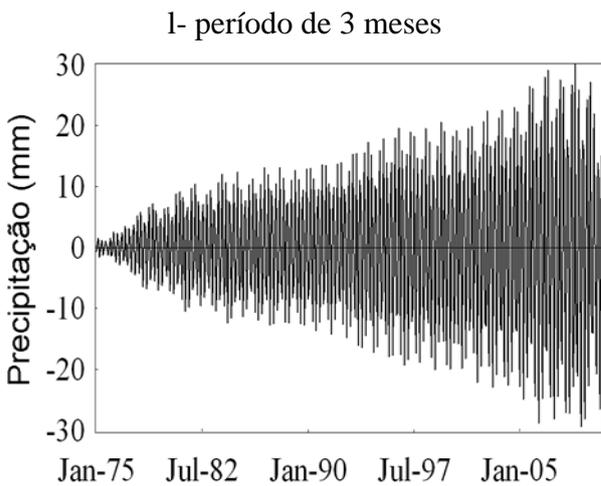
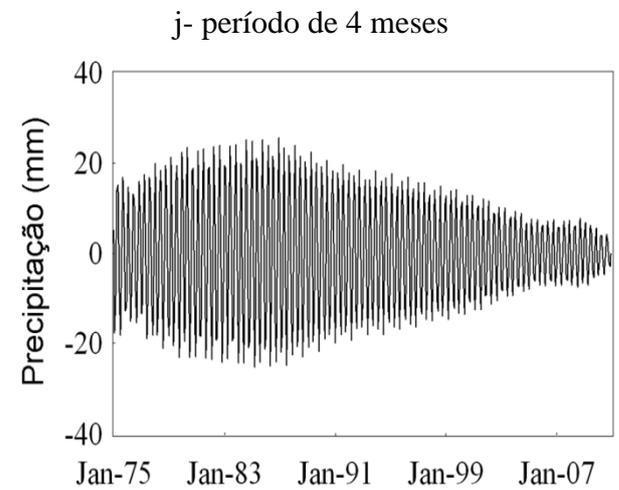
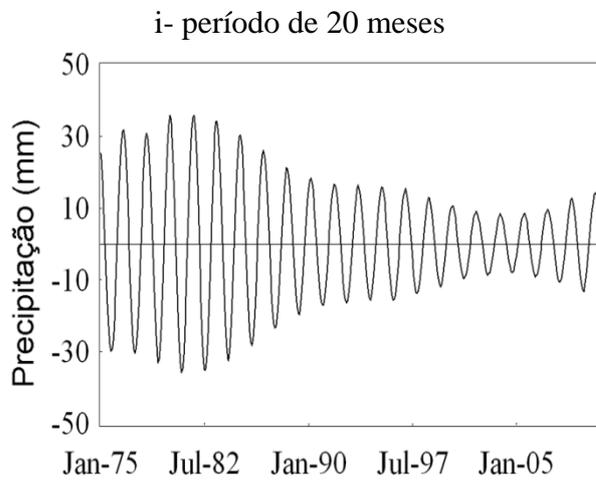
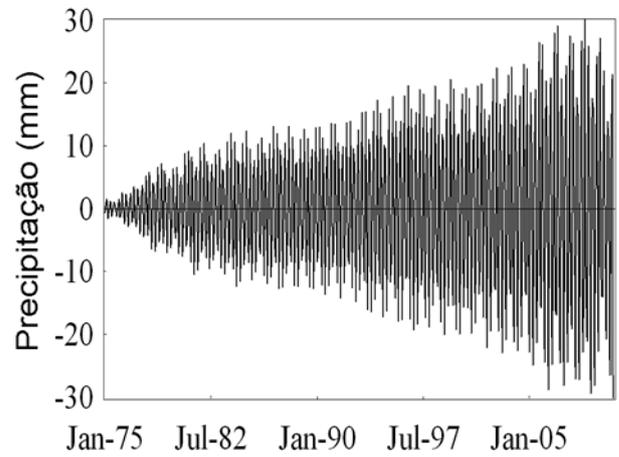
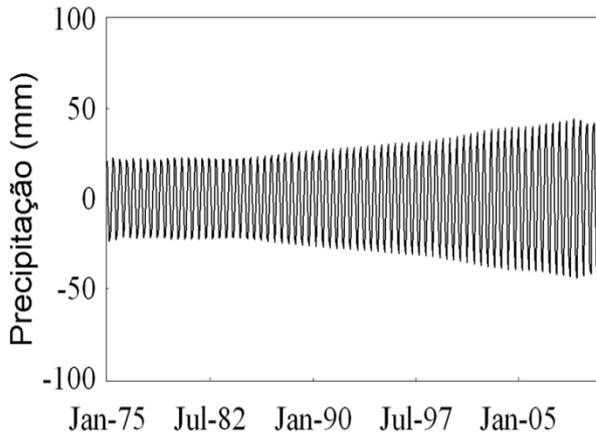
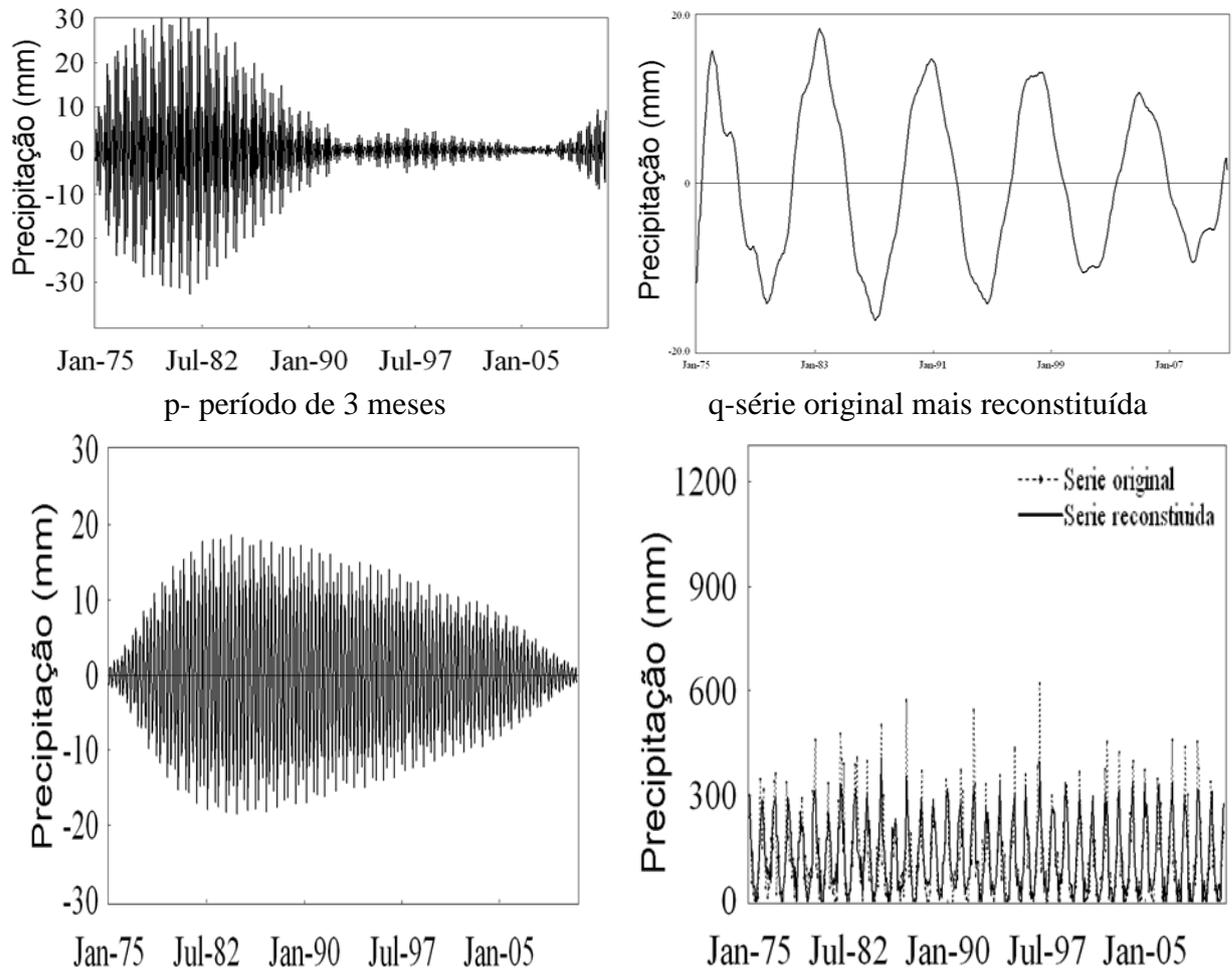


Figura 11 - Características da série de precipitação (mm) do município de Piumhi. continuação
 g- período de 6 meses
 h- período de 3 meses



continua

Figura 11 - Características da série de precipitação (mm) do município de Piumhi. continuação
 n- período de 2 meses
 o- período de 108 meses



oscilatório de dois meses, par 30-31 (Figura 11o) modo oscilatório de 108 meses ou de nove anos e finalmente par 32-33 (Figura 11p) dá origem ao modo oscilatório de três. Essa disposição também é a que os modos oscilatórios cooperam para a precipitação que, somam 34,9 % da variabilidade da série original. O componente de tendência juntamente como os componentes dos modos oscilatórios reproduzem a série de Piumhi explicando 85,7% da variação dos dados. Portanto a precipitação no município de Piumhi foi dominada pelos modos oscilatórios de escala sazonal, interanual com escala compatível com o fenômeno El Niño e escala próxima a decadal. Notou-se que a fase positiva da oscilação quase decadal (nove anos) (Figura 11o) ocorreu nos anos de 1976/77, 82/83, 90/91, 97/98, 2004/2005 e 2006/2007. Esse anos também corresponde anos de atuação do El Niño.

Observa-se que a precipitação apresentou tendência negativa no município de Piumhi. Analisando os modos oscilatórios da Figura 11, percebe-se que a causa da redução da

precipitação foi devido os modos oscilatórios de quatro, dois (Figura 11n), 108 meses e três meses enfraquecimento na sua amplitude.

A Análise Espectral Singular das séries de precipitação no Alto São Francisco apontou que os modos oscilatórios na escala intrasazonal são frequentes no Alto São Francisco. Modos oscilatórios de escala interanual com período de 18 a 20 meses fazem parte do sinal das séries de precipitação em 17 postos. Ainda na escala interanual foi detectados modos oscilatórios com escala acima de três anos. Essas escalas interanuais citadas anteriormente são compatíveis com a escala temporal do fenômeno El Niño (PHILANDER, 1989). Os estudos de Galvêncio (2000) evidenciaram que em anos de El Niño corre mais precipitação na região do Alto São Francisco. Foram detectados modos oscilatórios também na escala decadal ou próxima, na região do Alto São Francisco (Tabela 1) que concorda com os estudos de Krepper et al., que identificaram oscilação com período quase decadal quando analisaram a precipitação da bacia do rio Uruguai, 2006 ,na América do Sul, empregando a SSA

O modo oscilatório dominante no ASF foi de escala temporal de 12 meses seguido pela de seis meses. O terceiro modo dominante varia ao longo do Alto São Francisco entre as escalas temporais intersazonal (dois, três, quatro e doze meses) e interanual (entre 18 a 76 meses). Párraga (2001) aplicou uma metodologia semelhante a esta, a análise de ondeletas, nos dados de precipitação diária sobre o Brasil e encontrou oscilações interanuais entre dois a cinco anos na região Sudeste do Brasil que condiz com esta pesquisa.

Tabela 1 – Oscilações dominantes presentes nas séries de precipitação no Alto São Francisco. Os períodos estão em ordem de importância.

Município	Estado	Código	Comprimento da série (meses)	Comprimento da janela (meses)	Oscilações dominantes (período em meses)
Várzea da Palma	MG	1744009	840	420	12, 6, 3, 10, 26
Gouveia	MG	1843002	828	420	12, 6, 12, 3, 4, 5, 4, 3, 2
Presidente Juscelino	MG	1843000	828	420	12, 6, 12, 9, 4, 6, 4, 3, 2
Presidente Juscelino	MG	1844009	432	216	12, 6, 4, 3, 4
Presidente Juscelino	MG	1844010	432	216	12, 6, 18, 3
Santo Hipólito	MG	1844001	840	420	12, 6, 4, 2, 4, 3, 4
Serra Saudade	MG	1945002	840	420	12, 6, 19, 4
São Gonçalves do Abaeté	MG	1845002	840	420	12, 6, 19, 4
São Gonçalves do Abaeté	MG	1845013	624	312	12, 6, 4, 3, 2, 2, 2, 8
Tiros	MG	1845014	624	312	12, 6, 2, 5, 2, 5, 2
Tiros	MG	1845004	624	312	12, 6, 2, 18, 2, 2, 4, 33, 2, 5, 4, 2
Pato de Minas	MG	1846003	624	312	12, 6, 2, 2, 2, 2, 11, 17
Sabará	MG	1943006	840	420	12, 6, 4, 12, 7, 9, 2
BH	MG	1943022	840	420	12, 6, 10, 4, 6, 4, 18, 6, 2, 4, 9, 2, 140, 2
BH	MG	1943055	588	288	12, 6, 4, 18, 2, 6
Taquaraçu de Minas	MG	1943023	840	420	12, 6, 4, 12, 53, 19
Juatuba	MG	1943024	828	420	12, 6, 4, 2, 7, 2, 18, 10, 51
Santana do Riacho	MG	1943035	660	312	12, 6, 4, 2, 3, 2, 9
Baldim	MG	1943042	432	216	12, 6, 4, 2, 3, 2, 9
Betim	MG	1944004	840	420	12, 6, 2, 3, 4, 6, 2, 3, 6, 2, 3
Vespasiano	MG	1943009	840	420	12, 6, 4, 2, 6, 13, 2, 6, 18
Lagoa Santa	MG	1943049	444	216	12, 6, 18, 2
Florestal	MG	1944007	840	420	12, 6, 4, 2, 6, 3, 2, 2, 11, 4

continua

Tabela 1 - Oscilações dominantes presentes nas séries de precipitação do Alto São Francisco. Os períodos estão em ordem de importância.

continuação

Município	Estado	Código	Comprimento da série (meses)	Comprimento da janela (meses)	Oscilações dominantes (período em meses)
Pedro Leopoldo	MG	1944009	840	420	12, 6, 4, 4, 6, 12
Paraopeba	MG	1944031	588	276	12, 6, 4, 8, 5, 5
Onça de Pitangui	MG	1944011	840	420	12, 6, 3, 2, 5, 3, 18, 2, 12
Santana de Pirapama	MG	1944020	636	312	12
Jequitibá	MG	1944024	600	300	12, 6, 18, 2, 4, 2, 8, 11, 2, 5, 3
Bom Despacho	MG	1945004	612	300	12,6
Dores do Indaiá	MG	1945019	624	312	12, 13, 6, 12, 15, 2
Nova Lima	MG	1943000	1872	936	12, 6, 73, 20
Nova Lima	MG	2043004	852	420	12, 6, 44, 4, 4, 89, 6, 14
Congonhas	MG	2043013	840	420	12, 4, 2, 11, 6
Carmo do Cajurú	MG	2044003	840	420	12, 6, 4, 3, 2, 2
Divinópolis	MG	2044006	840	420	12, 6, 2, 12, 6
Entre Rios de Minas	MG	2044040	432	216	12, 6, 2, 4, 18, 2, 2, 2
Passatempo	MG	2044009	840	420	12, 6, 6, 2, 3, 11
Itaúna	MG	2044002	840	420	12, 6, 2, 47
Itaúna	MG	2044020	432	216	12, 6, 2, 4, 18, 2, 2, 2
Itaúna	MG	2044026	432	216	12, 6, 4, 2, 2, 2, 2, 3, 4, 18
BambuÍ	MG	2045001	840	420	12, 6, 18
BambuÍ	MG	2046007	840	420	12, 2, 6, 5, 3
Iguatama	MG	2045002	840	420	12, 6
Piumhi	MG	2045012	432	216	12, 6, 3, 20, 4, 3, 2, 2, 108, 3
Vargem Bonita	MG	2046013	432	216	12, 6, 2, 2, 2, 2, 5

4.3.1.2 Médio São Francisco

Os principais modos oscilatórios que compõem o sinal da série de precipitação do município de Formosa do Rio Preto (código 1145004) estão dispostos na Figura 12, ou seja, o sinal da dinâmica básica dos principais sistemas atmosféricos que contribuem para a variabilidade da precipitação. A série temporal de 564 meses de comprimento foi decomposta em 265 vetores defasados cujo comprimento da janela foi de 264 meses.

Figura 12 - Características da série de precipitação do município de Formosa do Rio Preto.

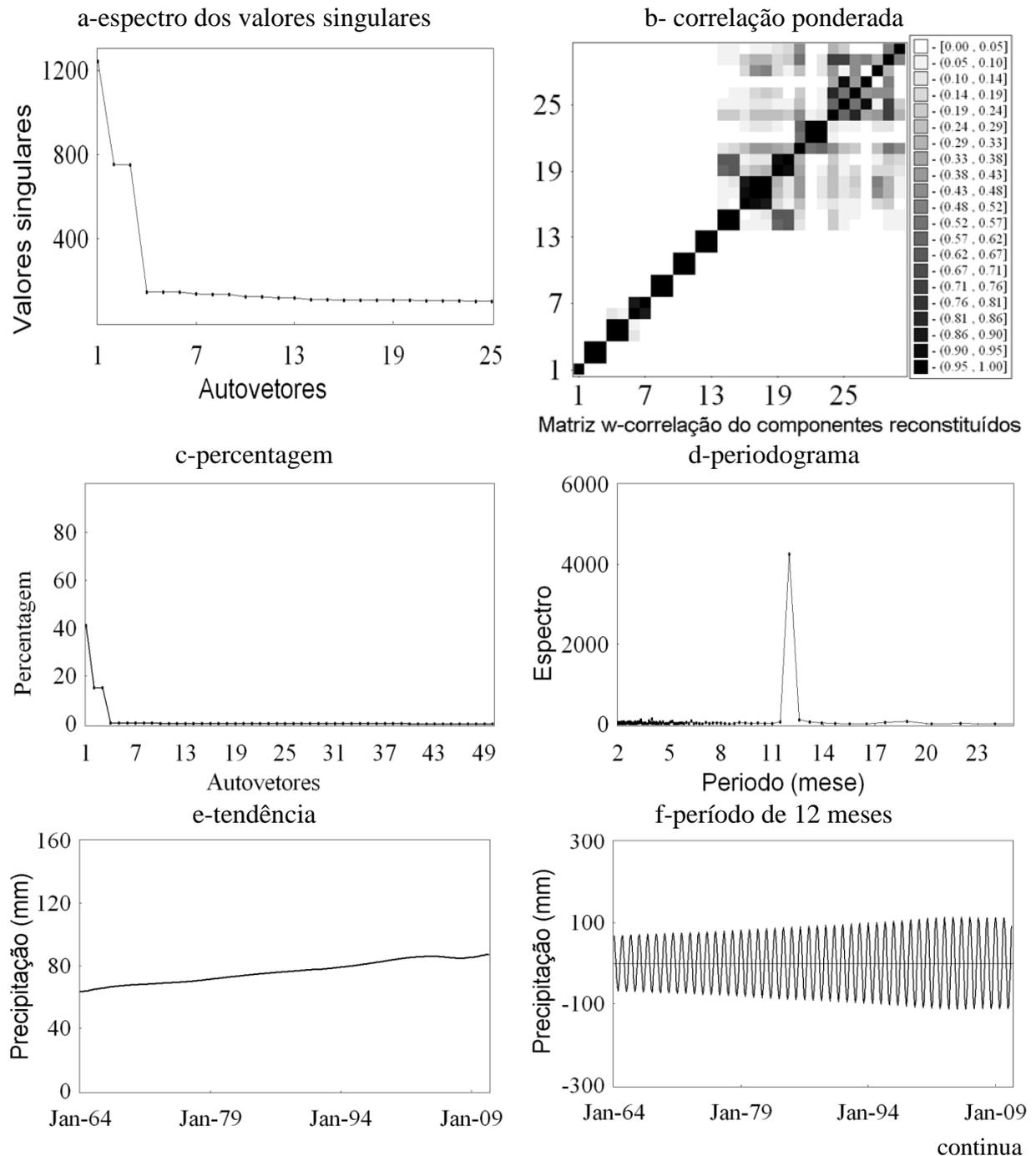
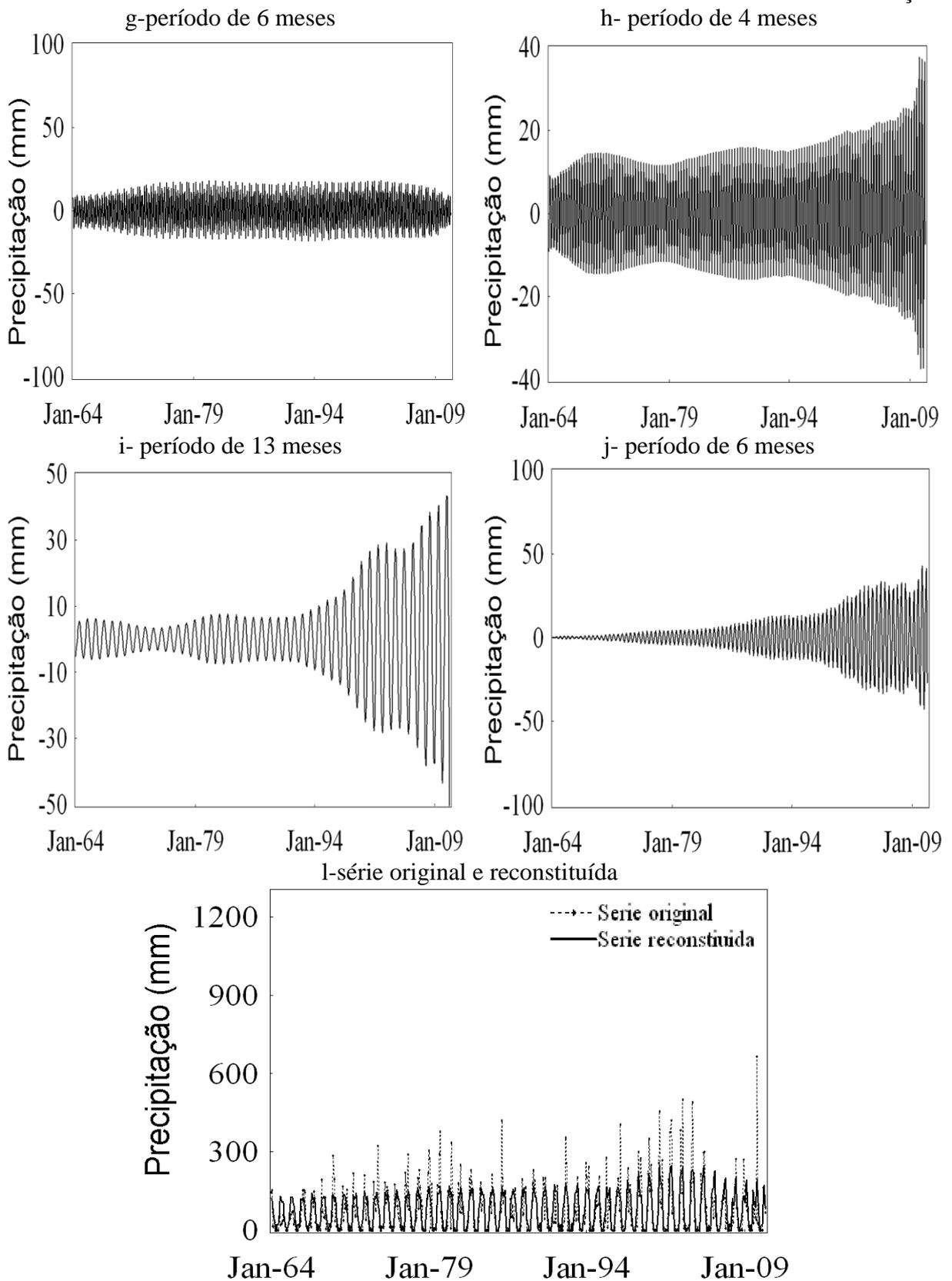


Figura 12 - Características da série de precipitação do município de Formosa do Rio Preto.



A Figura 12a do espectro dos valores singulares indica que o autovetor um corresponde a um componente de tendência e os pares 2-3 (Figura 12f) corresponde ao modo oscilatório de 12 meses, o par 4-5 (Figura 12g) de seis meses, par 8-9 (Figura 12h) de quatro meses, par 10-11 (Figura 12i) de 13 meses e o par 12-13 (Figura 12j) de seis meses. Essa ordem também indica a contribuição de cada um desses períodos. O de maior contribuição foi o de 12 meses com 30,2%, o segundo maior contribuinte foi de seis meses com 1,15%, quatro meses contribuiu com 0,966%, de treze com 0,8 e de seis meses com 0,75%.

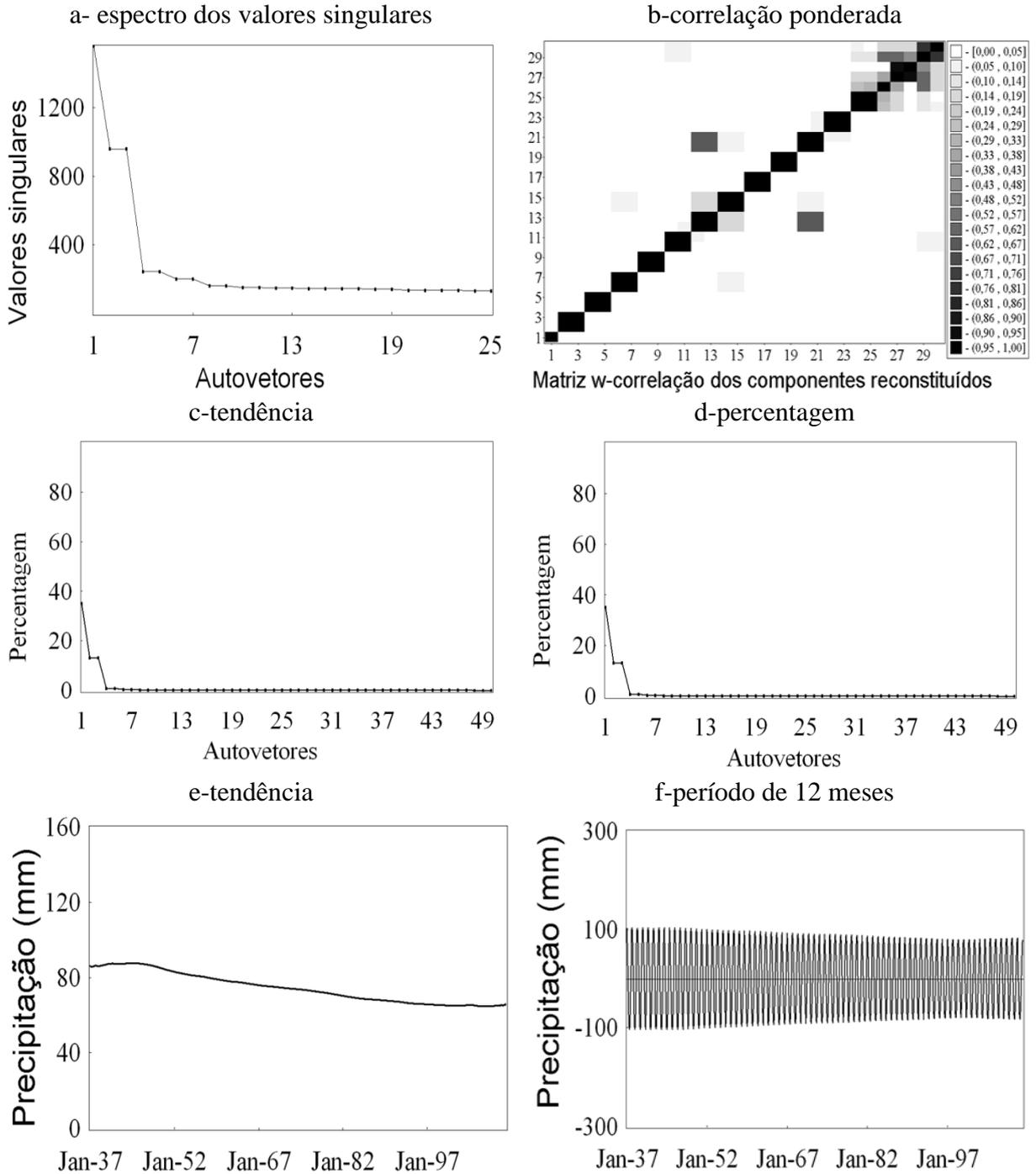
A tendência foi a maior contribuinte para a variabilidade da precipitação com 41,18% da variação dos dados. O município de Formosa do Rio Preto apresentou tendência positiva de precipitação que pode ser atribuída principalmente aos períodos de quatro (Figura 12h), 13 (Figura 12i) e seis (Figura 12j) meses que apresentaram após 1996, uma maior intensidade na sua amplitude. O período de seis meses foi mais atuante a partir da década de 70 até por volta de 2007. A Figura 12l salienta o aumento de precipitação no final dos anos 1990 e início de 2000.

Como observado na Figura 12b a partir do componente 15 a matriz de correlação ponderada apresenta muitos componentes correlacionados com os demais (bloco na cor preta e cinza), o que indica que eles não são separáveis. Sendo assim, a separação entre o sinal e o ruído da série de Formosa do Rio Preto resultou em três grupos. O primeiro grupo composto apenas por um autovetor que dá origem ao componente de tendência, o segundo grupo composto pelos autovetores 2-5 e 8-13 que dão origem ao componente oscilatório da série e o terceiro, formado por todos os outros autovetores que foram considerados como ruído. Vale ressaltar que os autovetores 6-7, a pesar de aparentemente indicar pertencer a um periódico, na verdade, são componentes de tendência com forte correlação, por isso, não foram selecionados. Sendo assim, a dinâmica básica dos principais fenômenos atmosféricos produtores de precipitação em Formosa do Rio Preto são da escala temporal intrasazonal.

Portanto, esses poucos autovetores que compõem o sinal da série (tendência e oscilação) e explicaram 75% de toda a variação dos dados totais originais. E como pode ser constatado na Figura 12l o componente da tendência mais o modo oscilatório de 12 meses, principal período da série (Figura 12d), são responsáveis por 71,43% da variação da série original. Com os demais modos oscilatórios a série foi reconstituída com 75,1% da variabilidade dos dados (Figura 12l).

O componente de tendência e os principais modos oscilatórios para a série de precipitação para o município de Santana, cujo código de identificação é 1343008, são mostrados na Figura 13. Essa série tem 884 meses de comprimento (N=884) e, o comprimento da janela foi escolhido com 442 (L=442) que pode capturar oscilações com períodos de até 37 anos.

Figura 13- Características da série de precipitação do município de Santana.



continua

Figura 13- Características da série de precipitação (mm) do município de Santana.

continuação

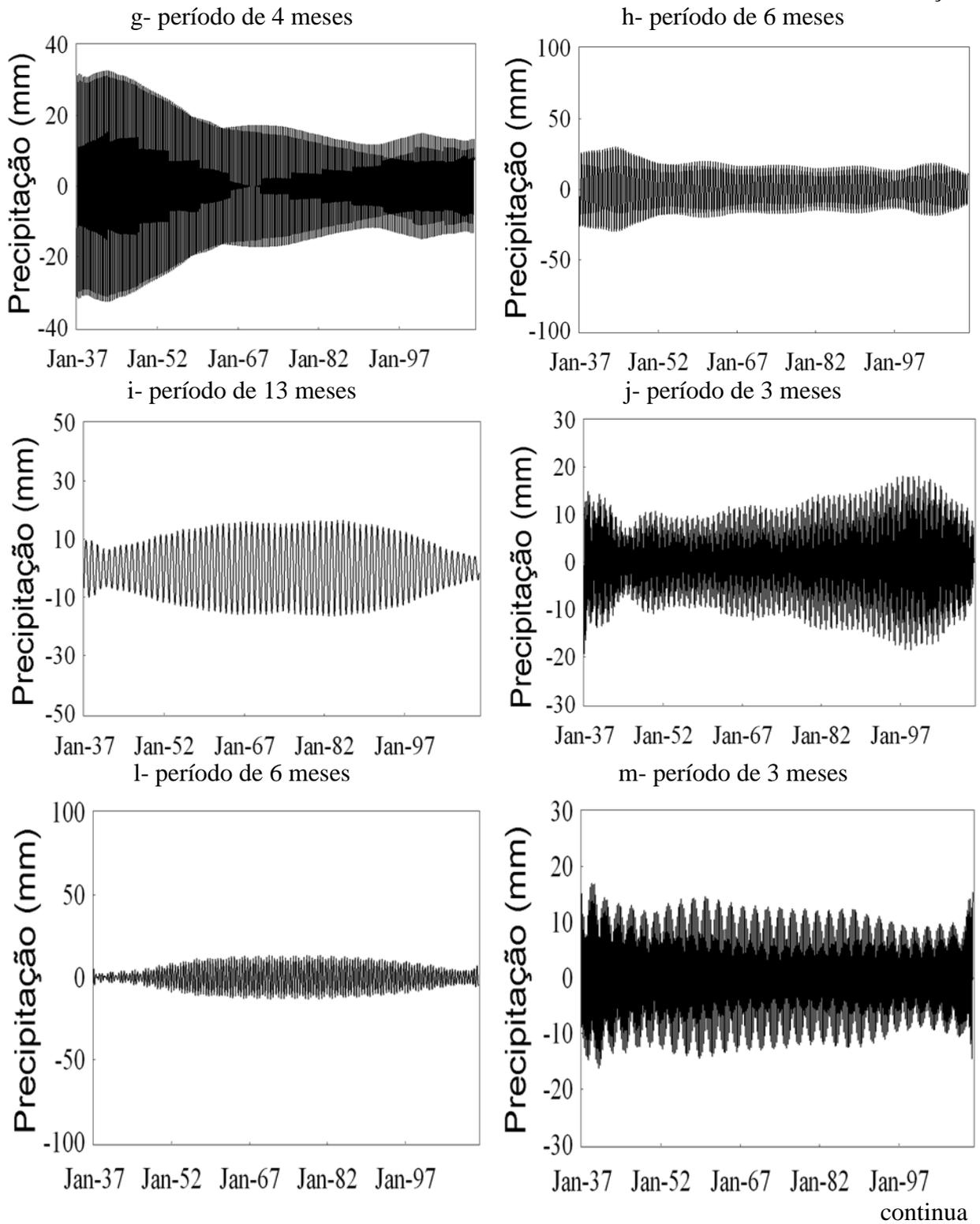
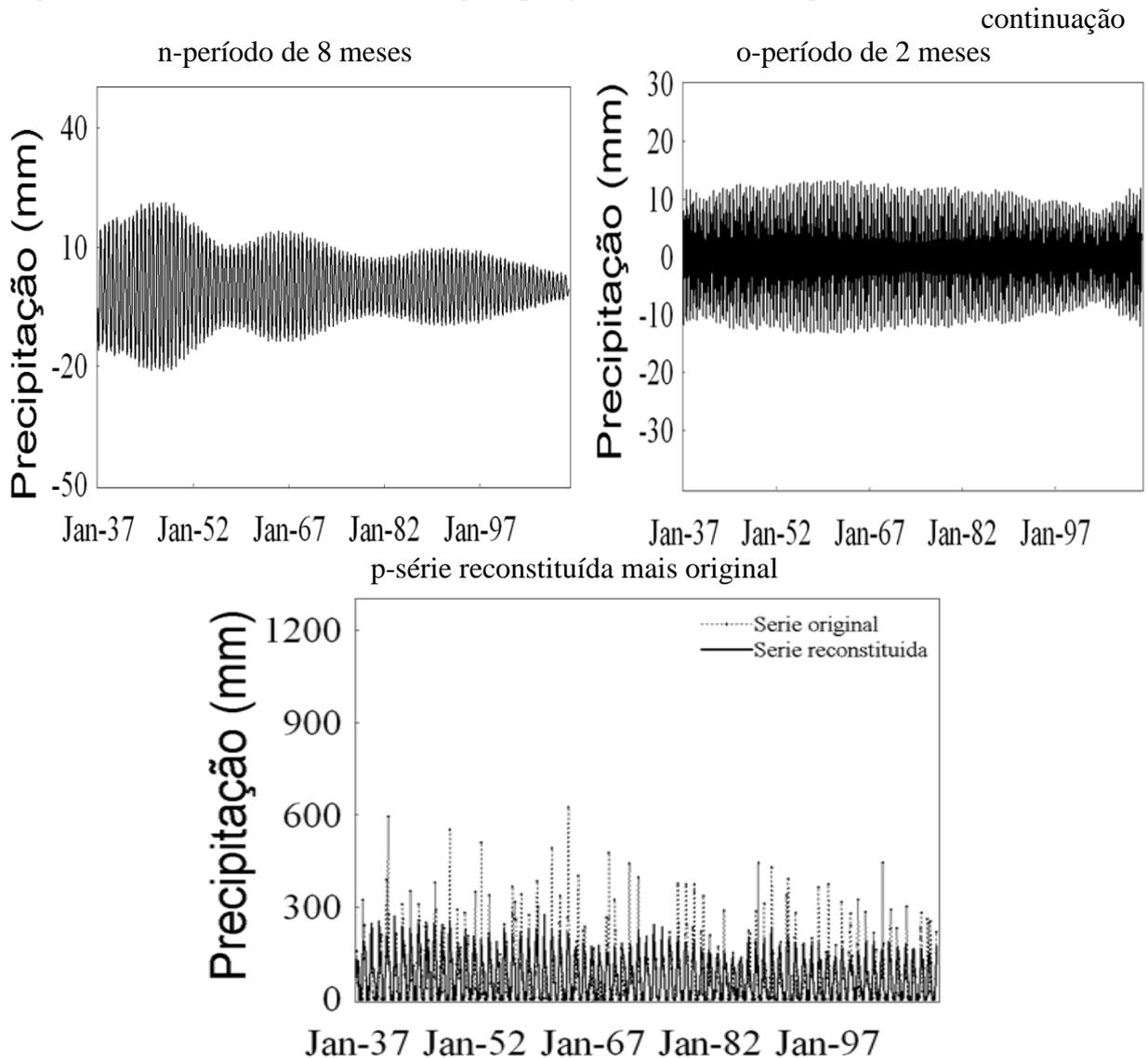


Figura 13- Características da série de precipitação (mm) do município de Santana.



Como mostra o espectro dos valores singulares (Figura 13a), um componente de tendência e oito principais modos oscilatórios são os que compõem o sinal da dinâmica básica dos fenômenos que causam variação na precipitação no município de Santana. Esses oito modos oscilatórios principais são de 12 meses (par 2-3) (Figura 13f), quatro meses (par 4-5) (Figura 13g) que apresentou decréscimo na precipitação no meado da década de 40; seis meses (par 6-7) (Figura 13h) que indicou diminuição da precipitação também no meado da década de 40 além de demonstrar que esse modo oscilatório sofre modulamento de uma oscilação de aproximadamente 15 anos; 13 meses (par 8-9) (Figura 13i) onde se observa aumento nos índices de precipitação de 1940 até por volta de 1992; três meses (par 10-11)

(Figura 13j) onde percebe-se aumento de precipitação na década de 90, seis meses (par-14-15) (Figura 13l), três meses (par 16-17) (Figura 13m) que nota-se que a precipitação foi modulada por uma oscilação de dois anos, oito meses (par 18-19) (Figura 13m) que mostra diminuição e modulamento da precipitação e de dois meses (par 22-23) (Figura 13p). Como pode ser observado na Figura 13b, esses pares de autovetores são altamente correlacionados entre si e não se correlacionam com os demais autovetores ou tem correlação muito baixa, indicando que os componentes do sinal da série foram bem separados daquele do ruído.

Ao longo dos 74 anos da série, percebe-se que a precipitação apresentou tendência negativa. Por meio dos modos reconstituídos observa-se que os mesmos sofrem influências de outras oscilações de escala maior, exceto a oscilação com período de 12 meses. A Figura 13p que representa a precipitação reconstituída indica bem a tendência negativa e a modulação da precipitação no município de Santana. Apesar de nove modos oscilatórios extraídos para reconstituir a série de precipitação nesse município a mesma representa 68,9% da variação dos dados originais. A tendência explicou 35% da variação dos dados, o período de 12 meses 26,55% e os demais modos oscilatórios juntos explicou cerca de 6%.

A Figura 14 revela o resultado da decomposição da série de precipitação do município de Montalvânia (código 1444001). Essa série tem 696 meses que corresponde a 29 anos. O resultado da decomposição em autovetores foram 349. Destes, apenas 13 foram selecionados para representar a dinâmica básica dos sistemas atmosféricos.

O autovetor um (Figura 14a) foi selecionado como componente de tendência que representou 36,97% da variação explicada da precipitação. Os autovetores 2-3 representam um período de 12 meses (Figura 14f), o qual foi o principal período da série (Figura 14d), que tem contribuição na variabilidade da precipitação, no referido município, de 27,2% (Figura 14c). O segundo modo oscilatório mais importante foi o de seis meses (Figura 14h) cuja variabilidade explicada da precipitação chega a 1,33%. As oscilações com período ainda na escala sazonal são de cinco (par de autovalores 8-9) (Figura 14h) e nove (par 14-15) (Figura 14i), apesar de apresentar correlação com outros autovetores eles foram selecionados porque a correlação foi baixa e foram considerados como parte do sinal da série. Portanto, no município de Montalvânia os principais modos oscilatórios que induz a precipitação são de escala intrasazonal.

Figura 14 - Características da série de precipitação do município de Montalvânia.

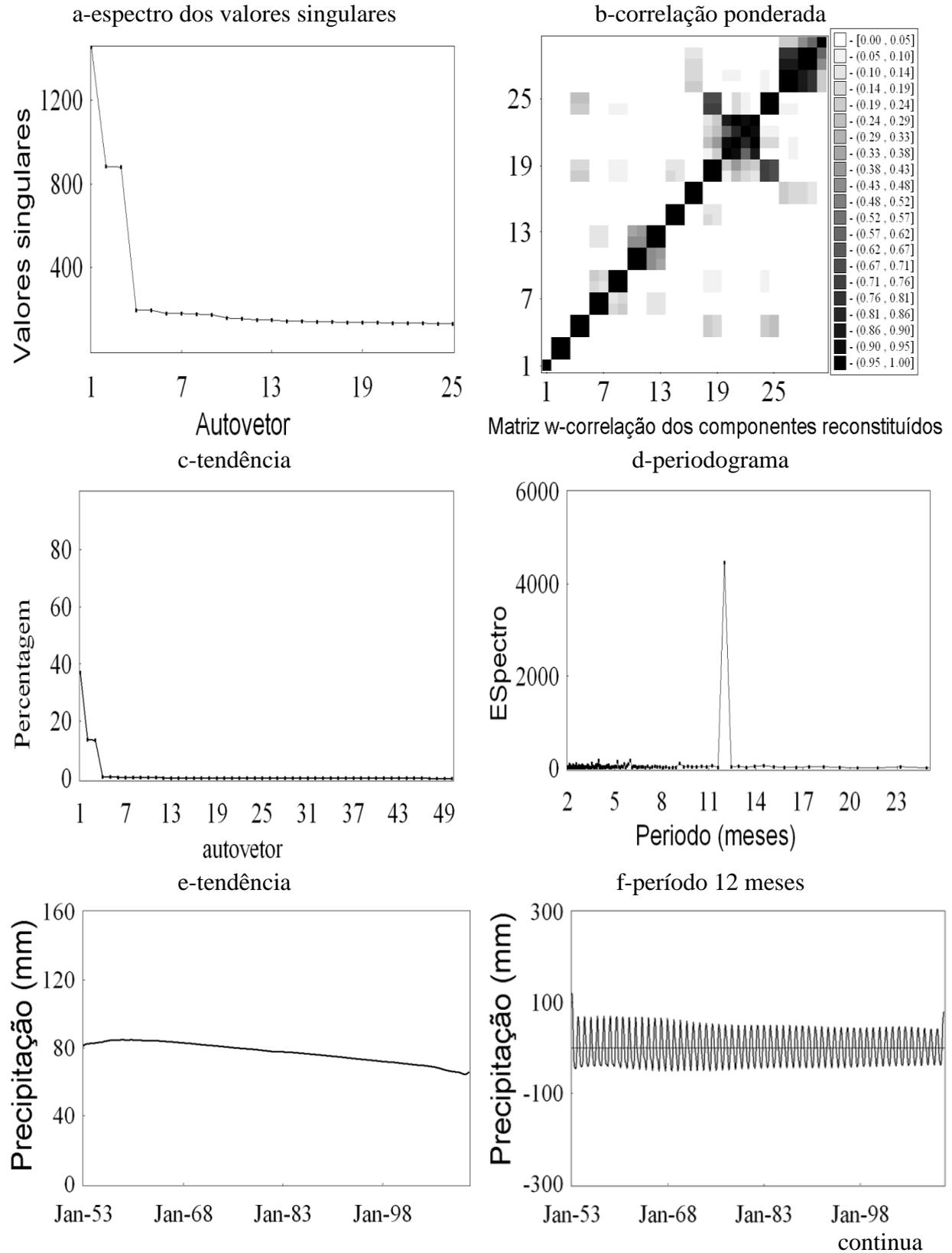
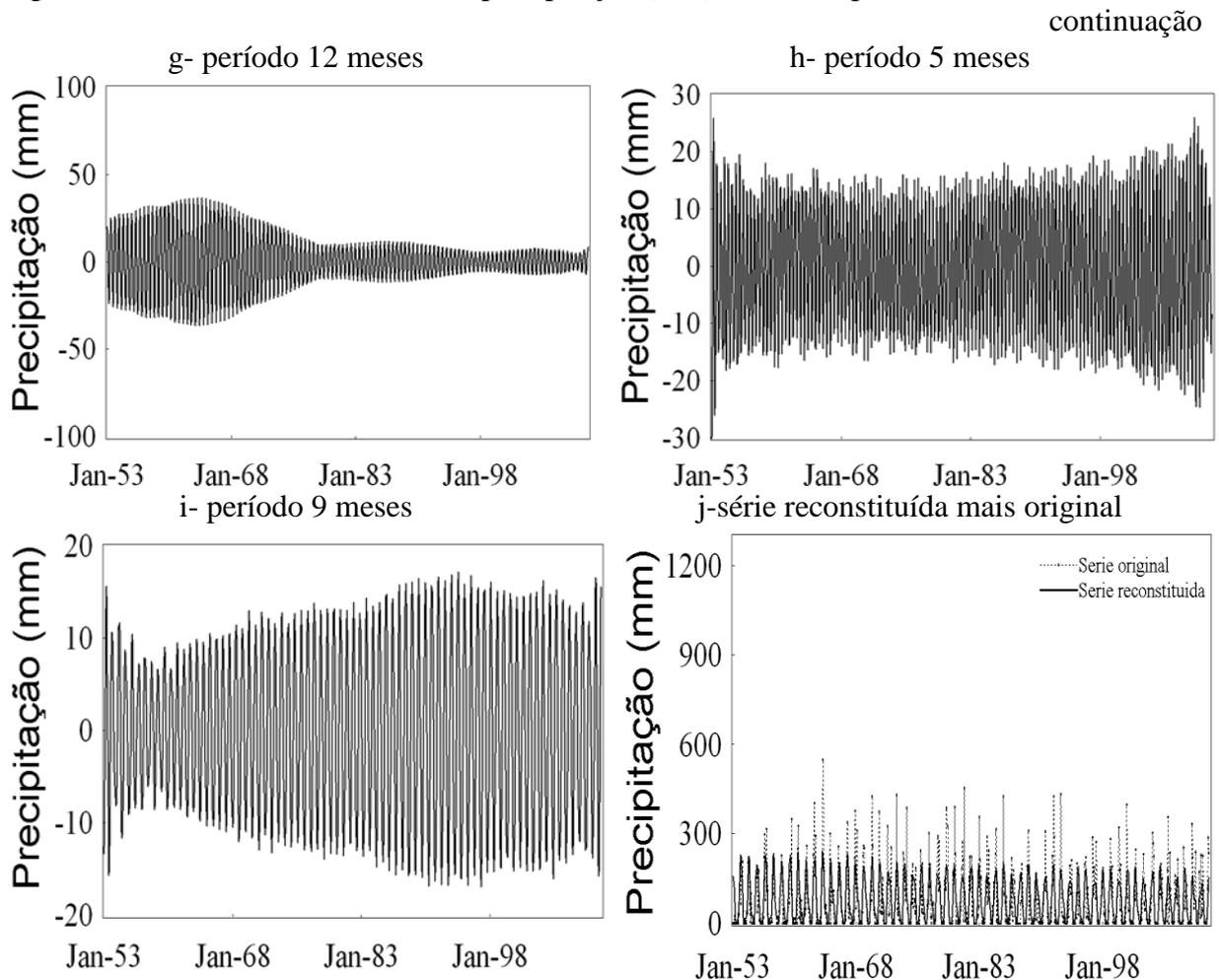


Figura 14- Características da série de precipitação (mm) do município de Montalvânia.



Esses quatro períodos intrasazonais e mais o componente de tendência resultaram na Figura 14j que indica a série reconstituída com 69,13% da variação total dos dados originais. Essa figura mostra ainda, que a partir de 1979 o município ficou mais seco. A Figura 14b mostra dois blocos correspondentes ao ruído da série, o primeiro a partir do 18 autovetor até ao 60 e, o segundo do 61 em diante. A tendência negativa da precipitação indicada na Figura 14e provavelmente deve ter uma grande contribuição do modo oscilatório de seis meses que apresentou enfraquecimento na sua atuação desde a década de 60 (Figura 14g).

Como pode ser observado no gráfico do periodograma na Figura 15d o principal modo oscilatório que causou variação da precipitação no município de São Romão (código de identificação 1645000) foi a periodicidade de 12 meses (Figura 15f), seguida pela de seis (Figura 15g), quatro meses (Figuras 15i e 15j), três meses (Figuras 15l, 15m e 15n) e também

Figura 15 - Características da série de precipitação do município de São Romão.

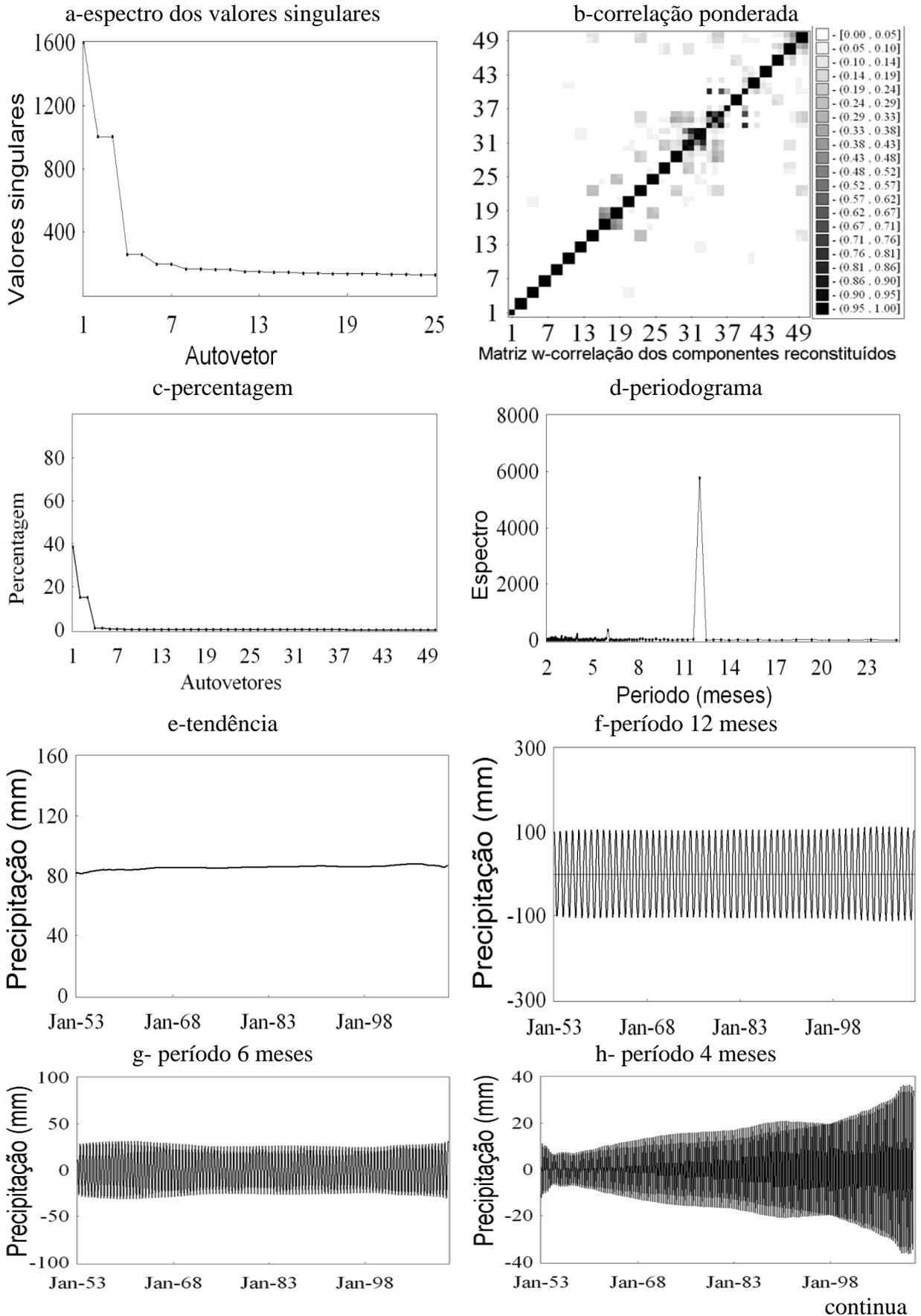
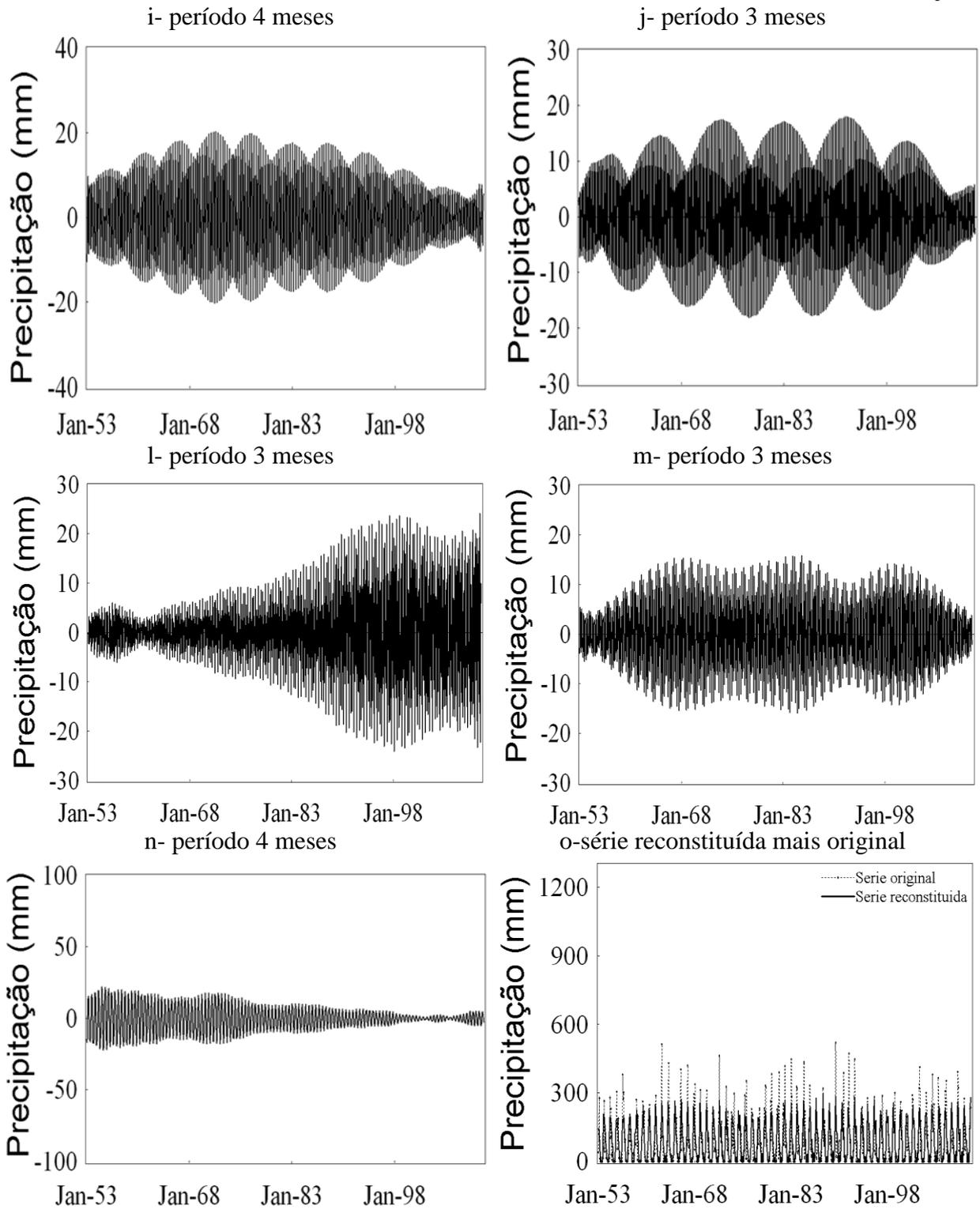


Figura 15- Características da série de precipitação (mm) do município de São Romão..

continuação



por outra oscilação de 12 meses (Figura 15o). Essa série temporal é típica daquelas que foram observadas no Médio São Francisco, isto é, grande parte dos modos oscilatórios foi de escala intrasazonal com predominância com períodos de três, quatro e seis meses. Porém, alguns desses modos oscilatórios apresentaram modulamentos por ciclos de escala maior. Esse efeito foi reproduzido na precipitação reconstituída representada pela Figura 15p que representa 75,5% da variabilidade dos dados originais.

A tendência apresentou indicativo de aumento de precipitação e a variação da precipitação explicada por esse componente foi de 38,63%. Como já visto nas estações anteriores, este município também apresentou períodos de quatro e três meses com variação modulada. Os periódicos selecionados correspondem 36,87% da variação da série original.

No Médio São Francisco, as estações nas latitudes entre 11° e 14° apresentaram o período de quatro meses como o segundo mais importante e, à medida que se aproxima da região do ASF, o segundo modo oscilatório passa a ser o de seis meses. A variabilidade da precipitação explicada pelo componente de tendência foi em média 30% dos totais originais. As estações localizadas nas latitudes de 11°, 16° e 17° explicaram aproximadamente 39% da variação da precipitação. As situadas em 12°, 13° e 15° explicaram 35% e aquelas na latitude de 14° explicaram a menor variação da precipitação dos dados originais, que foi de 34%.

Nos postos do Médio São Francisco não foi observado a influência direta dos modos oscilatórios da escala interanual ou da decadal nos dados de precipitação, uma vez que nenhum par de autovetores do componente oscilatório, com escala temporal, nessas duas escalas fez parte do sinal das séries de precipitação. Porém, essas escalas influenciaram indiretamente a precipitação no Médio São Francisco devido elas modularem os modos oscilatório intrasazonais.

Tabela 2 – Oscilações dominantes presentes nas séries de precipitação do Médio São Francisco. Os períodos estão em ordem decrescente de importância.

Município	Estado	Código	Comprimento da série (meses)	Comprimento da janela (meses)	Oscilações dominantes (período em meses)
Mansidão	BA	1143010	888	444	12, 4, 5, 9
Santa Rita Cássia	BA	1144027	1188	578	12, 4, 6, 4, 2, 5, 2, 3, 3, 2, 4, 7, 4
Formosa do Rio Preto	BA	1145001	828	396	12, 4, 6, 3, 2, 2
Formosa do Rio Preto	BA	1145004	564	264	12, 3, 4, 13, 6
São Desidério	BA	1245005	432	216	12, 3, 3, 5, 4, 6
São Desidério	BA	1245007	432	216	12, 4, 5, 3, 2, 9, 4, 6, 2, 27, 3, 4, 2
Santana	BA	1343008	888	444	12, 4, 6, 13, 3, 6, 3, 8, 2, 11, 10, 4, 5
Coribe	BA	1344015	432	216	12, 6, 5, 4, 2, 5, 3
Correntina	BA	1344014	432	216	12, 6, 4, 3, 5, 3, 2
Manga	MG	1443001	864	432	12, 6, 4, 6, 4, 2, 6
Manga	MG	1444003	528	264	12, 4, 3, 9, 3, 3, 2, 4, 4, 13
Manga	MG	1543002	576	288	12, 6, 4, 5, 3, 3, 9, 3
Carinhanha	BA	1443018	1188	576	12, 4, 6, 14, 9, 5
Montalvânia	MG	1444000	768	384	12, 4, 6, 5, 4, 3
Montalvânia	MG	1444001	696	348	12, 6, 4, 5, 9, 3
Montalvânia	MG	1444005	432	216	12
Coco	BA	1444017	768	384	12, 4, 6, 5, 3, 2, 4, 5, 13
São Francisco	MG	1544012	870	420	12, 6, 5, 8, 3, 2, 4, 2, 3

continua

Tabela 2 – Oscilações dominantes presentes nas séries de precipitação do Médio São Francisco. Os períodos estão em ordem decrescente de importância.

Município	Estado	Código	Comprimento da série (meses)	Comprimento da janela (meses)	Oscilações dominantes (período em meses)
São Francisco	MG	1645005	528	264	12, 6, 4, 9, 3, 2, 8
Janaúba	MG	1543013	432	216	12, 6, 4, 3, 6, 3
Varzelândia	MG	1544000	582	276	12, 6, 4, 3, 3, 13, 15, 3
Buritís	MG	1546001	576	288	12, 13, 4, 2
Cabeceiras	MG	1546005	432	216	12, 4, 8, 3, 6
Unai	MG	1646001	552	276	12, 4, 8, 3, 6, 7, 2, 5, 5, 3
Unai	MG	1646003	432	216	12, 4, 6, 8, 3
Brasília de Minas	MG	1644027	432	216	12, 6, 4, 3, 3, 3
São Romão	MG	1645000	698	348	12, 6, 4, 4, 3, 3, 3, 6, 3, 2, 5
São Romão	MG	1645003	696	348	12, 6, 3, 2, 15, 17
São Romão	MG	1645002	576	288	12, 6, 4, 8, 4
Buritizeiro	MG	1645009	432	216	12, 6, 3, 8, 4, 9
Buritizeiro	MG	1645013	432	216	12, 6, 3, 4, 3, 3, 3
Buritizeiro	MG	1745001	528	264	12, 6, 8, 2, 13
Santa Fé de Minas	MG	1645007	696	348	12, 6, 5, 8, 4, 7, 3, 4, 2
João Pinheiro	MG	1745000	587	276	12, 6, 3, 3, 16, 3
João Pinheiro	MG	1746006	432	216	12, 6, 3
Presidente Olegário	MG	1846005	432	216	12, 6, 2
Presidente Olegário	MG	1846016	624	312	12, 6, 8

4.3.1.3 Submédio São Francisco

Na Figura 16 são expostos os resultados dos principais componentes de tendência e periódicos, oriundos da decomposição em autovetores defasados, da série de precipitação do município de Afogados da Ingazeira, cujo número de identificação é 737023. A série possui 97 anos ($N=1164$ meses) e o comprimento da janela foi de $L=564$ meses, onde se podem detectar modos oscilatórios de 47 anos que possam influenciar a precipitação nesse município.

A decomposição resultou em 601 autovetores defasados e, destes apenas 14 foram escolhidos como sinal da série e os outros 587, foram considerados como ruído da série. Os 20 autovetores resultaram em um componente de tendência (Figura 16e). Sete modos oscilatórios foram reconstituídos por meio dos pares de autovetores 2-3 (Figura 16f) e 8-9 (Figura 16i) com período de 12 meses, o último par indica um aumento de precipitação no início dos anos 80; dois pares 4-5 (Figura 16g) e 17-18 (Figura 16l) que mostra aumento de precipitação a partir da década de 90; um par 6-7 (Figura 16h) com período de quatro meses e par 19-20 (Figura 16m) com período de cinco meses que também aponta aumento de precipitação no início dos anos noventa.

A precipitação dessa estação também foi influenciada por uma oscilação com período de 40 meses (Figura 16j) que já é indicativo que em Afogados da Ingazeira o sinal da série é composto por fenômenos da escala temporal interanual compatível com o El niño. No entanto, os principais períodos de maior contribuição são os de 12, seis e quatro meses como mostra o periodograma (Figura 16d).

.Figura 16- Características da série de precipitação do município de Afogados da Ingazeira.

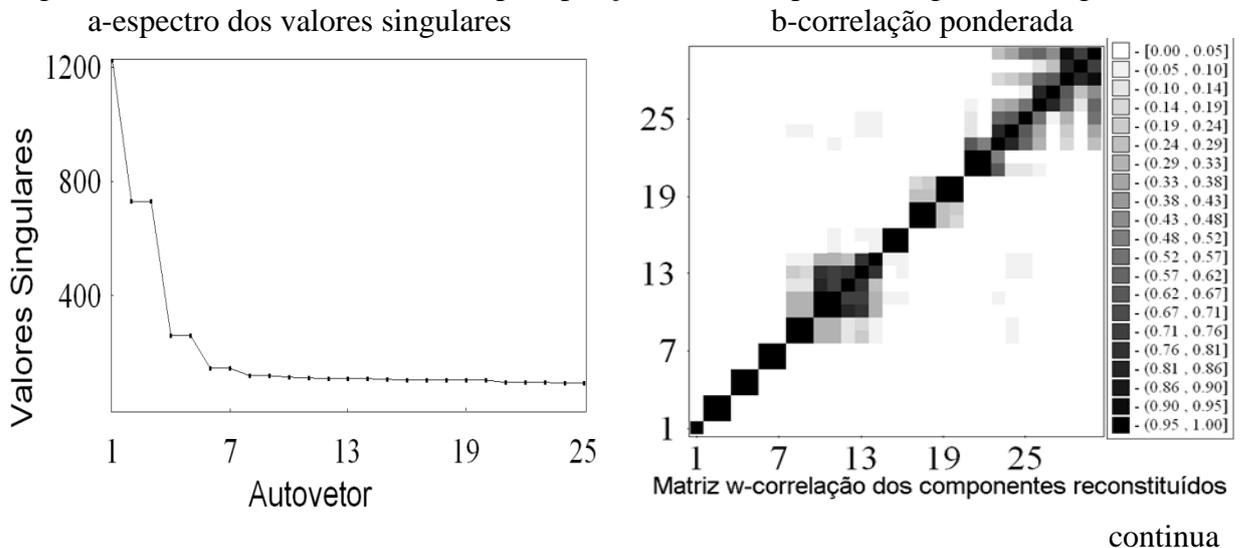
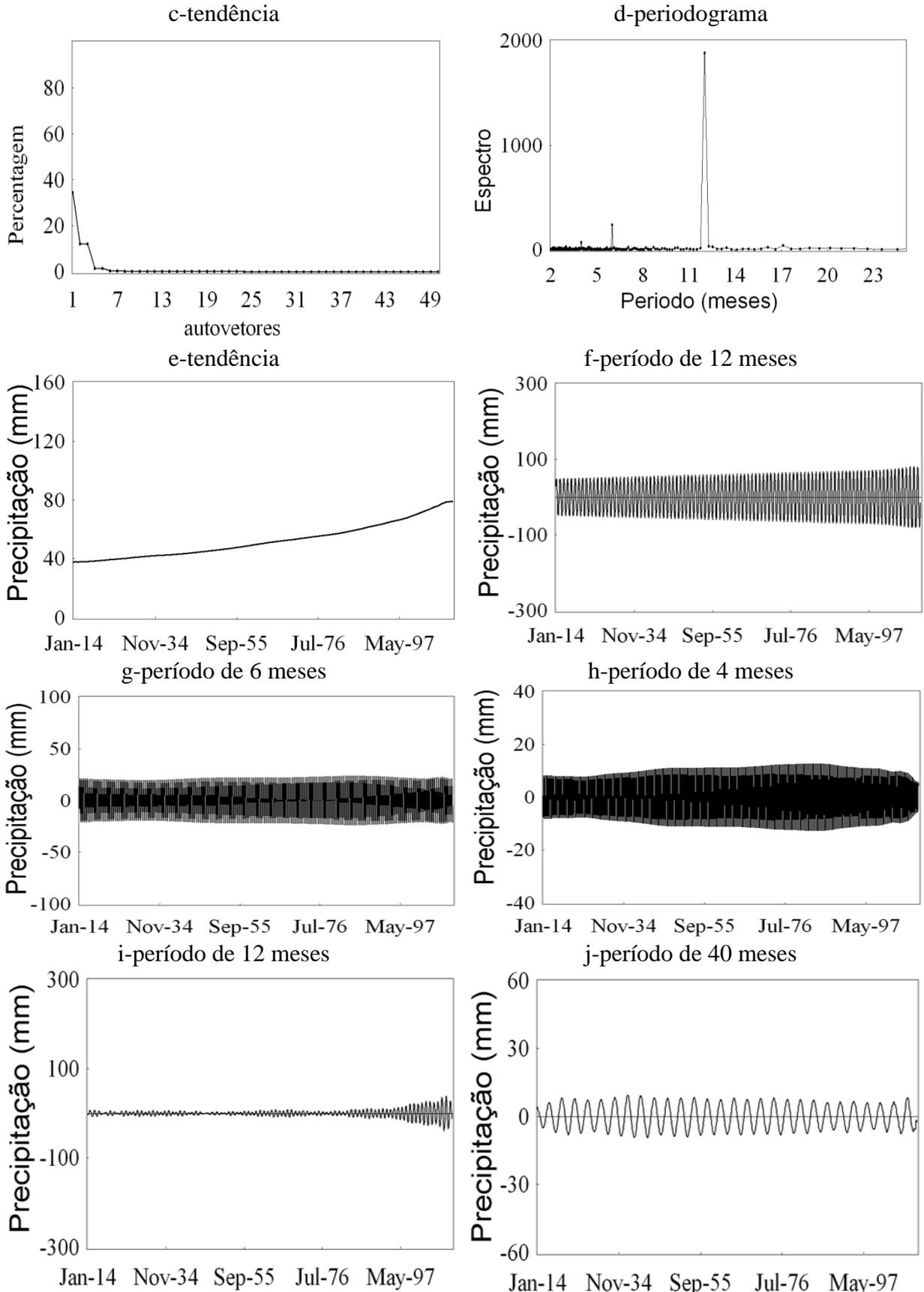


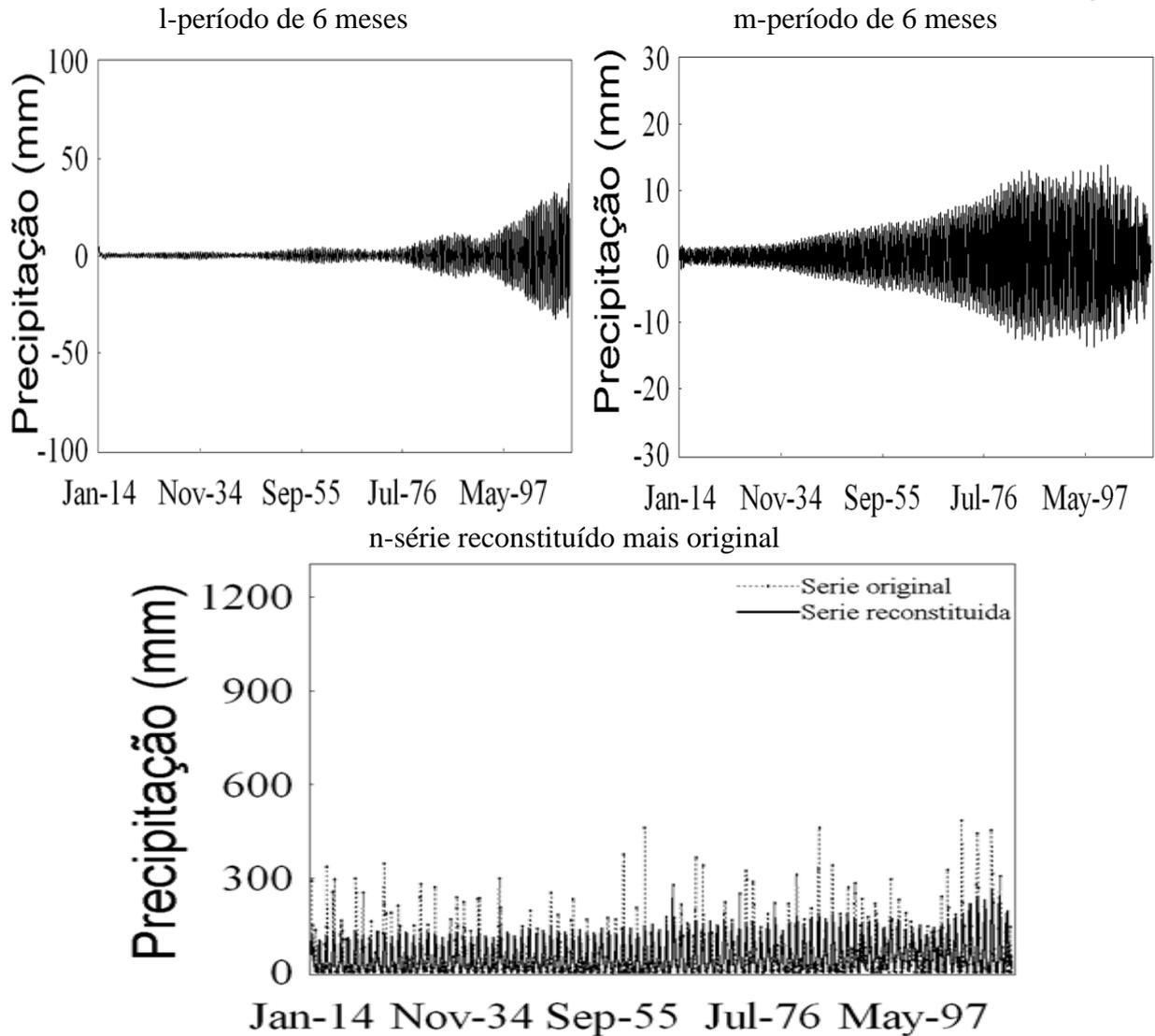
Figura 16- Características da série de precipitação do município de Afogados da Ingazeira.

continuação



continua

Figura 16- Características da série de precipitação do município de Afogados da Ingazeira.
continuação



O componente de tendência da série indica que houve aumento de precipitação ao longo desses 94 anos no município de Afogados da Ingazeira. Observa-se que a tendência geral da série, apesar de apresenta um aumento linear na precipitação. O aumento de precipitação observado nesse município pode ser atribuído aos modos oscilatórios com períodos de 12 meses (Figura 16f e 16i), seis meses (Figura 16g e 16l). A tendência representou 34,4% da variação dos dados e os modos oscilatórios 30,8%. Portanto, a série de Afogados da Ingazeira foi reconstituída com 65,2% da variabilidade dos dados originais.

A série de precipitação do município de Flores (737027) Figura 17 apresentou um autovetor que corresponde a um componente de tendência e nove pares relacionados aos modos oscilatórios da série. Destes, a metade reproduzem os modos oscilatórios da escala intrasazonal, os quais são: doze meses (2-3) (Figura 17f), seis meses (4-5) (Figura 17g), quatro meses (6-7) (Figura 17h), dois meses (14-15) (Figura 17l) e 10 meses (20-21) (Figura 17o). Na escala maior tem-se: um ano e cinco meses (10-11) (Figura 17i), 3 anos e quatro meses (12-13) (Figura 17j), um ano e um mês (16-17) (Figura 17m), aproximadamente, 10 anos (18-19) (Figura 17n). Dessa forma no município de Flores as três escalas temporais (intrasazonal, interanual e decadal) influenciam a variabilidade da precipitação.

Flores apresentou tendência negativa de precipitação de 1912 a 1999 e tendência positiva após esse ano (Figura 17e). Os períodos de 12, seis meses, quatro, um ano e cinco meses, 41 meses e dois meses indicam decréscimos na precipitação.

Os autovetores oito e nove apesar de fazerem parte do sinal da série (Figura 17b), não foram reconstituídos porque os dois apresentaram correlação muito forte, que a primeira vista, confundem-se com um periódico. Observou-se também que a oscilação com período de três anos e quatro meses foi a mais importante para a constituição do componente de tendência no município de Flores. A série foi reconstituída com 68,7% da variação dos dados, sendo que, 37,8% devido à tendência e 30,9% atribuídos aos periódicos.

Figura 17- Características da série de precipitação do município de Flores.

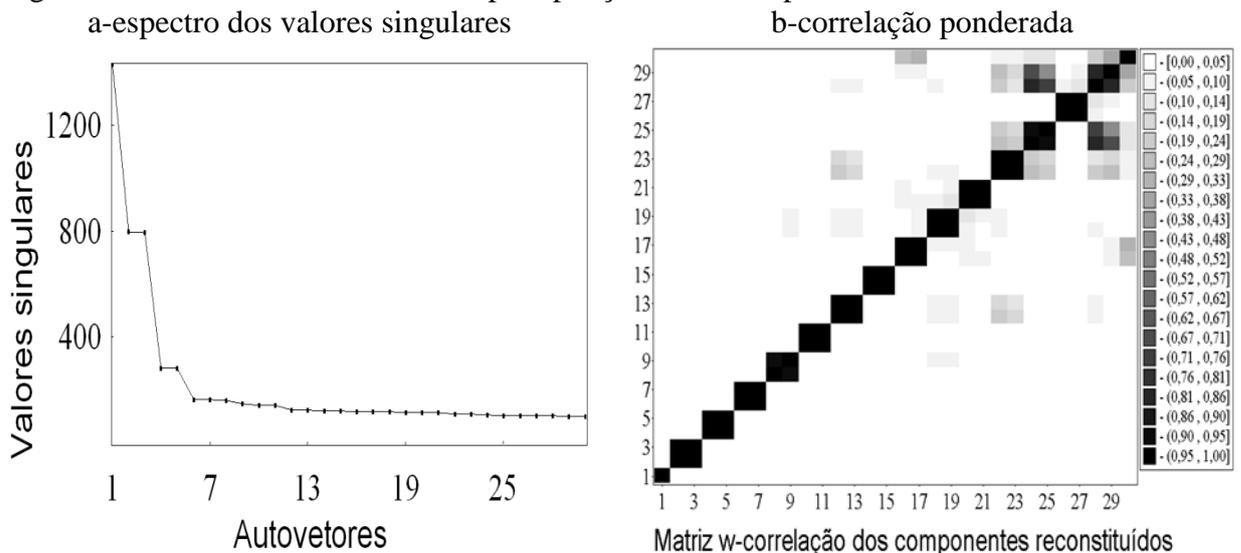
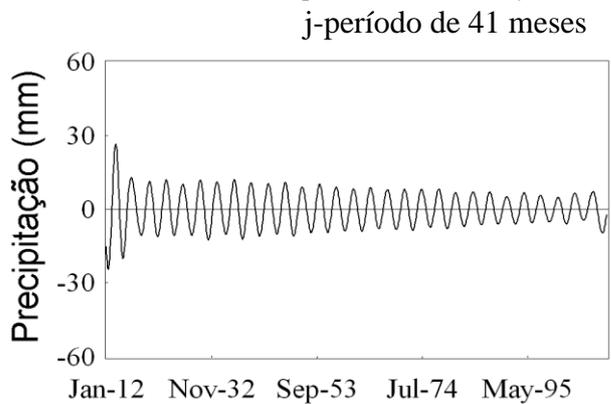
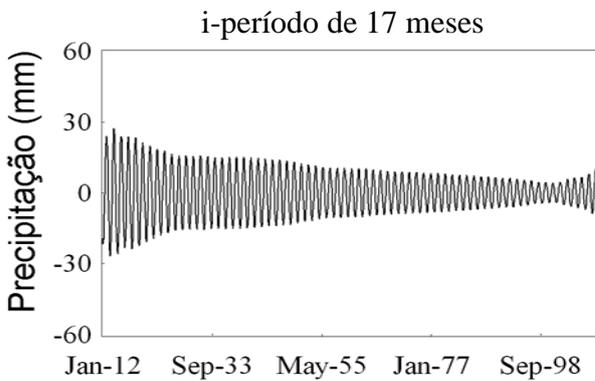
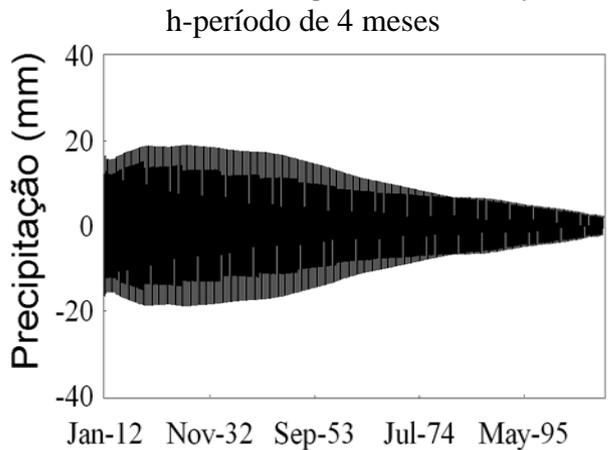
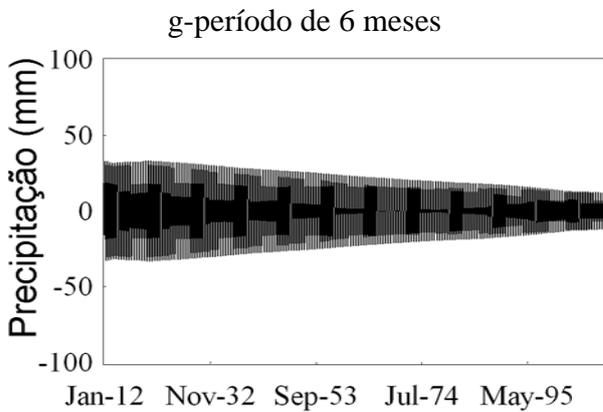
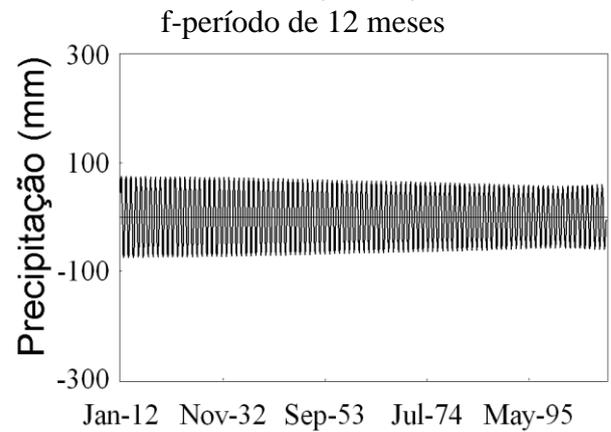
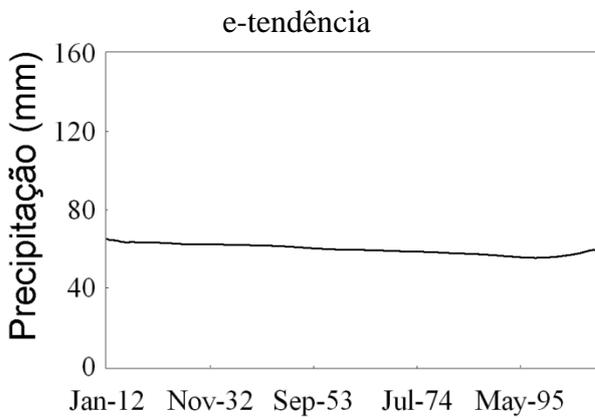
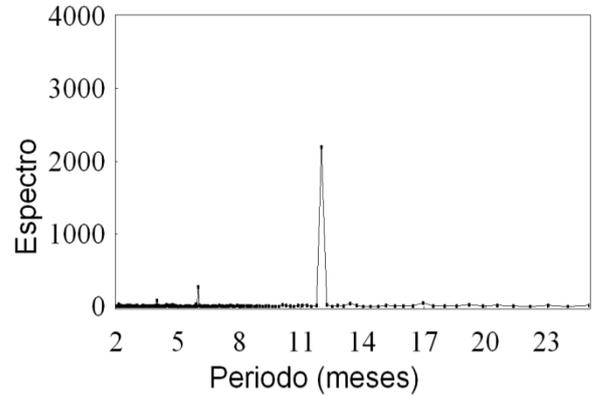
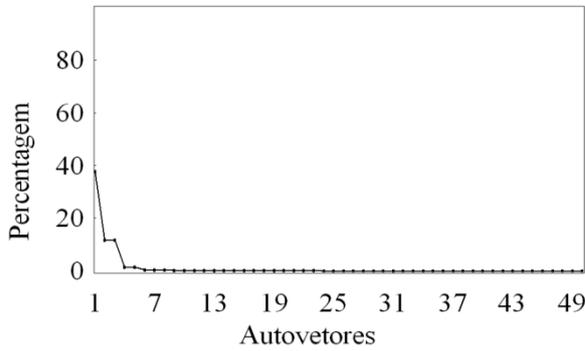
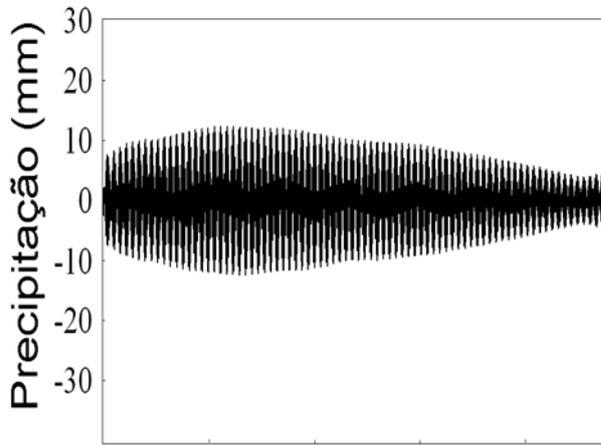


Figura 17- Características da série de precipitação do município de Flores. continuação
 c-percentagem d-periodograma

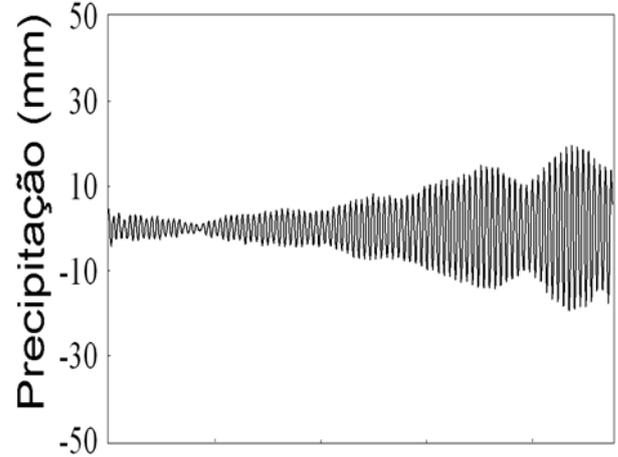


continua

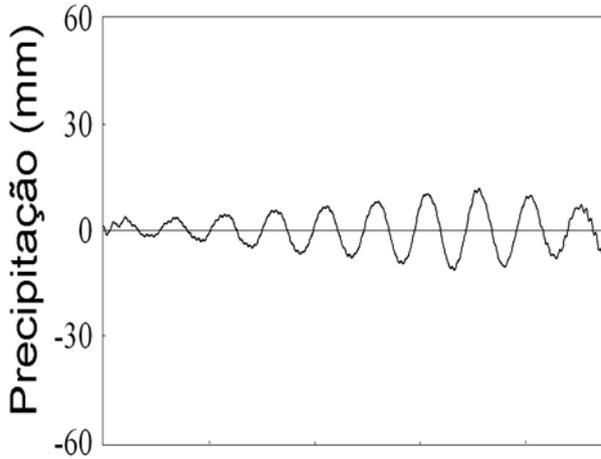
Figura 17- Características da série de precipitação do município de Flores continuação
 l-período de 2 meses m-período de 13 meses



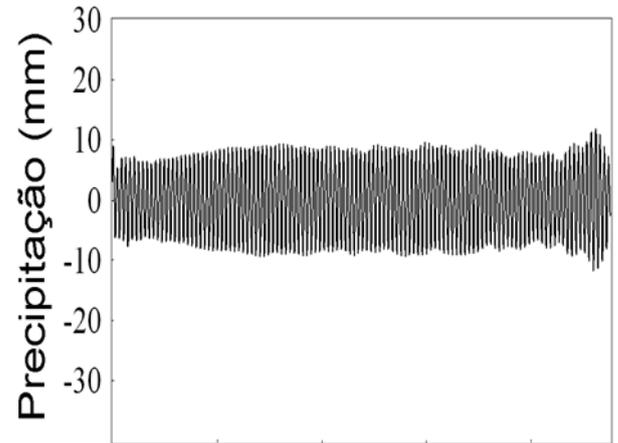
Jan-12 Nov-32 Sep-53 Jul-74 May-95
 m-período de 123 meses



Jan-12 Nov-32 Sep-53 Jul-74 May-95
 n-período de 10 meses

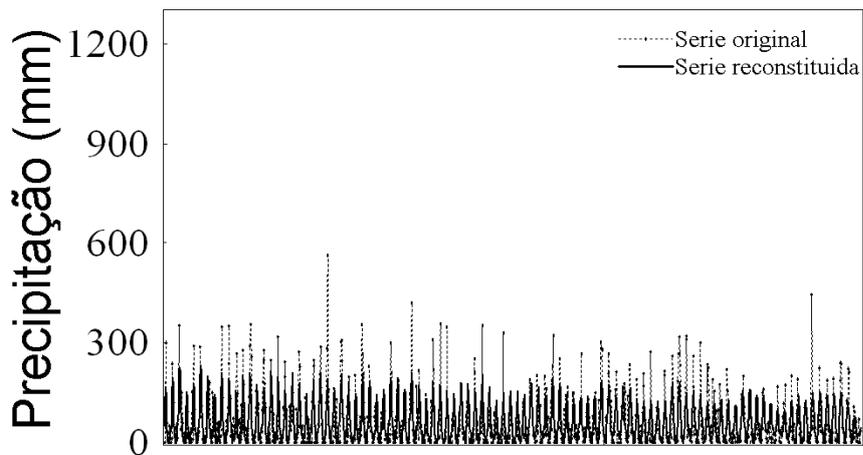


Jan-12 Nov-32 Sep-53 Jul-74 May-95



Jan-12 Nov-32 Sep-53 Jul-74 May-95

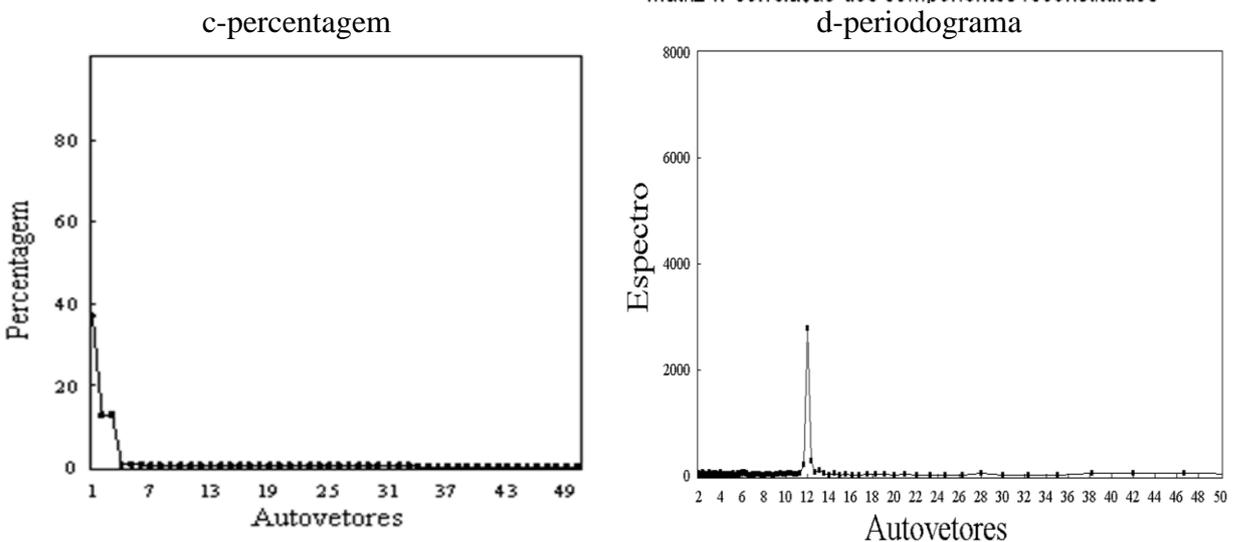
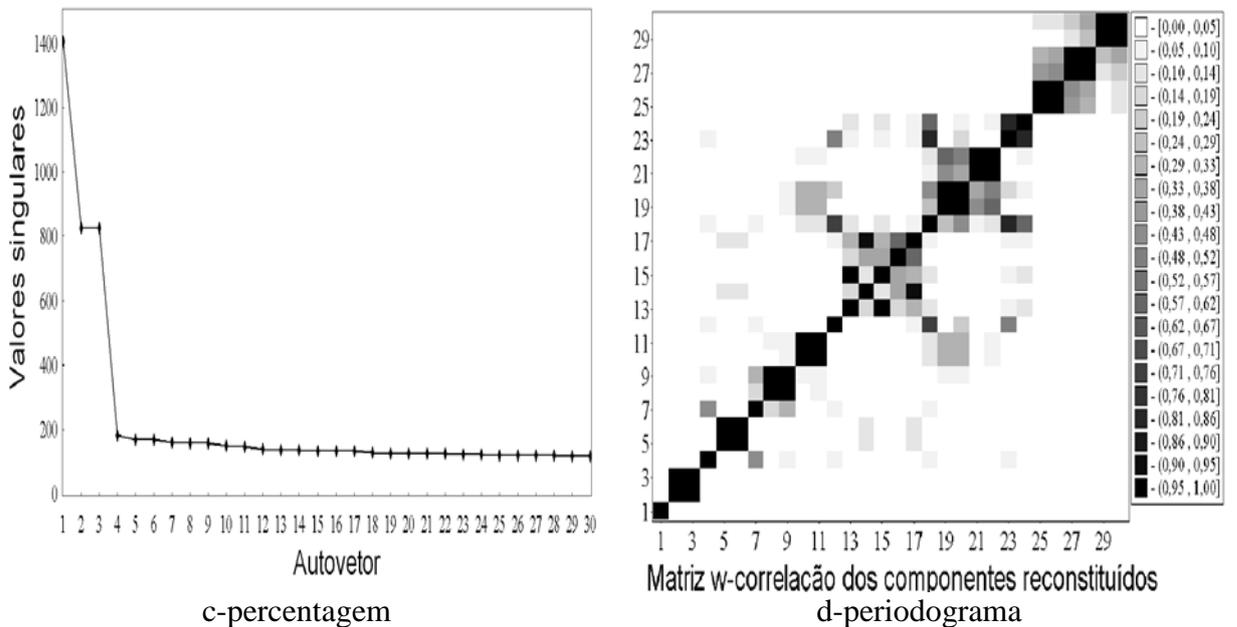
p-série reconstituída mais original



Jan-12 Nov-32 Sep-53 Jul-74 May-95

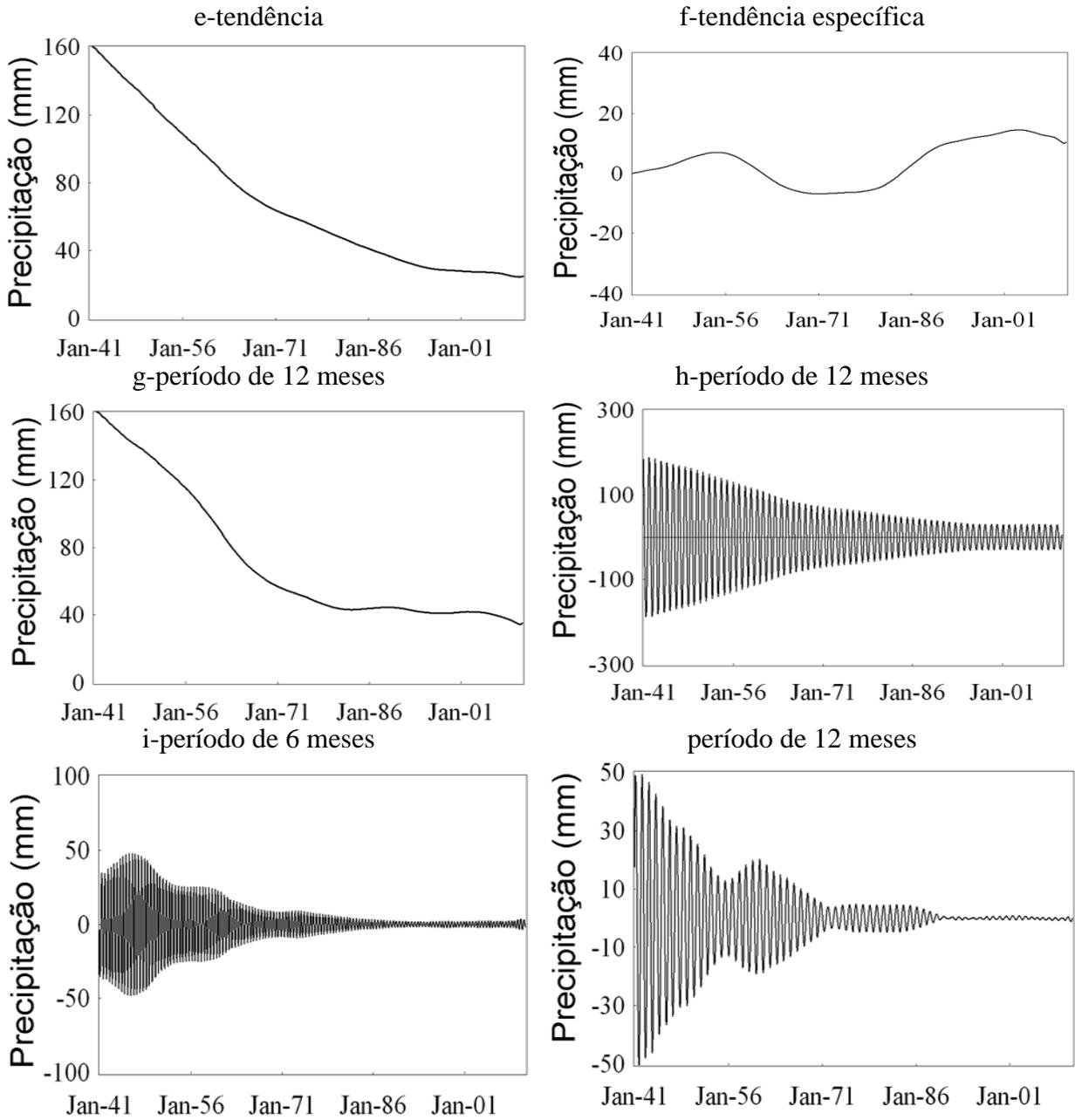
Em Santa Maria da Boa Vista (840015) a precipitação mostrou tendência negativa nos 60 anos de dados (N=840). A decomposição da série revelou que há vários autovetores que correspondem a tendência, principalmente nos primeiros 20, como mostra Figura 18b. Os autovetores que condizem com a tendência são: um, quatro, sete, 12, 13, 14, 15, 16, 17 e 18 como mostra o pequeno bloco formado pelos autovetores de 13 a 18 (Figura 18b). Porém, apenas o primeiro e o quarto foram selecionados como componente de tendência porque os demais mostraram correlação maior do que o limite imposto neste estudo (menor que 0,4). A variabilidade explicada do primeiro autovetor foi de 36,97% e do segundo 0,618%.

Figura 18 - Características da série de precipitação do município de Santa Maria da Boa Vista.
 a-espectro dos valores singulares
 b-correlação ponderada

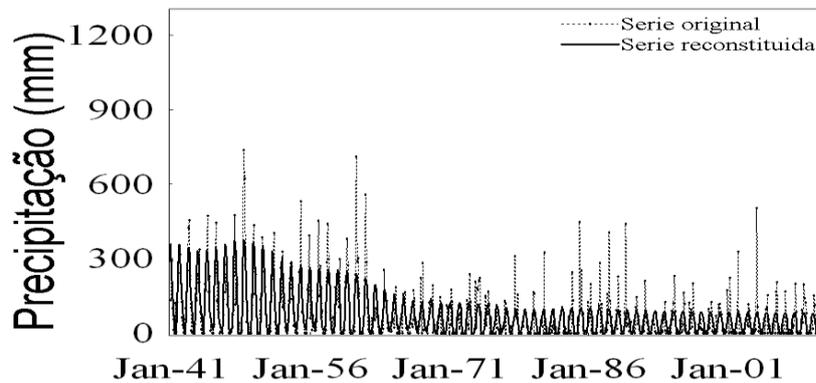


continua

Figura 18- Características da série de precipitação do município de Santa Maria da Boa Vista. continuação



l-série original mais reconstituída



O principal modo oscilatório dessa série foi o de 12 meses como mostra o gráfico do periodograma (Figura 18d). A Figura 18c de percentagem indica que esse período explica 25,5% da variação dos dados originais. Outro modo oscilatório de 12 meses também compõe o sinal da série (Figura 18l). Também foi selecionado como parte do sinal da série, o modo com seis meses (par 5-6) (Figura 18j) que mostra o decaimento da precipitação após 1947 e mais acentuado ainda depois de 1965. Já na década de 80 praticamente esse modo oscilatório já não contribui para a precipitação em Santa Maria da Boa Vista. O modo oscilatório de 13 meses (Figura 18m) também mostra essa diminuição desde 1943 aproximadamente.

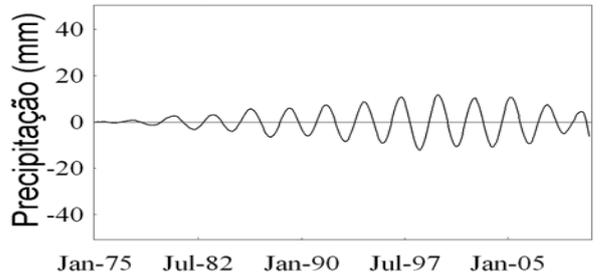
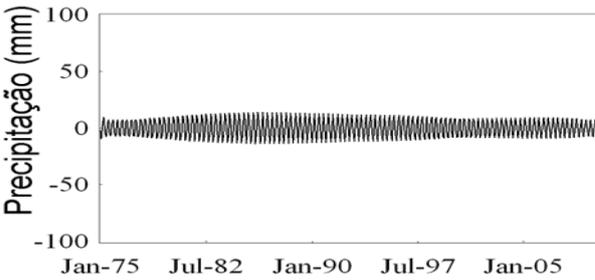
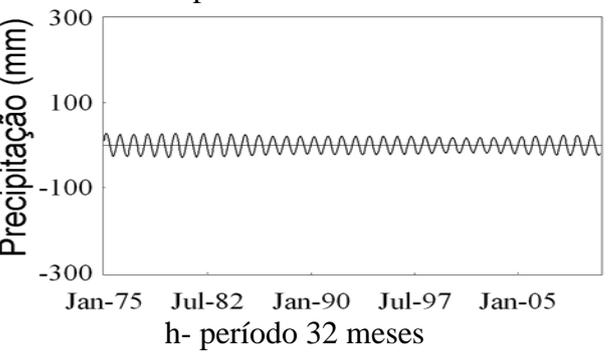
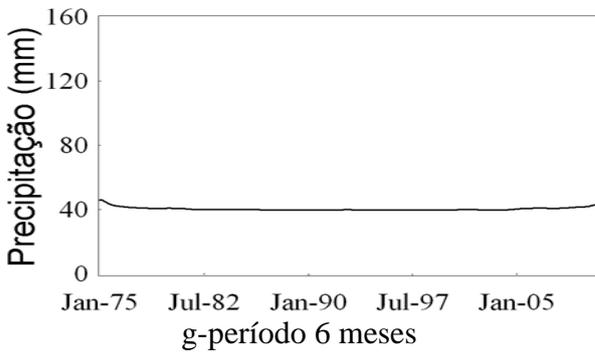
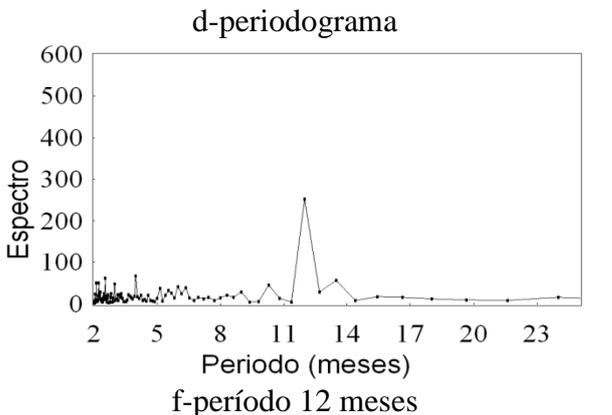
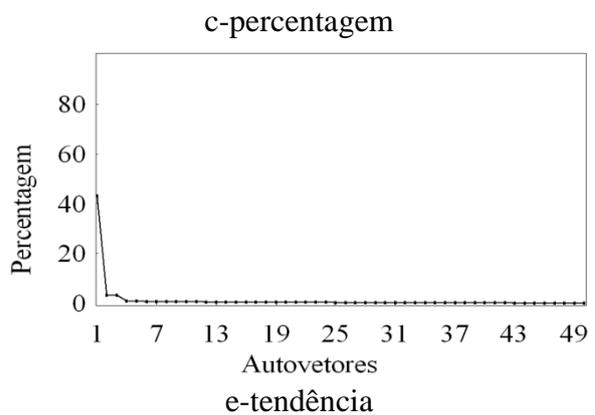
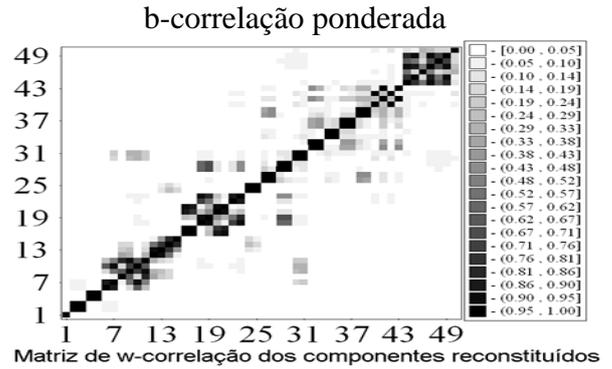
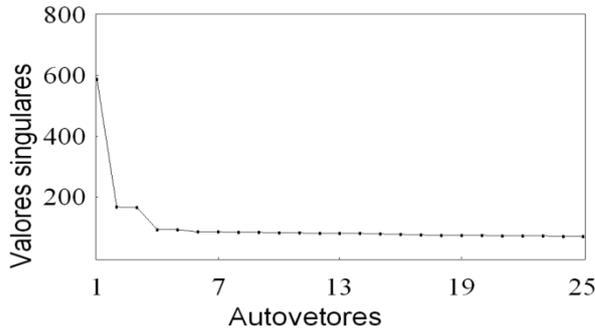
Como mostram os gráficos dos modos oscilatórios, todos eles, apresentaram enfraquecimento, principalmente, após a década de 50, exceção foi observada com o segundo período de 12 meses representado pelos autovetores 8-9 (Figura 18l). Como o principal modo oscilatório (Figura 18i) mostra diminuição bem acentuada da precipitação, a tendência negativa da precipitação foi mais destacada, de todas as estações analisadas, na bacia do rio São Francisco.

A tendência equivalente ao autovetor sete revela que a mesma foi produzida por uma oscilação de 420 meses (trinta e cinco anos) e ainda foi influenciada por outra oscilação com período de dois meses. No entanto, esse autovetor não foi incluído na reconstituição da série, porque ele apresentou correlação maior que 0,4 com um autovetor de periodicidade.

A Figura 19 representa o resultado da decomposição em valores singulares e seus principais componentes de tendência e de modos oscilatórios que foram selecionados para compor o sinal da série do município de Delmiro Gouvêia (937013). Essa série mostrou-se um pouco diferente daquelas do Submédio São Francisco. A oscilação com escala maior foi de dois anos e seis meses (Figura 19f). O componente de tendência, autovetor um, na Figura 19e, explicou uma variação maior da precipitação em relação as demais séries da região do Submédio São Francisco, cerca de 43,3%. A série reconstituída (Figura 19i) representou 53,9% da variabilidade dos dados originais.

O primeiro periódico da escala sazonal, o de 12 meses (Figura 19f), por sua vez, explicou também uma variabilidade muito menor quando comparada com as outras estações da região do SMSF, apenas 7%. Já a variação da precipitação que o modo oscilatório de seis meses (Figura 19g) explicou foi maior quando comparada com as demais estações da mesma região, 2,17% dos dados originais. Para os demais modos oscilatórios o mesmo foi observado.

Figura 19 - Características da série de precipitação do município de Delmiro Gouvêia.
 a-espectro dos valores singulares b-correlação ponderada



i-série original mais reconstituída

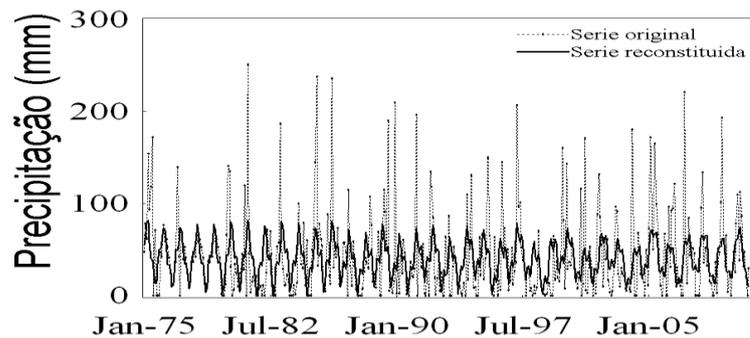


Tabela 3 – Oscilações dominantes presentes nas séries de precipitação do Submédio São Francisco. Os períodos estão em ordem de importância.

Município	Estado	Código	Comprimento da série (meses)	Comprimento da janela (meses)	Oscilações dominantes (período em meses)
Afogados Ingazeira	PE	737023	1164	564	12, 6, 4, 12, 17, 40, 6, 5
Flores	PE	737027	1188	576	12, 6, 4, 17, 41, 2, 13, 122, 9, 29
Serra Talhada	PE	838031	432	216	12, 6, 14, 2, 6
Floresta	PE	838000	912	456	12, 6, 3, 4, 3, 2
Floresta	PE	838021	432	216	12, 4, 2, 2
Belém de São Francisco	PE	838004	768	384	12, 4, 27, 4, 2, 127, 4
Mirandiba	PE	838002	576	288	12, 6, 4, 3, 6, 6, 144, 9,2
Parnamirim	PE	839009	576	288	12, 2, 4
Parnamirim	PE	839014	576	288	12, 6, 57, 3, 4
Santa Maria da Boa Vista	PE	840010	576	288	12, 72, 4, 3, 6, 3, 17
Santa Maria da Boa Vista	PE	840015	840	420	12, 6, 12, 13
Abaré	PE	839031	432	216	12, 6
Curuçá	BA	939017	432	216	12, 3, 72, 4, 6, 2, 2, 27
Juazeiro	BA	940018	432	216	12, 6, 21, 4, 2
Juazeiro	BA	940024	1024	504	12, 4, 3, 5, 6, 3, 2, 2, 3, 2, 5
Juazeiro	BA	940025	432	216	12, 6, 4, 2, 3,3
Juazeiro	BA	940028	432	216	12, 4, 6, 3, 3, 5,4
Delmiro Gouvêia	AL	937013	432	216	12, 4, 31, 6, 3

4.5s.1.4 Baixo São Francisco

A série de precipitação do município de Pão de Açúcar (código 937018) tem comprimento de 76 anos ($N=912$ meses) e o comprimento da janela foi escolhido com 38 anos ($L=456$ meses). Isso produziu 457 autovetores, dos quais apenas três foram escolhidos como sinal da série. O primeiro autovetor como sempre correspondeu ao componente de tendência (Figura 20e). O par 2-3 diz respeito ao período de 12 meses (Figura 20f). A série reconstituída explica a variação da precipitação da série original de apenas 54,89% (Figura 20g), destes 44,95% foi atribuída ao componente de tendência e apenas 9,96% ao período de 12 meses (Figura 20c).

O gráfico de correlação ponderada (Figura 20b) indica que a partir do autovetor seis os mesmos se correlacionam informando que não há uma separabilidade fraca entre os autovetores e assim dando origem ao grupo considerado como ruído. Portanto, apenas o autovetor um e aquele que deu origem ao período de 12 meses (par 2-3) foram considerados como sinal da dinâmica básica, que causaram precipitação em Pão de Açúcar, ou seja, que não induziu precipitação eventualmente.

A fase positiva da oscilação de 12 meses ocorreu principalmente entre março e julho, sendo os três meses que fase positiva atuou foram abril, maio e junho, em maio principalmente. Apontando que o principal sistema que atua nesse município contribui com a precipitação nesses meses que são os da estação chuvosa do município de Pão de Açúcar. A fase negativa ocorreu em novembro, dezembro e janeiro coincidindo com a estação seca desse município.

Figura 20 - Características da série de precipitação do município de Pão de Açúcar.
a-espectro dos autovalores

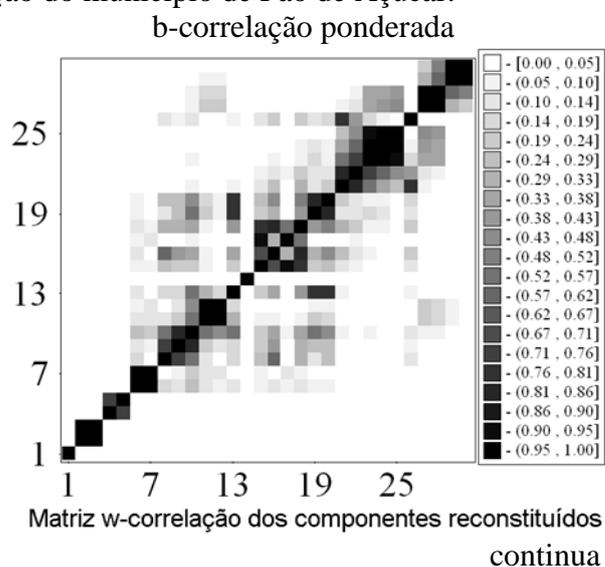
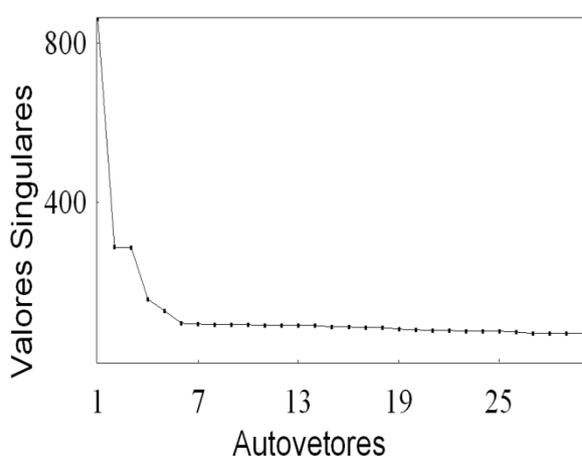
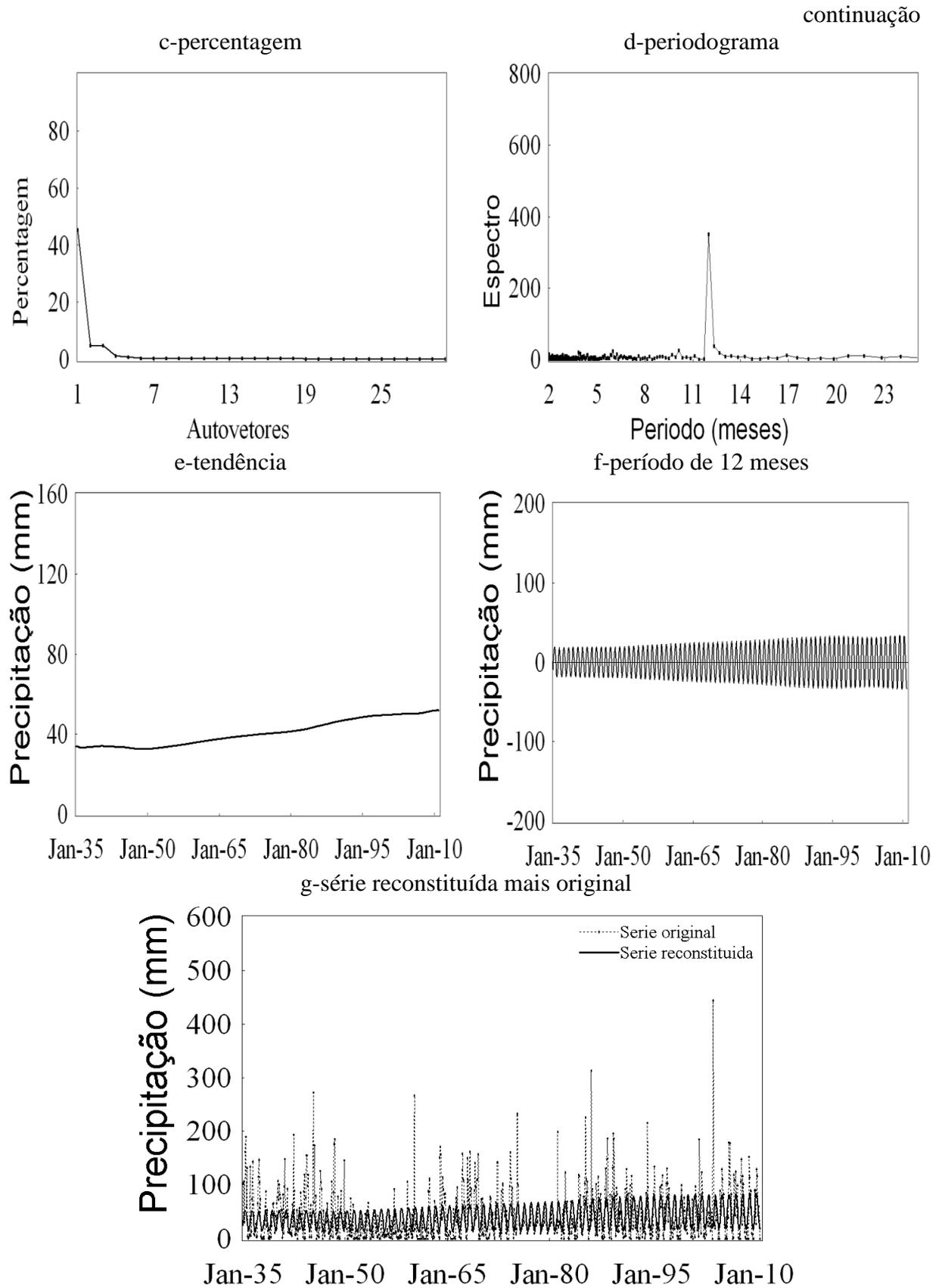


Figura 20- Características da série de precipitação do município de Pão de Açúcar.



A Figura 21 retrata as características da série de Piranhas (937023). Por meio do espectro dos valores singulares (Figura 21a) são observados nitidamente apenas o autovetor da tendência (autovetor um), da periodicidade de 12 meses (par 2-3) e de seis meses (par-4-5).

Figura 21 - Características da série de precipitação do município de Piranha.

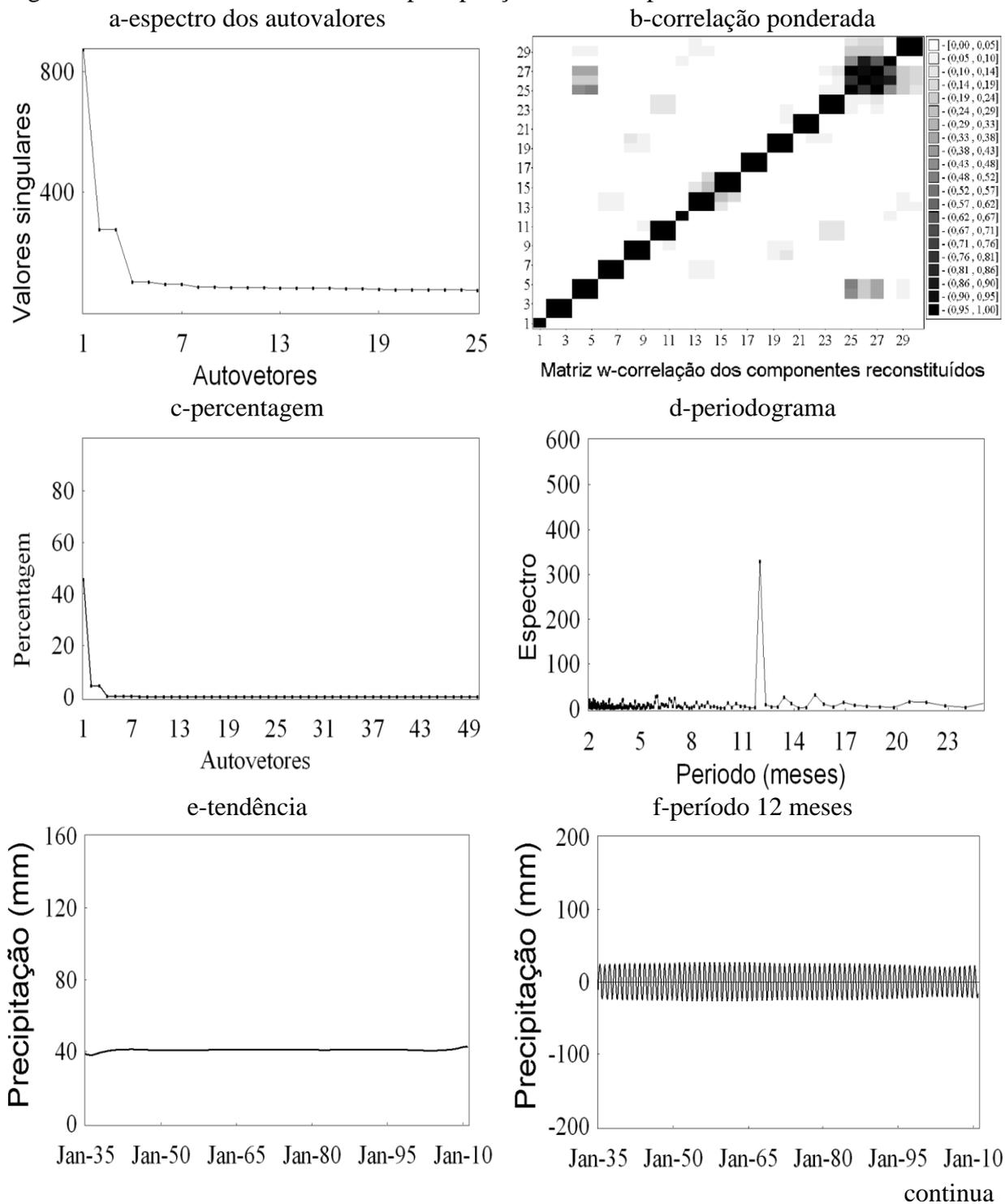
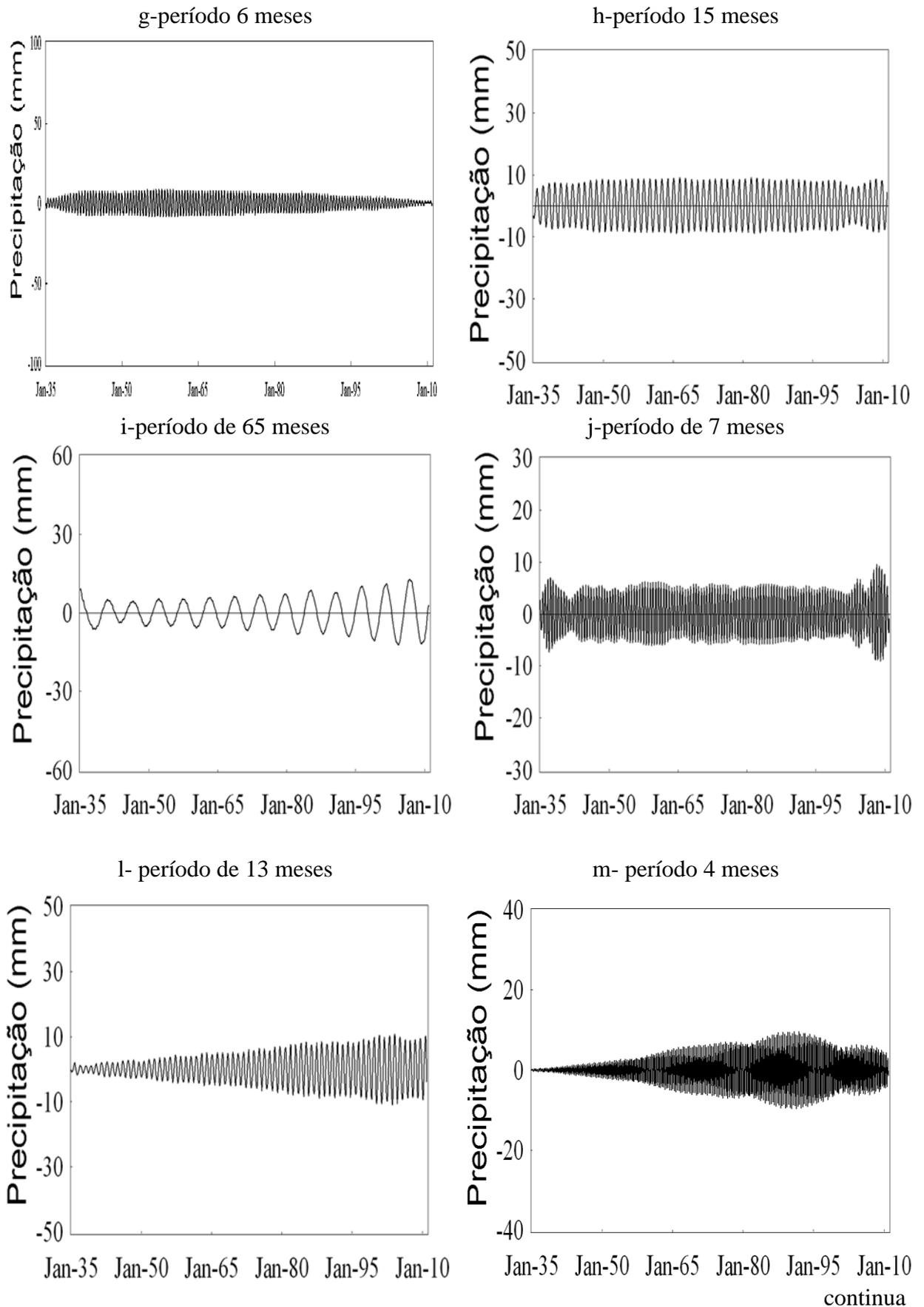
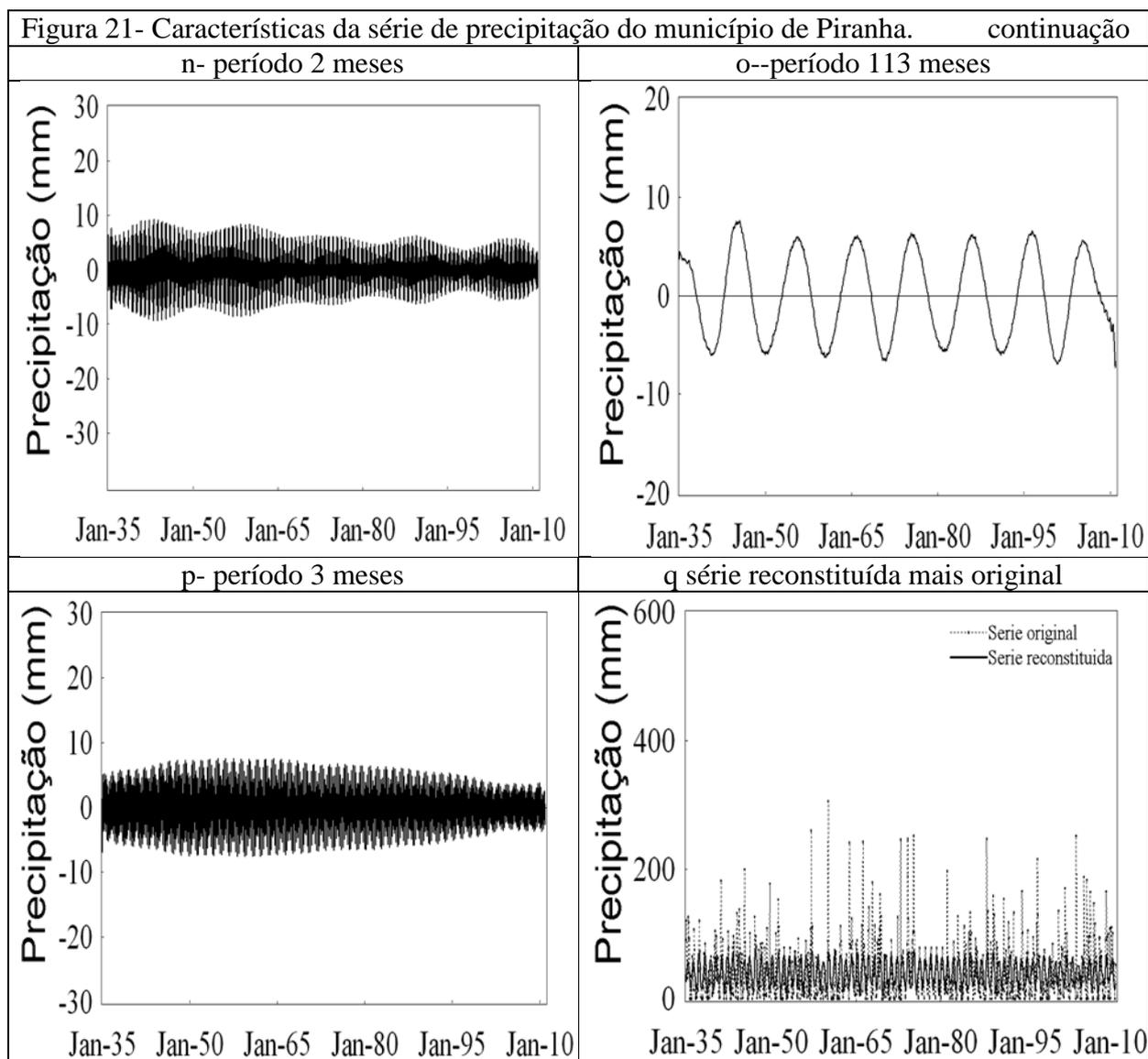


Figura 21- Características da série de precipitação do município de Piranha. continuação



continua



A Figura 21b mostra que grande parte do ruído ficou concentrada a partir do autovetor 35. Dessa forma, foram selecionados dois autovetores correspondentes ao componente de tendência que são o um e o 12 (Figura 21a). O primeiro indica a tendência geral da série que explica 45,5% da variação da precipitação dos dados originais (Figura 21e). O segundo autovetor que a princípio foi escolhido como parte do componente da tendência não foi usado na reconstituição do componente, porque ele não correspondeu às características atribuídas a um componente de tendência como variando lentamente, por exemplo.

A série de Piranhas apresentou modos oscilatórios além da escala sazonal, como de cinco anos e quatro meses (par 8-9) Figura 21i), aproximadamente dez anos (par 19-20) cuja Figura é a 23o e de um ano e dois meses (par 6-7) (Figura 21h). Na escala intrasazonal

além de 12 meses, ainda foram detectados de seis (pares 4-5) (Figuras 21g), sete (par 10-11) (Figura 21j), quatro (par 15-16) (Figura 21m), dois meses (par 17-18) (Figura 21n) e três meses (par 21-22) (Figura 21p). Os modos oscilatórios praticamente não apresentaram decréscimos em suas amplitudes representam 17% da variação dos dados originais com mais a variância explicada pelo componente de tendência a série de Pinhas foi reconstituída com 62,4%.

Como pode ser examinado na Figura 21d, que apresenta o periodograma da série de precipitação do município de Piranha para os 30 primeiros autovetores, a série de precipitação foi constituída por modos oscilatórios das escalas intrasazonal, interanual e decadal, sendo que, o terceiro e quarto modo oscilatório mais importante que produz precipitação no município é da escala temporal interanual e correspondente a escala temporal do fenômeno El niño.

Nas Tabelas 4 e 5 percebe-se a influência do sinal da escala interanual, com escala temporal do fenômeno El Niño e, decadal nos dados de precipitação no Submédio e Baixo São Francisco que esta de acordo com os estudos de Da Silva (2010) que utilizou análise de ondeletas e verificou que a variação da precipitação nas três sub-regiões da bacia do Mundaú, localizada nos estados de Pernambuco e Alagoas, foi definida por multi-escalas temporais e que a variância significativa ocorreu na escala decadal. Este estudo também condiz com o de Souza e Da Silva (2013) e Da Silva (2013) que detectaram modos oscilatórios nas escalas compatíveis com a escala interanual, do ciclo do fenômeno El Niño e da escala decadal, para a bacia do rio Jaguaribe (no Ceará) e para o estado do Ceará, respectivamente.

A separação do sinal das séries de precipitação daquele do ruído via análise espectral singular dá indicativo que a grande variabilidade de precipitação observada entre as subáreas da bacia hidrográfica do São Francisco foram decorrentes das escalas temporal predominantes das oscilações. A maior quantidade de precipitação recebida na parte alta da bacia pode ser explicada por maior número de oscilações intrasazonal atuarem nessa região e, também devido a oscilações maiores do que a escala sazonal terem menor ciclo quando comparado com as demais regiões da bacia. Situação contrária a do ASF foi verificada no Submédio. As séries de precipitação dessa região revelaram que oscilações acima da escala intrasazonal são mais frequentes no sinal da série.

Houve alguns casos, como na estação de Pão de Açúcar, por exemplo, em que os autovetores não indicaram claramente se faziam parte do componente de tendência ou dos

periódicos. Também houve casos em que um autovetor mostrava que pertencia ao componente de tendência, no entanto, apresentava alta correlação com algum autovetor que integrava o par de algum modo oscilatório. Esses casos foram mais frequentes nas regiões do Submédio e Baixo São Francisco. Segundo Golyandina et al.(2001) quando o comprimento da janela é grande e a série apresenta estrutura complexa, alguns autovetores de tendência pode se misturar com outros autovetores da série.

Tabela 4 – Oscilações dominantes presentes nas séries de precipitação do Baixo São Francisco. Os períodos estão em ordem de importância

Município	Estado	Código	Comprimento da série (meses)	Comprimento da janela (meses)	Oscilações dominantes (período em meses)
Pão de Açúcar	AL	937018	912	456	12
Piranhas	AL	937023	912	456	12, 6, 14, 6, 13, 4, 2, 114, 2, 8

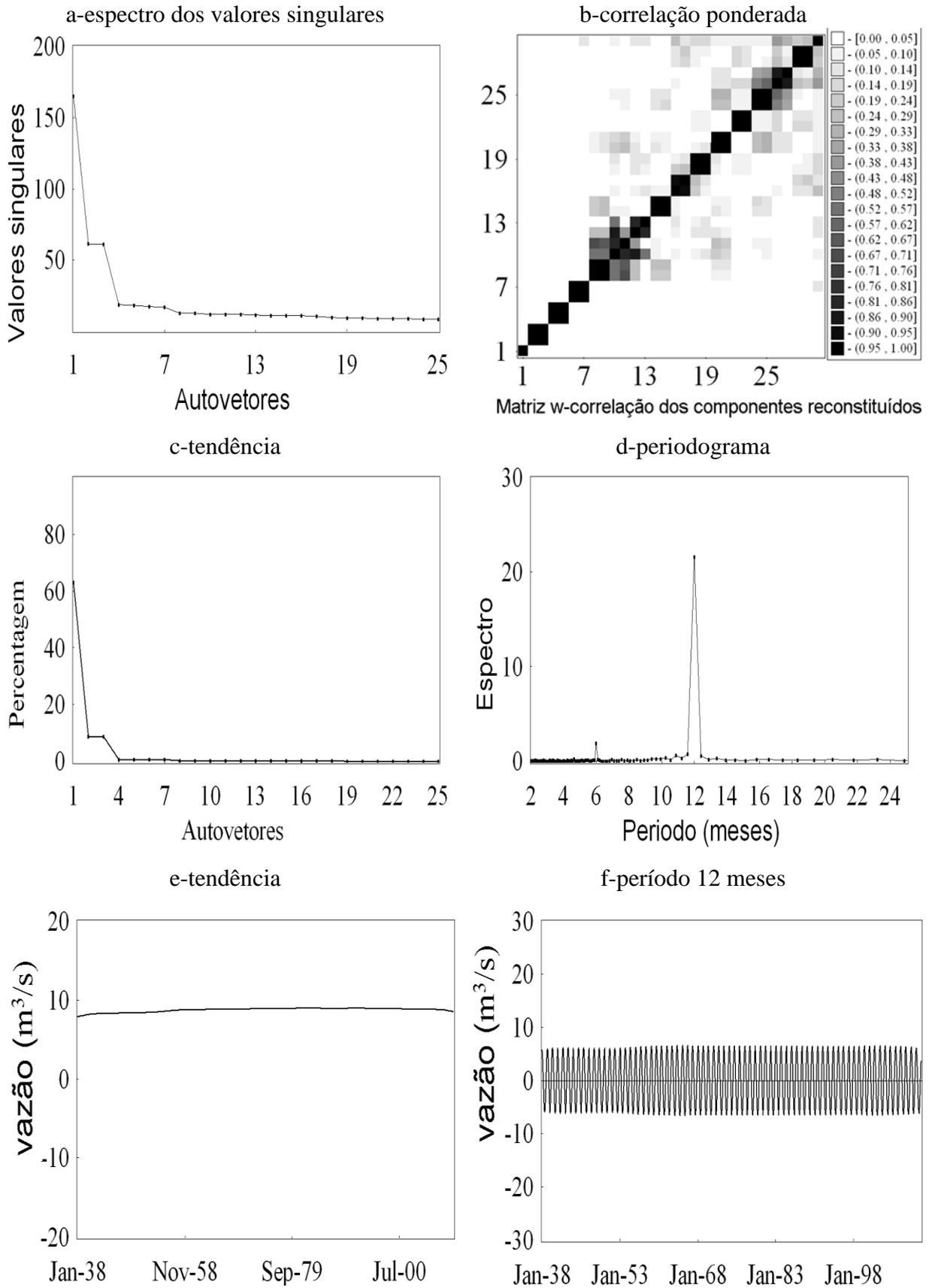
4.3.2 Vazão

4.3.2.1 Alto São Francisco

A Figura 22 mostrou-se as principais características da estrutura temporal da série de vazão para o município de Vargem Bonita (código 4002500). O primeiro autovetor (Figura 24a) representa a tendência geral da vazão, a qual foi positiva e, explica 62,2% (Figura 22c) da variação da vazão dos dados originais. Na Figura 24a notam-se com nitidez três pares de autovetores correspondentes aos modos oscilatórios da série, os quais são: os pares 2-3 (Figura 22f) que indica uma oscilação com período de 12 meses, par 4-5 (Figura 22g) atribuído ao período de seis meses e par 6-7 (Figura 22h) com um período de 110 meses (aproximadamente nove anos).

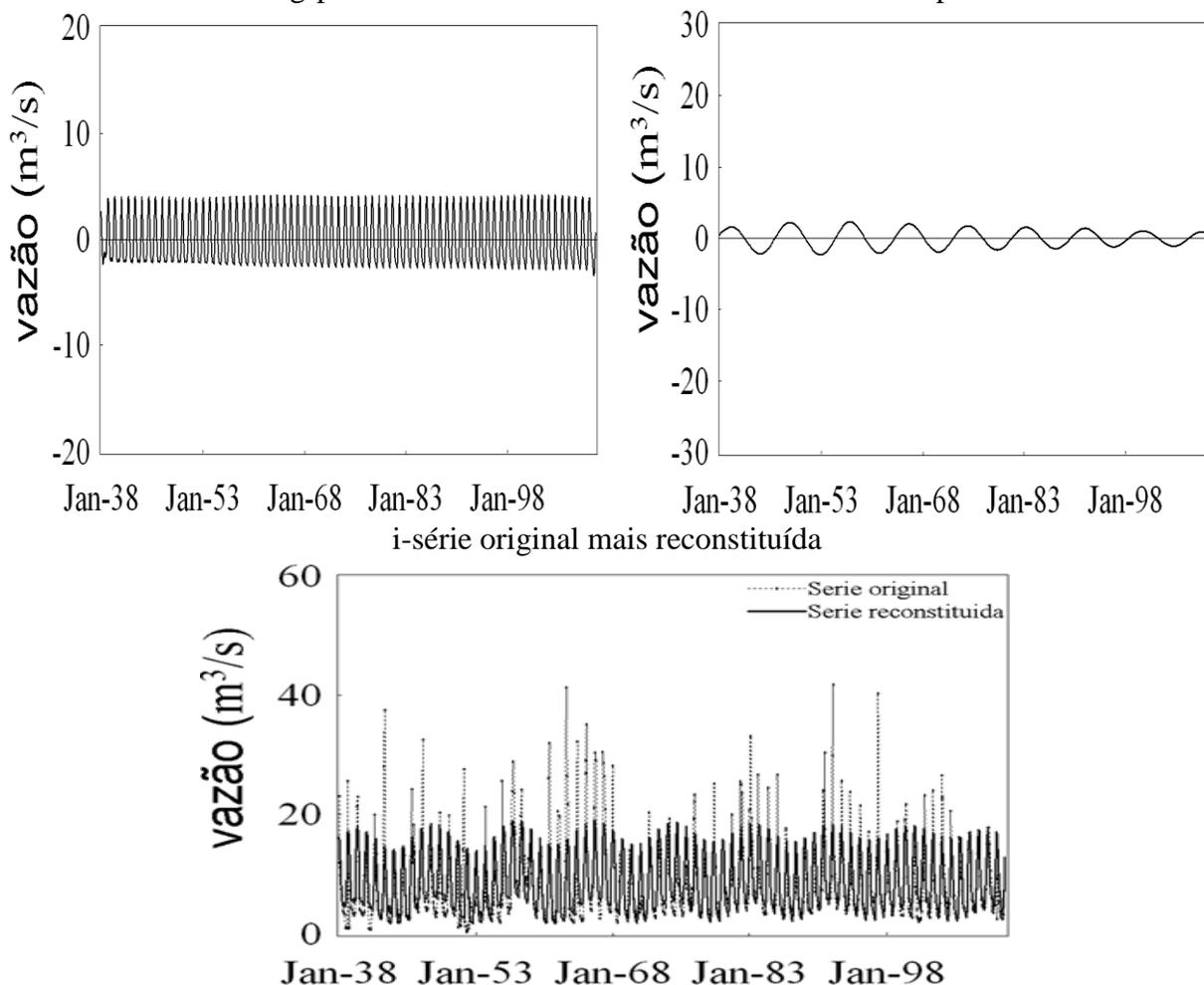
Na Figura 22b percebe-se que o autovetor um, está fortemente correlacionado consigo mesmo e, praticamente não correlacionado com os demais autovetores da matriz. O par de autovetor 2-3 está altamente correlacionado entre si e consigo mesmo e sem correlação com os demais. O mesmo é constatado para o par 6-7. Dessa forma, esses cinco autovetores indicam a dinâmica base da vazão do município de Vargem Bonita que sofre influência da escala intrasazonal, mas foi modulada pela escala quase decadal como pode ser observada na Figura 22i que mostra a série reconstituída com 83,4% da variabilidade original dos dados.

Figura 22 - Características da série de vazão do município de Vargem Bonita.



continua

Figura 22- Características da série de vazão do município de Vagem Bonita. continuação
g-período 6 meses h-período 6 meses



No município de Várzea da Palma (código 41990000) as principais periodicidades e tendência que compõem o sinal da série da vazão estão dispostas na Figura 23. As principais periodicidades são aquelas de 12 (Figura 23f) e seis meses (Figura 23g) como mostra o periodograma (Figura 23d). Esses períodos são reconstituídos por meio dos autovetores 2-3 e 4-5. Esse município expõe vazão com tendência negativa. Portanto, apenas oscilação de escala intrasazonal compõe o sinal da série de vazão desse município.

Os dois grupos que compõem o sinal da série (componentes de tendência e oscilação) propiciaram que a série fosse reconstituída com 75,2% da variabilidade original da série de vazão (Figura 23h), sendo que, 49,49% são atribuídos ao componente de tendência e 26,94% aos oscilatórios.

Figura 23 - Características da série de vazão do município de Várzea da Palma..

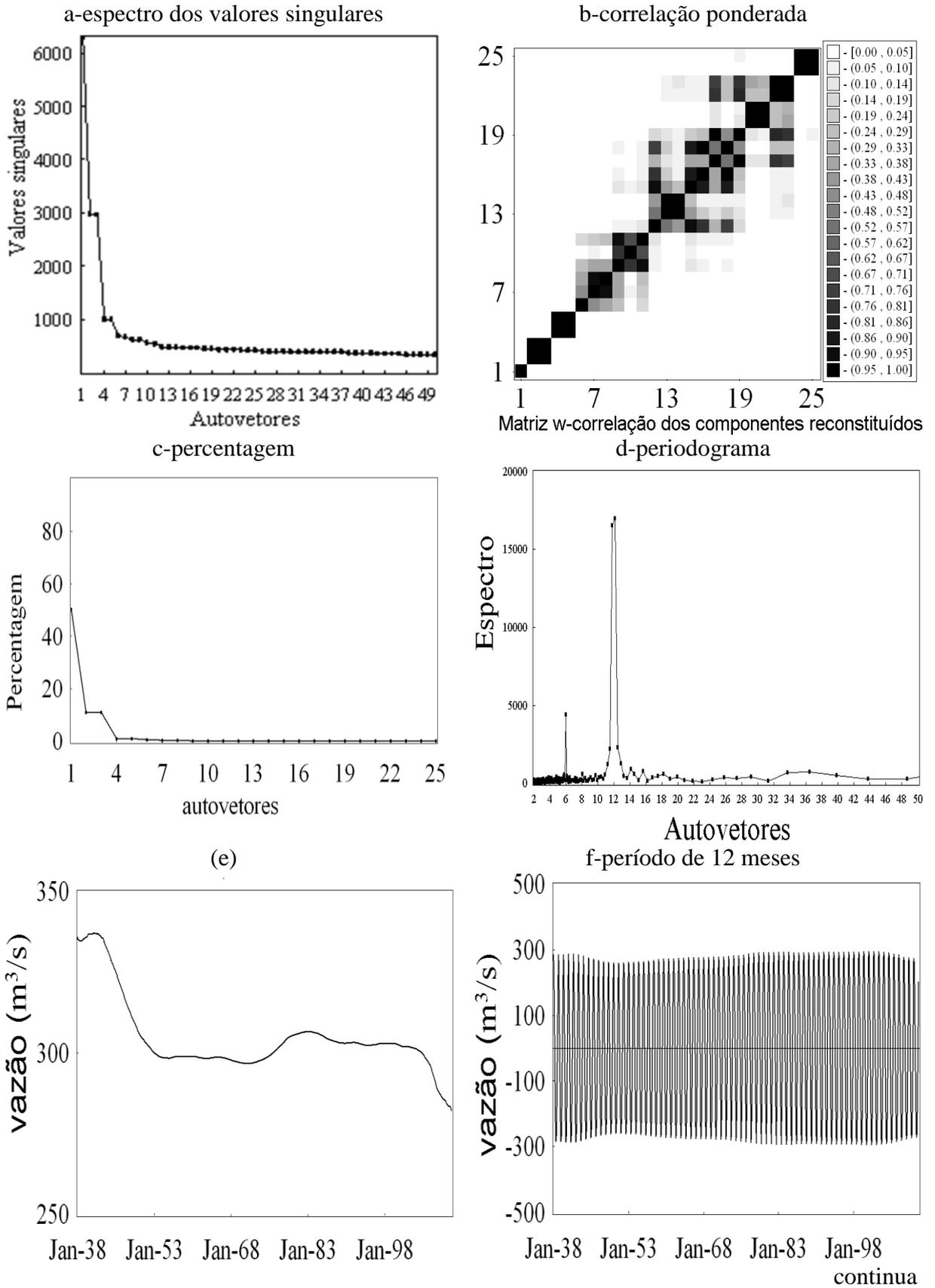
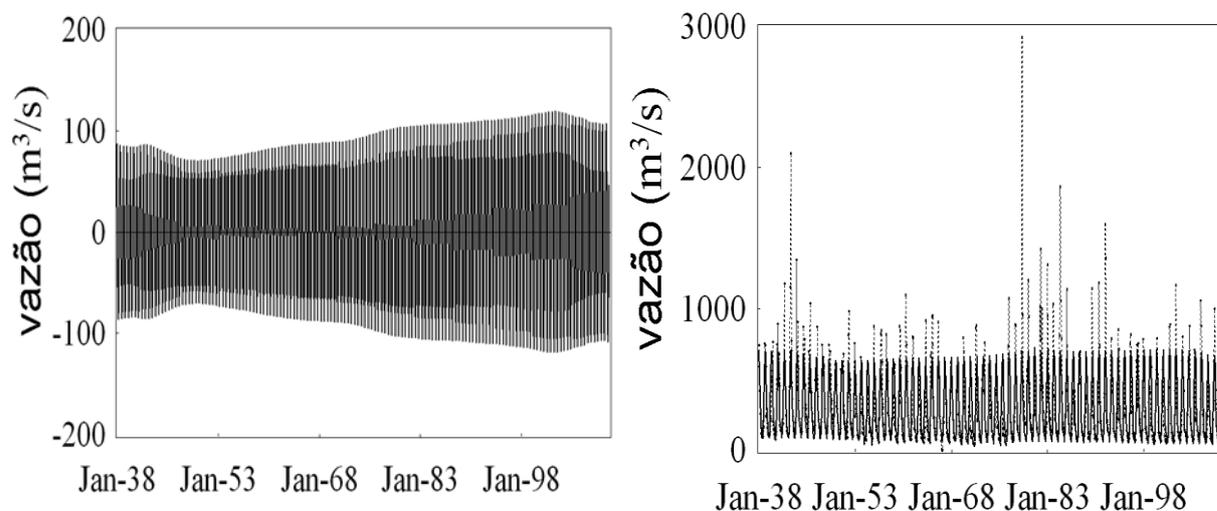


Figura 23- Características da série de vazão do município de Várzea da Palma. continuação
g-período de 6 meses h-série reconstituída



4.3.2.2 Médio São Francisco

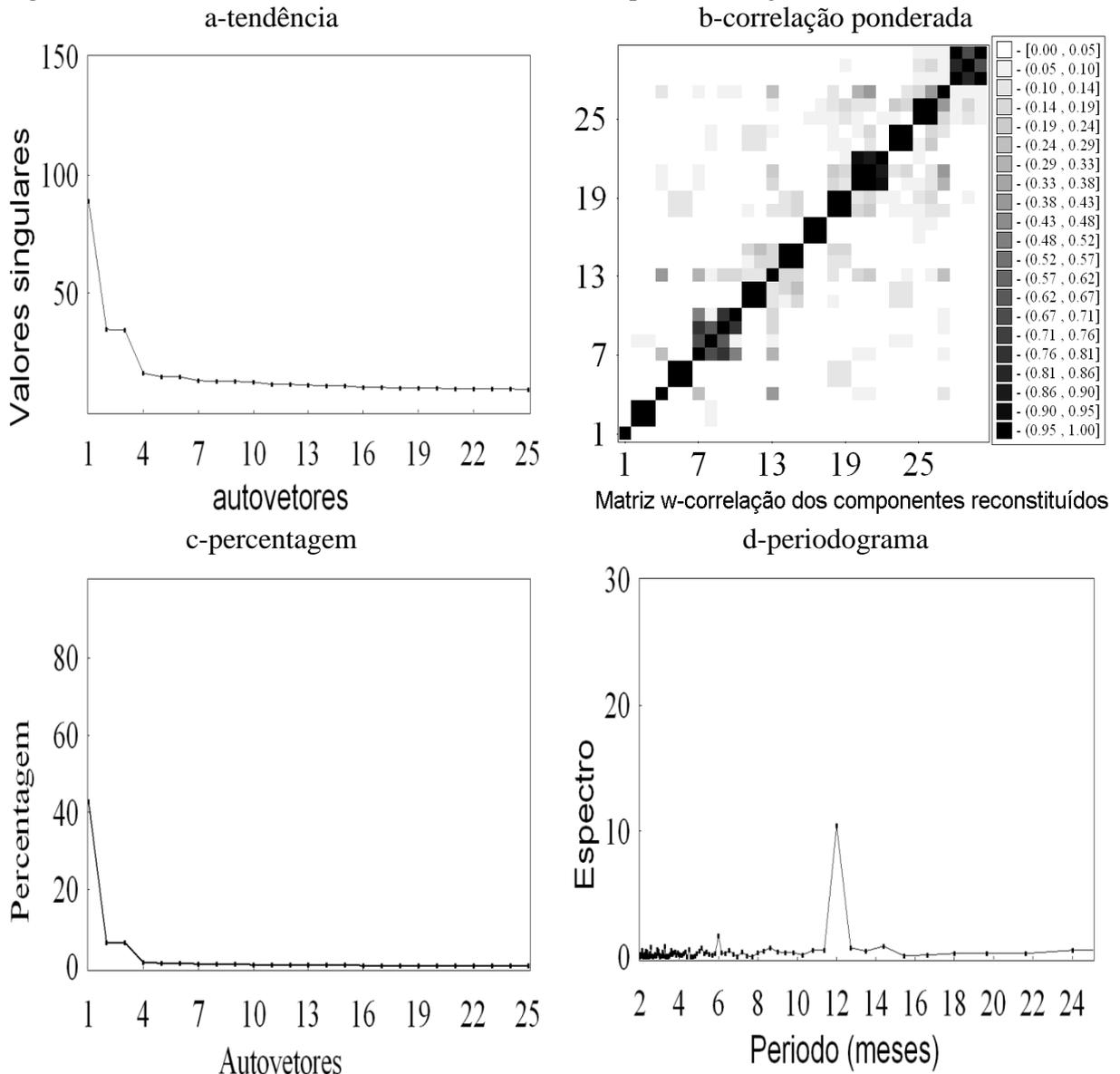
Os gráficos os quais compõem a estrutura temporal da série de vazão do município de Coração de Jesus (código 42187000) estão dispostos na Figura 24. Por meio da Figura 24a que mostra o espectro dos autovetores, percebe-se que o autovetor um, que tem maior valor singular absoluto, corresponde ao componente de tendência da série. Outro autovetor isolado na referida Figura é o autovetor quatro, o qual indica uma tendência específica da vazão.

Logo em seguida percebe-se um par de autovetores (2-3) com valores singulares aproximadamente iguais, que reconstituído dá origem a um período de 12 meses (Figura 24f). Um segundo par de autovetores, com valores singulares próximos, também é notado na Figura 29a o qual indica um modo oscilatório de seis meses (Figura 24g). A Figura 24d indica que os dois principais períodos que causam variação na vazão do município de Coração de Jesus são os dois citados acima. Porém, há uma oscilação de três meses (Figura 24i) que também compõe o sinal da série de vazão de Coração de Jesus.

A Figura 24b mostra que do sétimo autovetor ao 229 forma um grande bloco de autovetores correlacionados uns com os outros com exceção dos autovetores 16 e 17, indicando que eles não são separáveis. Dessa forma, esses autovetores formam um único componente que corresponde ao do ruído da série. Vale salientar, que apesar do autovetores quatro está no grupo do sinal da série, ele não foi escolhido como componente de tendência porque apresentou valor da correlação absoluta superior a 0,4, violando a regra de separabilidade fraca, que é um dos pressupostos do algoritmo empregado.

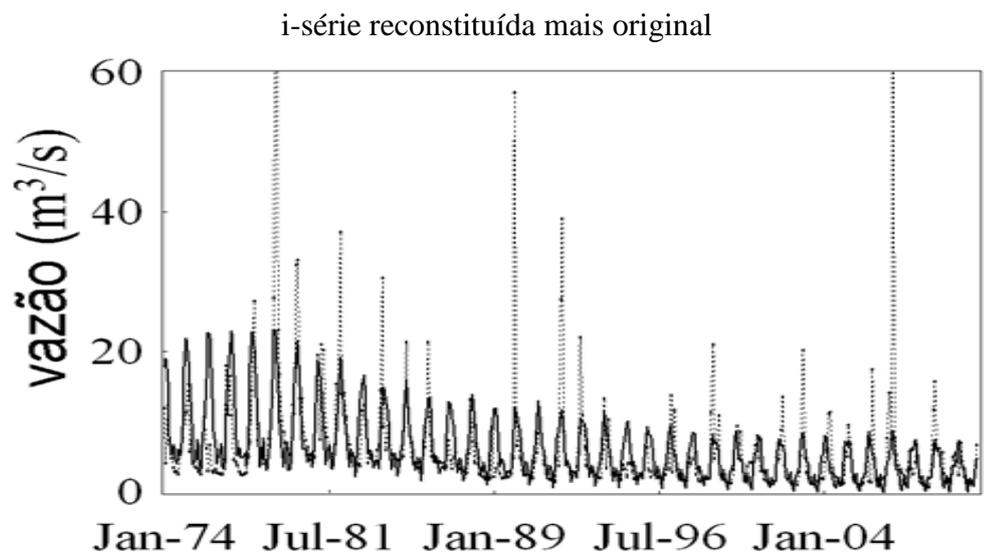
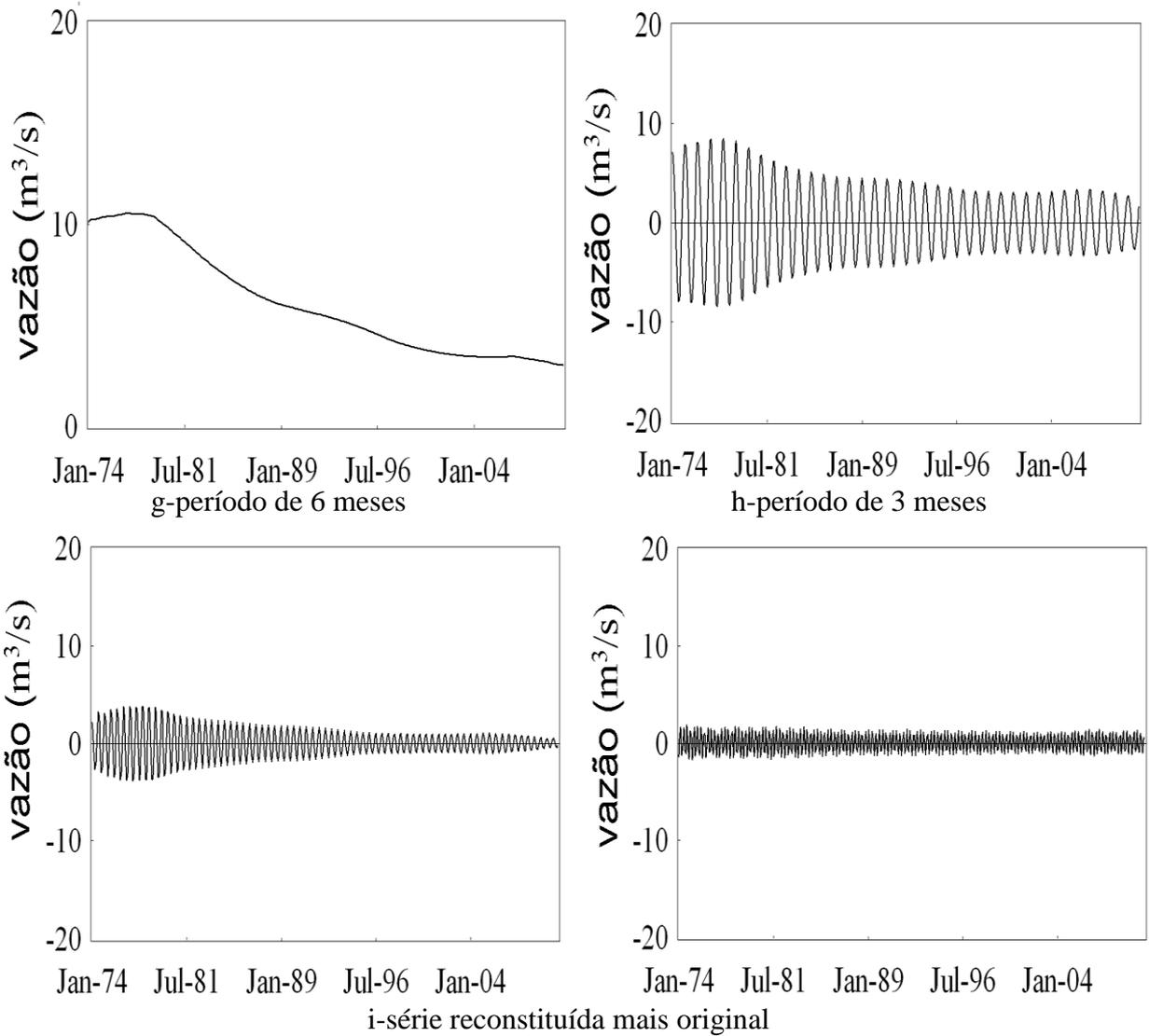
A tendência da série de vazão do município de Coração de Jesus apresentou vazão decrescente a partir de 1979 que pode ser justificada pela diminuição da intensidade das oscilações com período de doze (Figura 24f) e seis meses (Figura 24g). O sinal da série foi reconstituído com 59,4% da variabilidade dos dados (Figura 24i)

Figura 24- características da série de vazão do município de Coração de Jesus.



continua

Figura 24- Características da série de vazão do município de Coração de Jesus
e-tendência f-período de 12 meses



A estrutura temporal da série de vazão do município de Jaíba (código 44670000) é mostrada na Figura 25. Percebe-se que essa série é muito complexa haja vista que a reconstituição da mesma necessita de vários autovetores. No gráfico do espectro dos autovetores (Figura 25a), percebe-se que a tendência geral da série é representada pelo autovetor um e a específica pelo autovetor 12 que explicaram apenas 20,5% e 0,95 % da variação da vazão original (Figura 25c). E o par de autovetores 2-3 (Figura 25h) indica um modo oscilatório anual que explicou 15% da variabilidade da vazão.

Foi extraído sete modos oscilatórios da escala intrasazonal (Figuras 25h, i, l, m, o, p e q) e três modos da escala interanual um de 13 meses, outro de 89 meses (em torno de 7 anos) e um de 26 meses (aproximadamente dois anos). Desse modo, a escala temporal do fenômeno El Niño esteve presente na variabilidade da vazão no município de Jaíba.

Nesse município a reconstituição desses 10 períodos explicou mais a variação da vazão (29,8%) do que o componente de tendência (21,5%), diferentemente das demais estações da bacia do São Francisco, onde a tendência sempre explicou a maior parte da variabilidade da vazão do que o componente periódico. Portanto, os dois componentes do sinal da série reconstituem um pouco mais do que a metade da variabilidade original da vazão de 51,3%.

Figura 25 - Características da série de vazão do município de Jaíba.

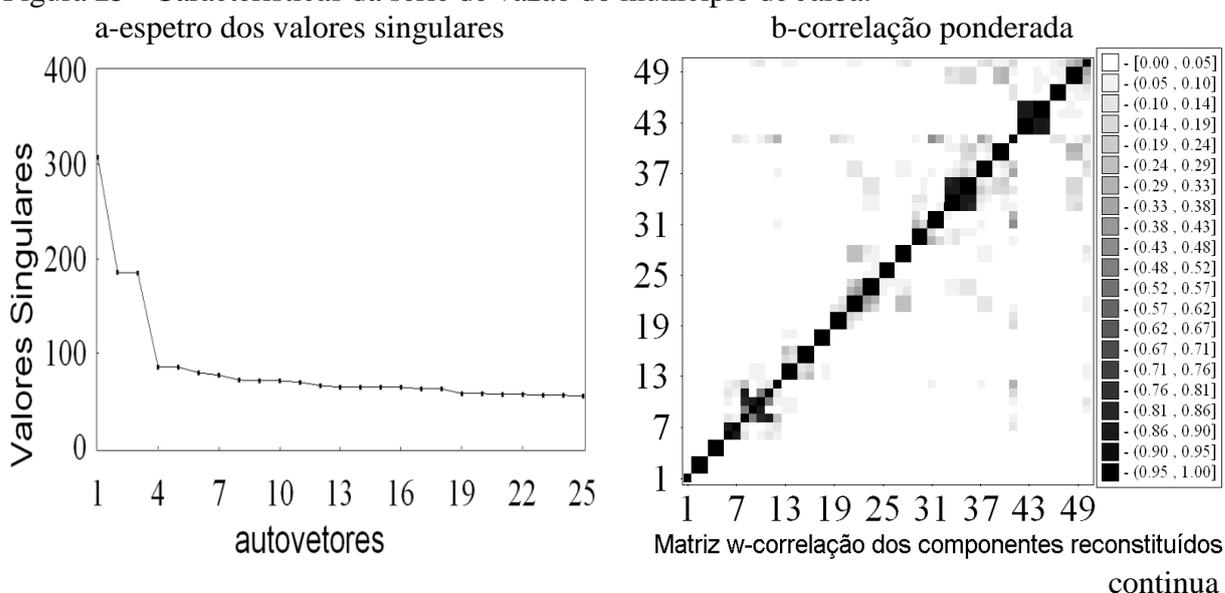


Figura 25- Características da série de vazão do município de Jaíba.

continuação

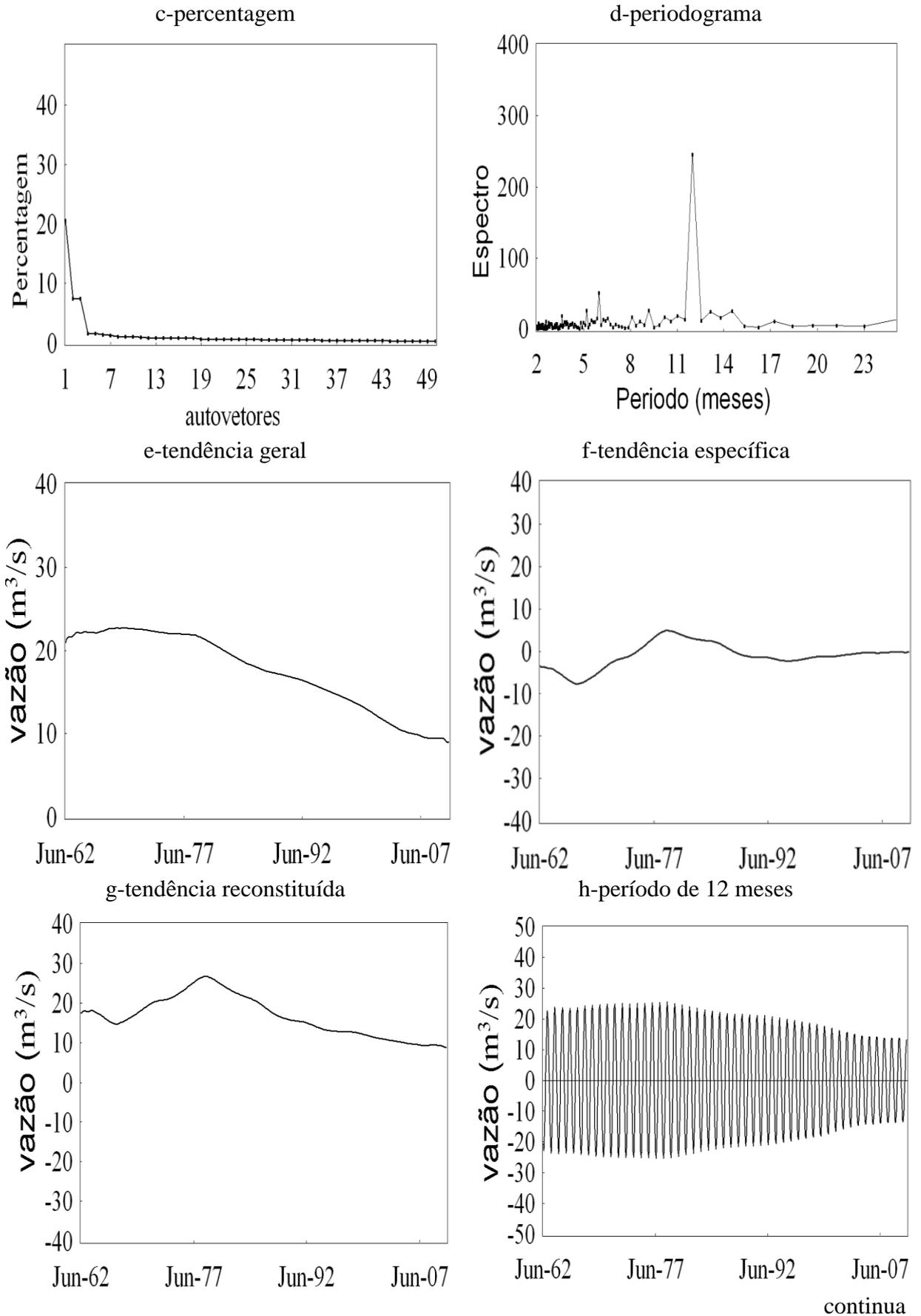
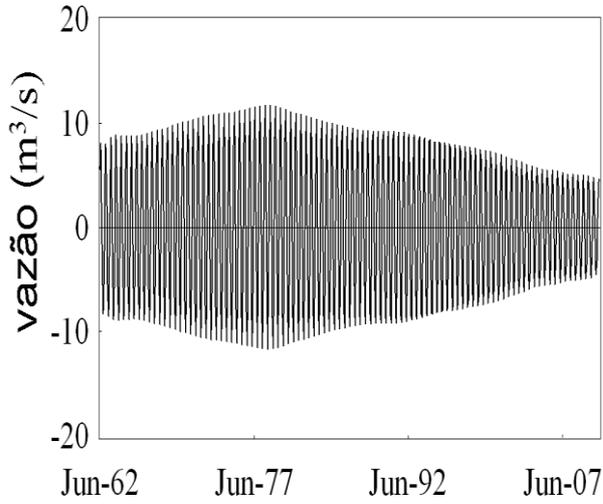
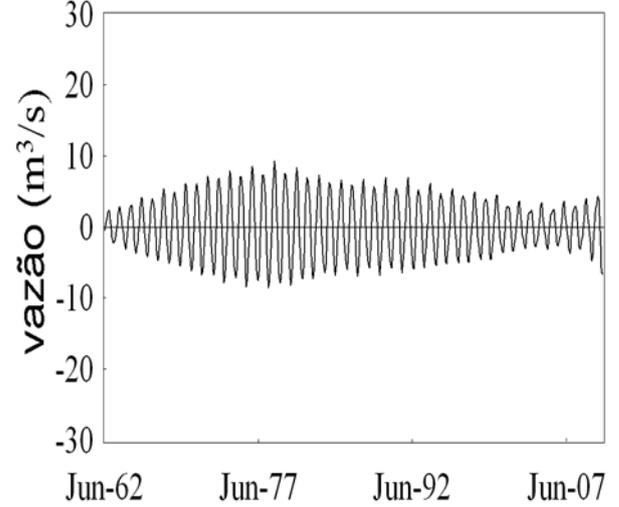


Figura 25- Características da série de vazão do município de Jaíba.
i-período de 6 meses

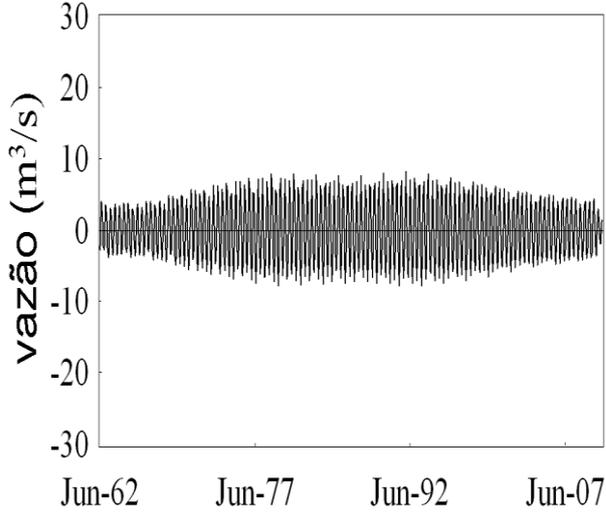


continuação

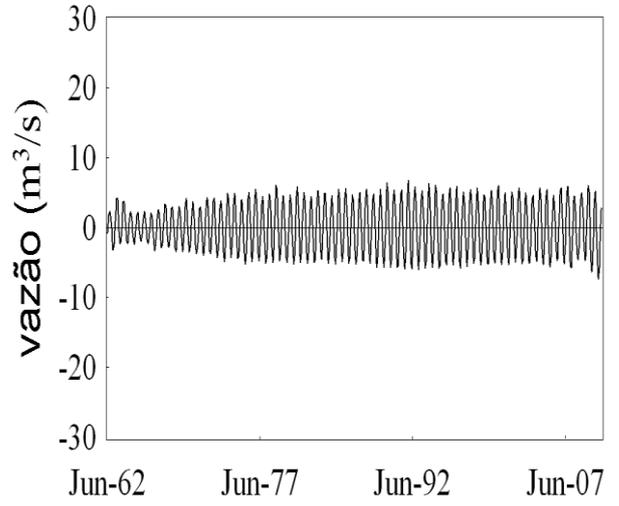
j-período de 13 meses



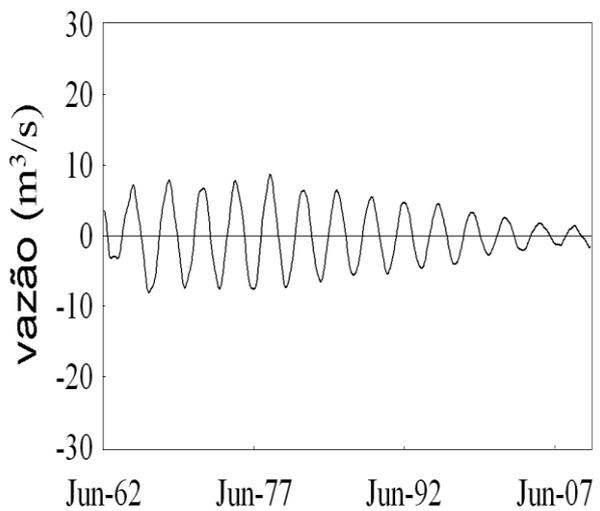
l-período de 5 meses



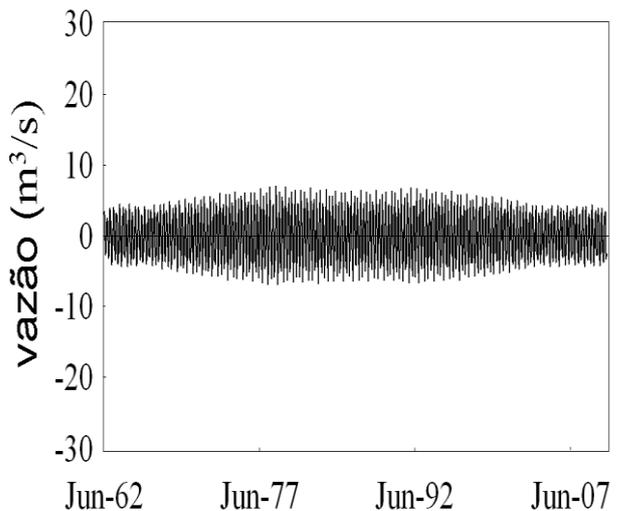
m-período de 9 meses



n-período de 89 meses

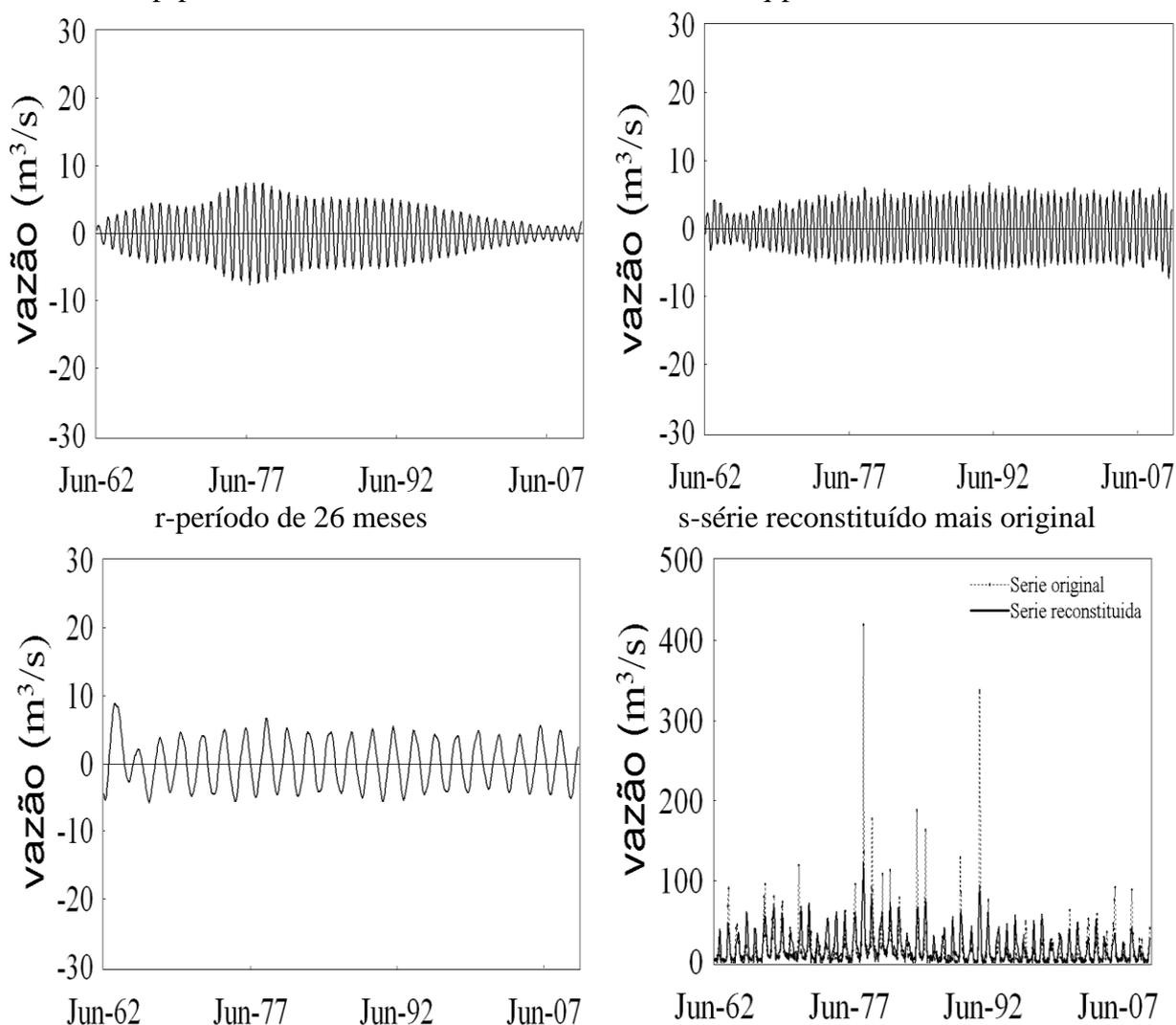


o-período de 3 meses



continua

Figura 25- Características da série de vazão do município de Jaíba. continuação
 p-período de 10 meses q-período de 8 meses



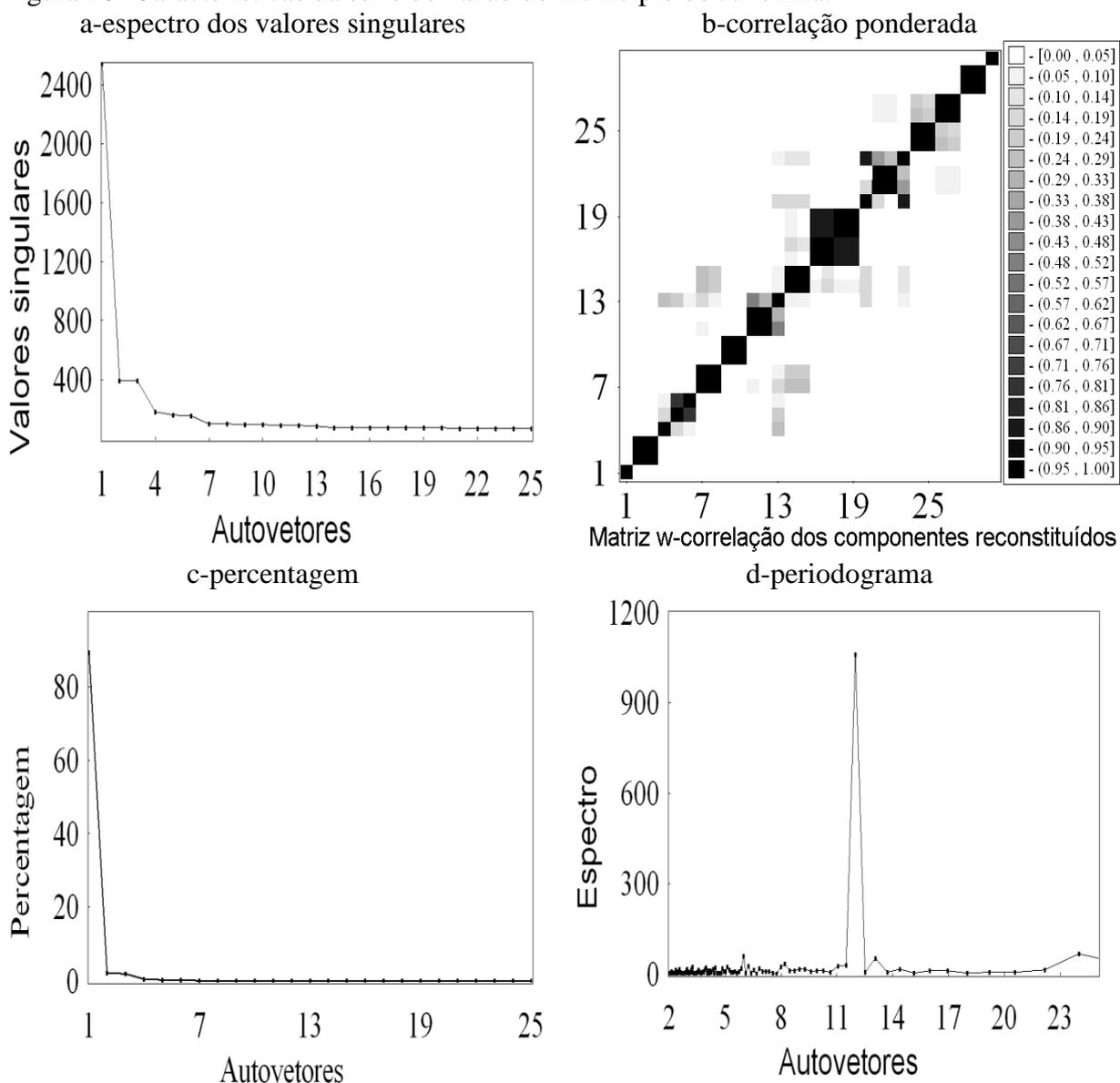
A Figura 26 representa o sinal dos componentes reconstituídos de tendência e modos oscilatórios do município de Juvenília (código 45260000). Dois autovetores foram selecionados para representar o componente de tendência, a saber: autovetor um e o 12 (Figura 26a). O primeiro representando a tendência geral da série que explicou 89,1% da variação total dos dados de vazão e o segundo 0,46%, assim apenas o componente de tendência de vazão do município explicou, aproximadamente 90% da variação dos dados (Figura 26c).

Os modos oscilatórios que fazem parte do sinal da série são de 12 meses (Figura 26h), 24 meses (Figura 26i) e seis meses (Figura 26j). A variabilidade explicada por esses períodos foi de aproximadamente 5%. Por conseguinte o sinal da série da vazão do município

de Juvenília foi reconstruído com aproximadamente 95% dos dados originais. Vale ressaltar que essa estação está localizada no leito principal do rio São Francisco.

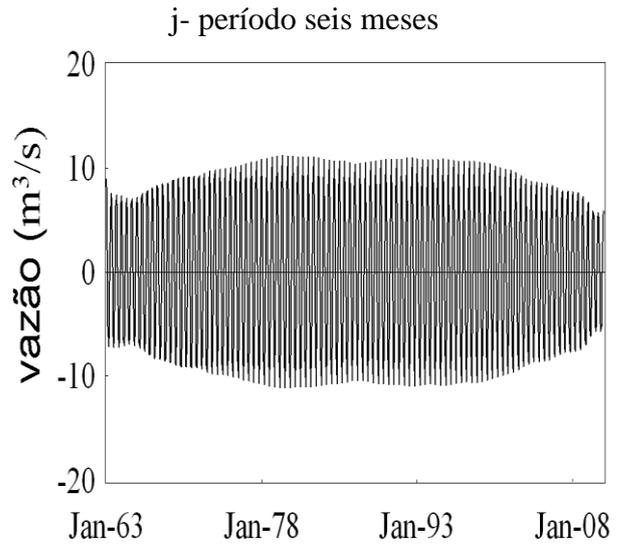
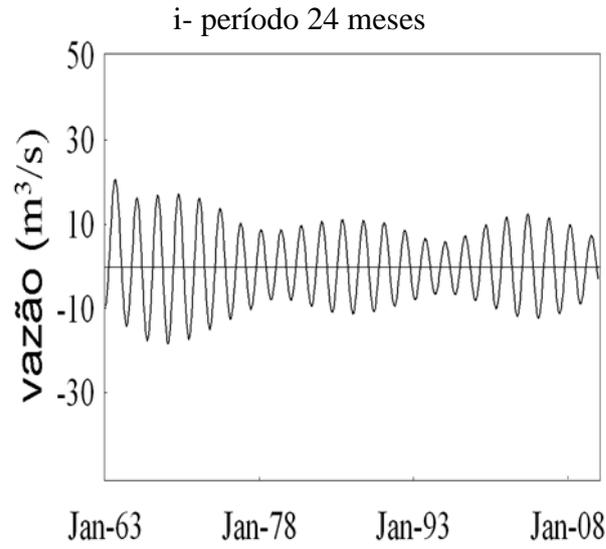
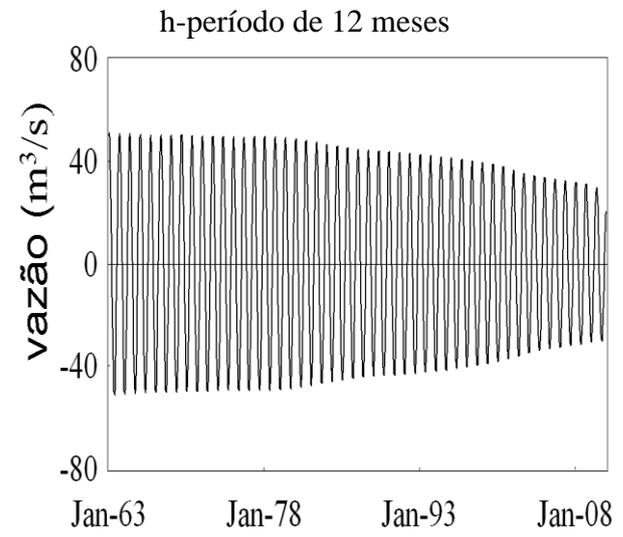
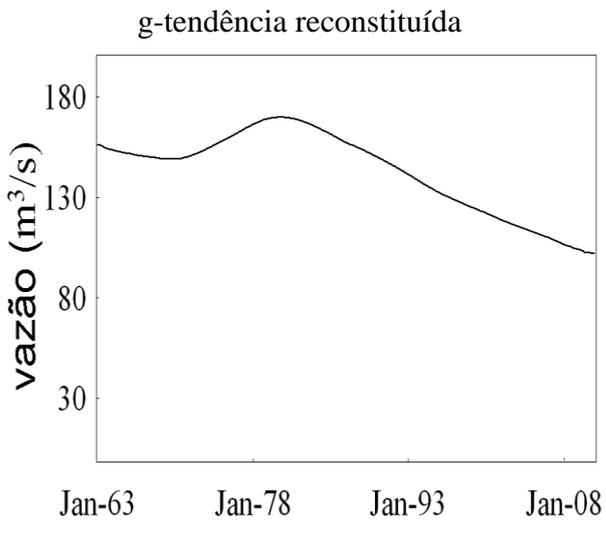
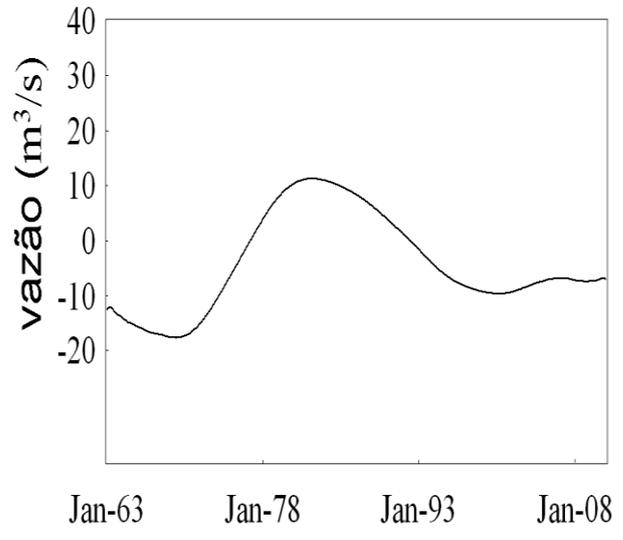
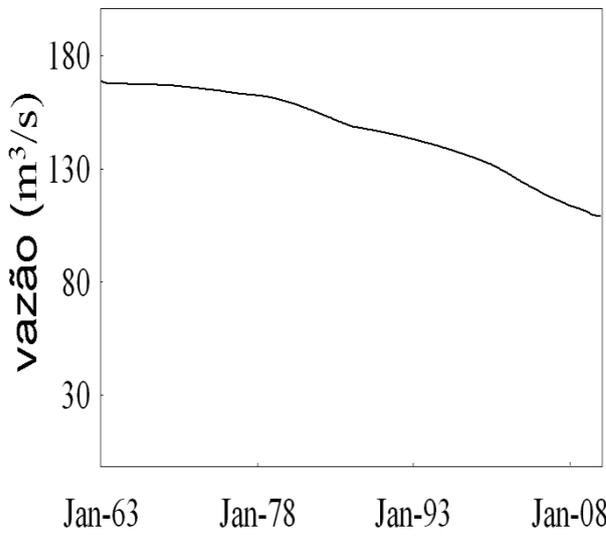
O componente de tendência geral indicou redução da vazão (Figura 26e). Esse decréscimo nos dados de vazão foi devido aos modos oscilatórios de 12 e de 24 meses que apresentaram enfraquecimento na sua amplitude, a partir da década de 80. O modo oscilatório com período de seis meses também apresentou redução de vazão, mas no final da década de 90. Quanto a tendência específica (Figura 26f), ela mostra o aumento de vazão que ocorreu de 1969 a 1974, aproximadamente.

Figura 26- Características da série de vazão do município de Juvenília.



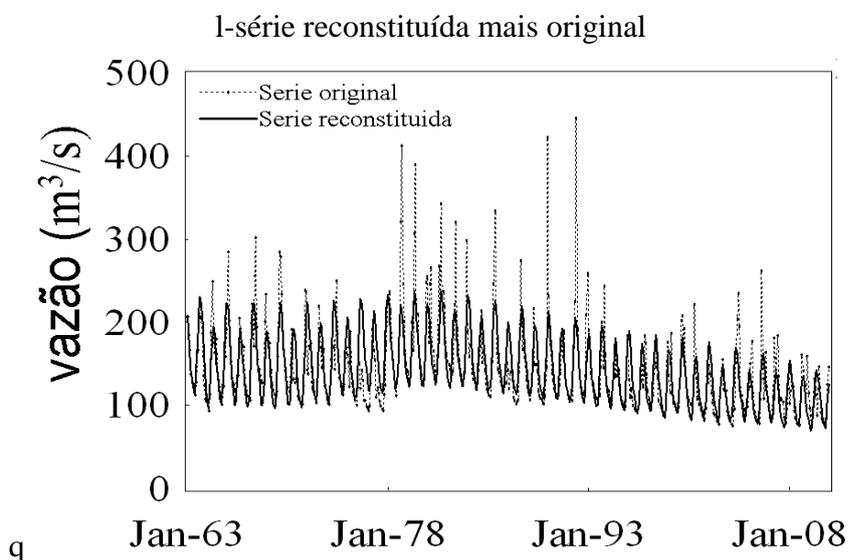
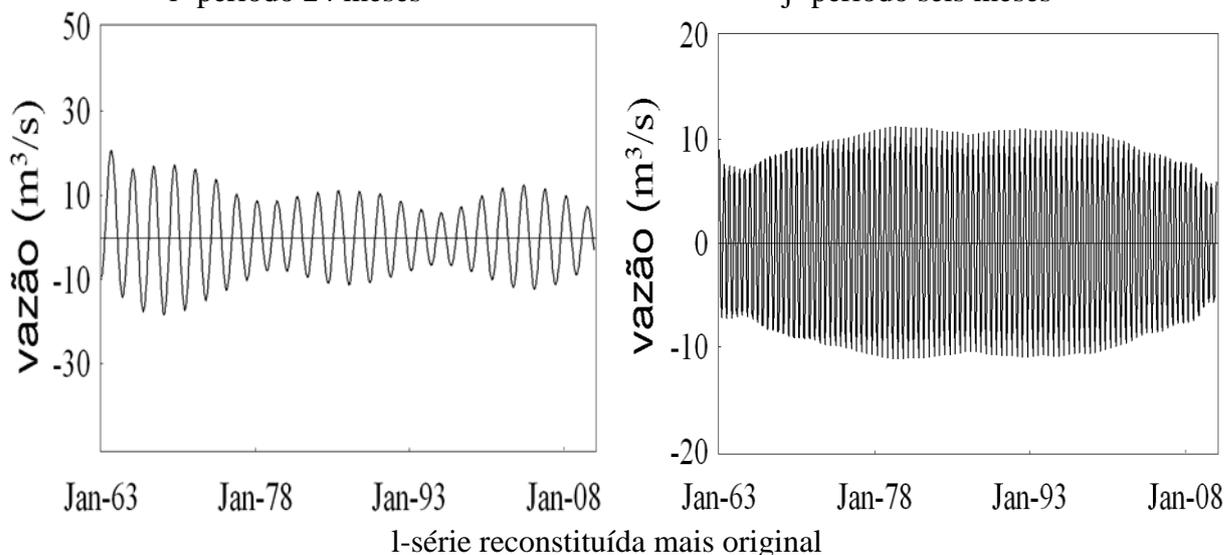
continua

Figura 26- Características da série de vazão do município de Juvenília. continuação
 e-tendência f-tendência refinada



continua

Figura 26- Características da série de vazão do município de Juvenília. continuação
 i- período 24 meses j- período seis meses



A série de vazão do município de Morpará, cujo código é 46360000, demonstra que são necessários um autovetor de tendência e três modos oscilatórios para reconstruir o sinal da série. Com esses sete autovetores a série foi reconstituída com variabilidade explicada de 84,1% da variação dos dados originais, ver Figura (27f). A tendência representou 69,2% e os periódicos 14,9 (Figura 27c).

Foi detectada tendência negativa de vazão no município de Morpará (Figura 27e). Os modos oscilatórios que denotaram maior redução foram os de 53 meses (Figura 27h), que sinalizou redução de vazão desde 1954 e, em 2000 já não houve qualquer influência desse modo oscilatório. Mais uma vez há indicativo do fenômeno El Niño influenciando a vazão na região do Médio São Francisco.

Como mostra a Figura 27d apenas com o componente da tendência da vazão do município de Morpará pode-se reconstituir a vazão com quase 70% da variação dos dados originais. Essa estação está localizada no rio São Francisco.

Figura 27- Características da série de vazão do município de Morpará.

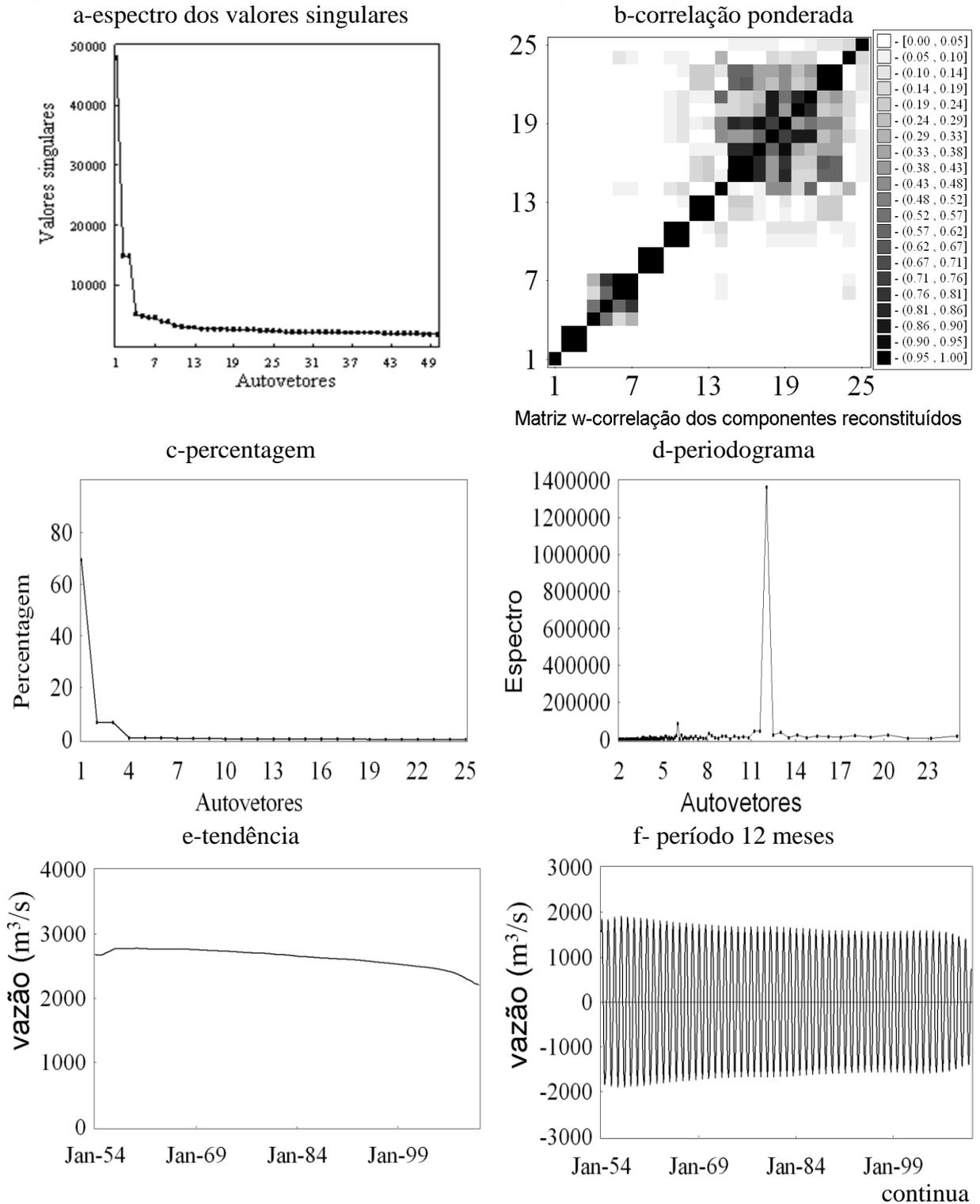
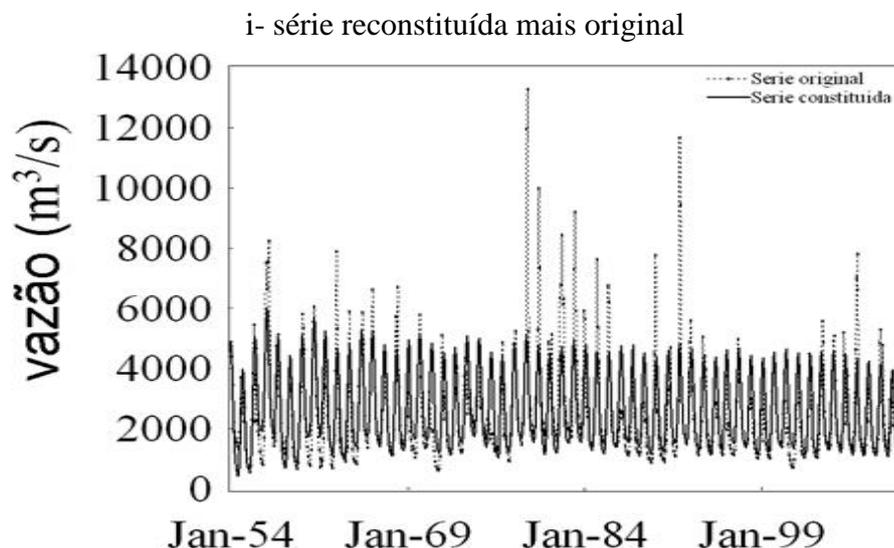
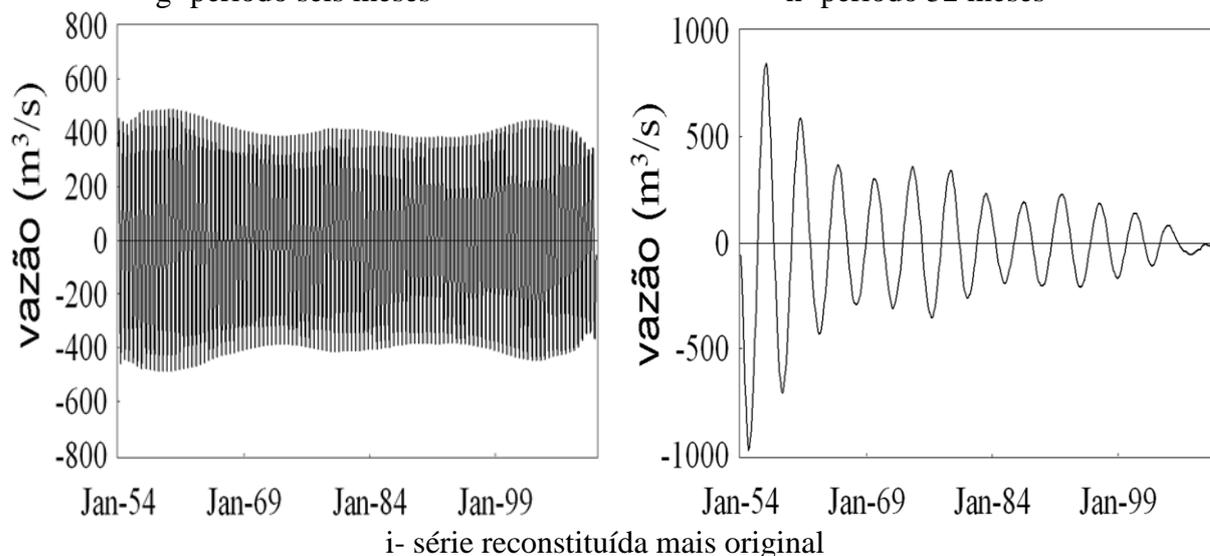


Figura 27- Características da série de vazão do município de Morpará. continuação
 g- período seis meses h- período 52 meses



4.3.2.3 Submédio São Francisco

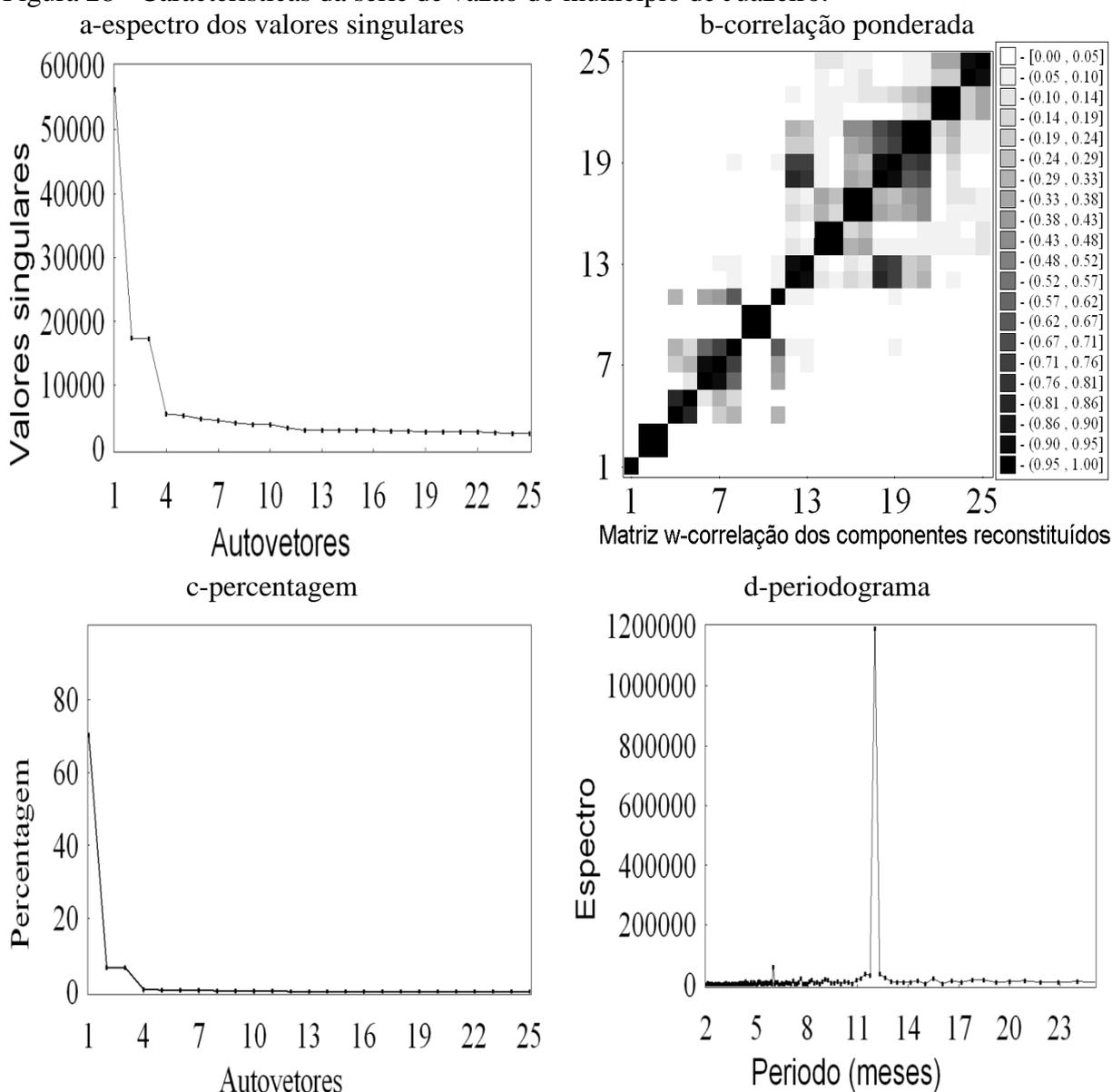
A Figura 28 mostra a estrutura temporal do sinal da série de vazão de Juazeiro (código 48020000). A série tem 996 meses ($N=996$) e o comprimento da janela foi escolhido de 480 meses ($L=480$ meses) que resultaram em 581 autovetores defasados ($K=581$). Destes apenas cinco foram selecionados para recompor o sinal básico da dinâmica dos fenômenos que influenciam a vazão.

Como pode ser observado na Figura 28a o autovetor um, de maior magnitude, representa a tendência da série de vazão. Os modos oscilatórios que compõem o sinal básico da variação da vazão são constituídos pelos pares 2-3, 9-10 e 14-15. O primeiro par corresponde a uma oscilação com período de 12 meses (Figura 28f) e foi o principal período que explicou a variação da vazão no município de Juazeiro (Figura 28d). O segundo par é um modo oscilatório de seis meses (Figura 28g).

Observando a Figura 28c constata-se que com apenas o componente de tendência da vazão se reconstitui a série com 70% da variação total da série original. Somando a variabilidade explicada pelos dois periódicos, a série pode ser reconstituída com 84%, aproximadamente, dos dados originais.

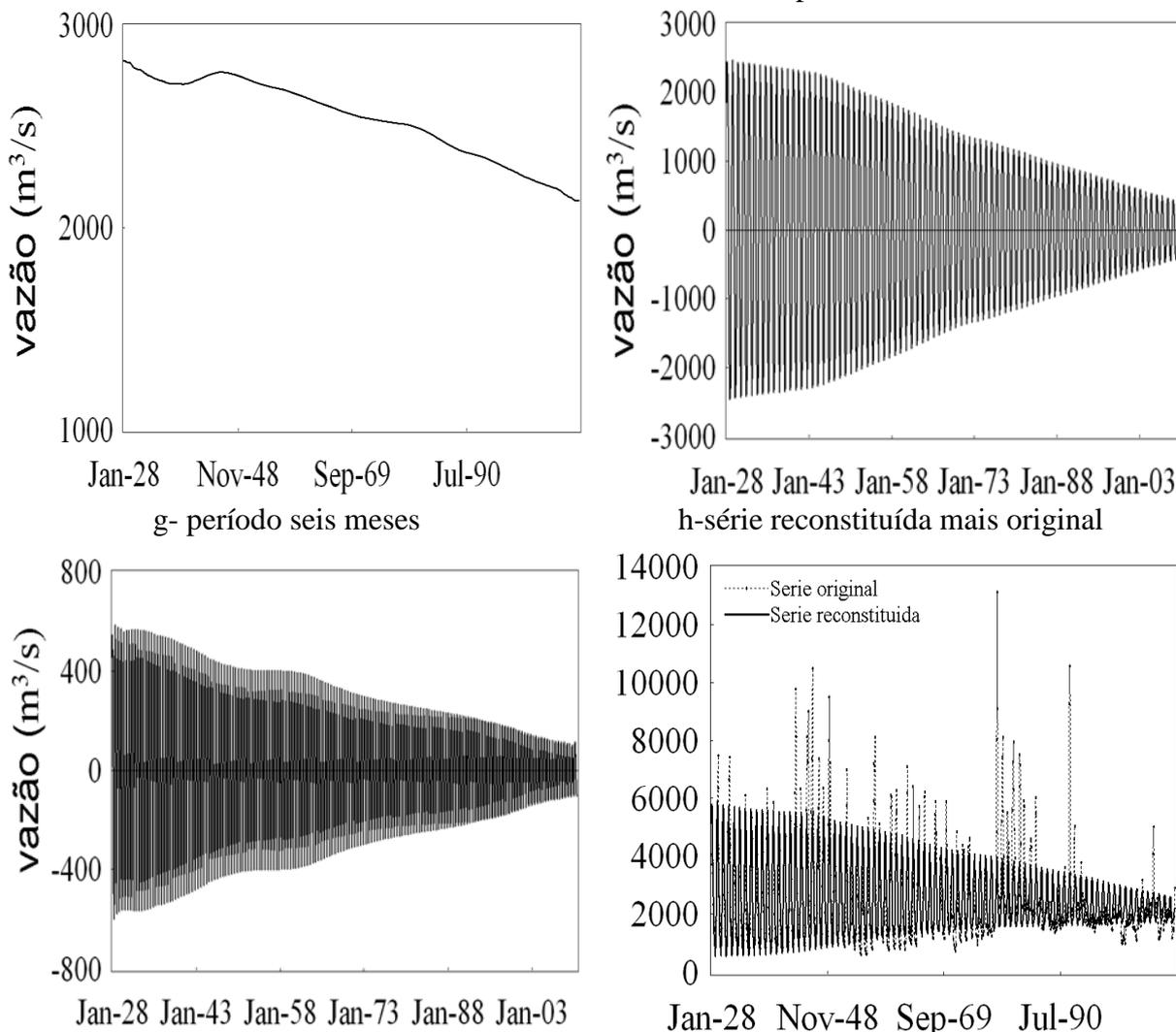
O componente de tendência indicou o declínio da vazão entre 1928 a 1939. Após 1939 houve um pequeno aumento, até por volta de 1946 e, desde então, a vazão tem tendência negativa. Essa redução pode ser explicada pelos dois modos oscilatórios (12 e seis meses) que cada vez menos manifestam sua influência na variação da vazão, no município de Juazeiro.

Figura 28 - Características da série de vazão do município de Juazeiro.



continua

Figura 28- Características da série de vazão do município de Juazeiro. continuação
 e-tendência f- período 12 meses



A série de vazão do município de Serra Talhada (código 48850000) tem comprimento de 540 meses e para a decomposição em valores singulares, o comprimento da janela foi selecionado com 252 autovetores associados aos autovalores. Para reconstituir o sinal da série de vazão desse município, foram escolhidos nove autovetores. O autovetor um, que indicou o componente de tendência e, os pares 2-3, 4-5, 6-7 e 8-9 que apontam o componente periódico (Figura 29a).

Em Serra Talhada, os nove autovetores selecionados para reconstituir o sinal periódico da série, explicou mais a variabilidade da vazão do que o componente de tendência. A tendência geral da vazão nesse município explicou apenas 11,4%, aproximadamente, como pode ser observado na Figura 29c. Enquanto que a principal periodicidade, a de 12 meses, explicou 14%.

Figura 29 - Características da série de vazão do município de Serra Talhada.

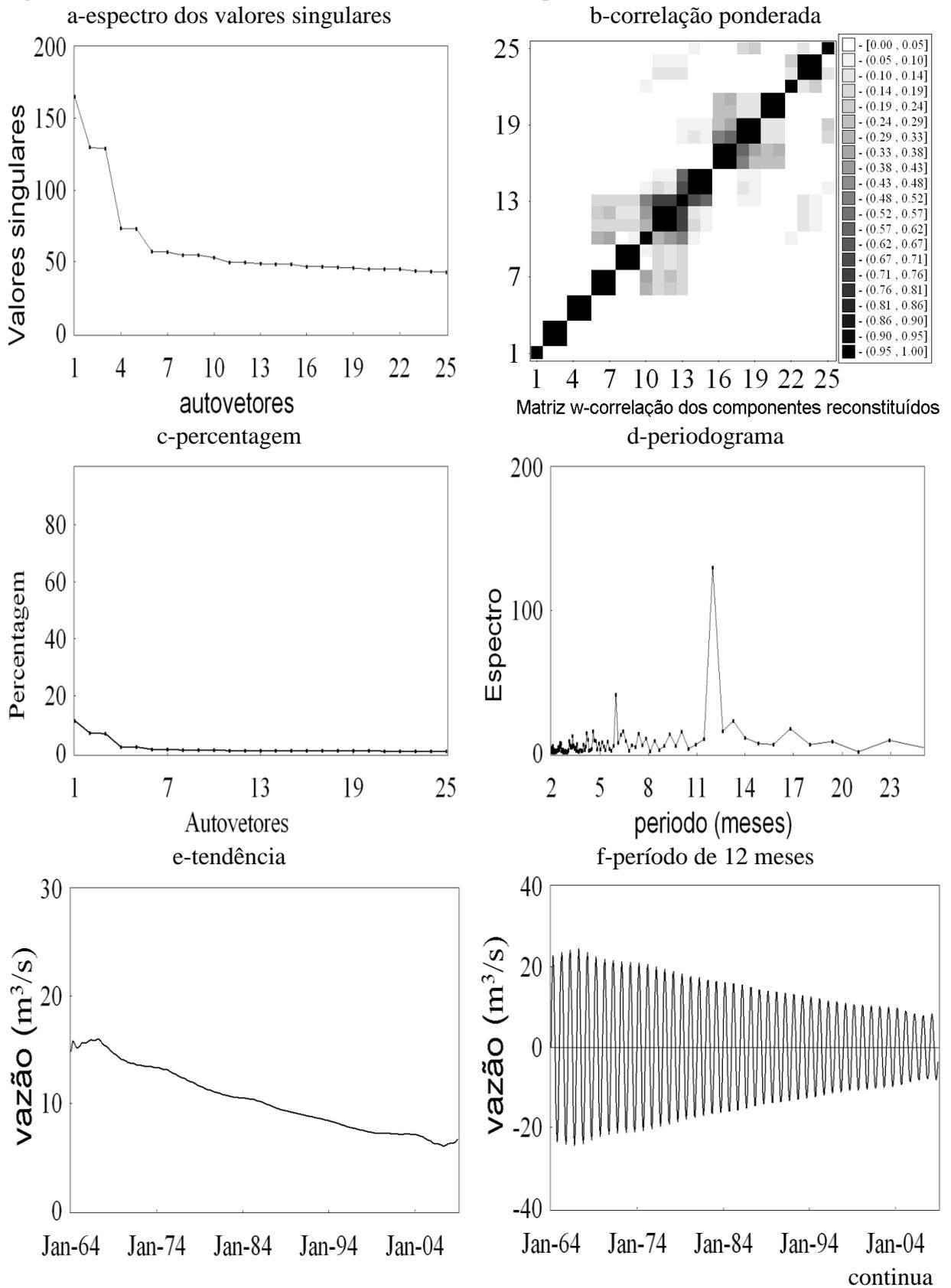
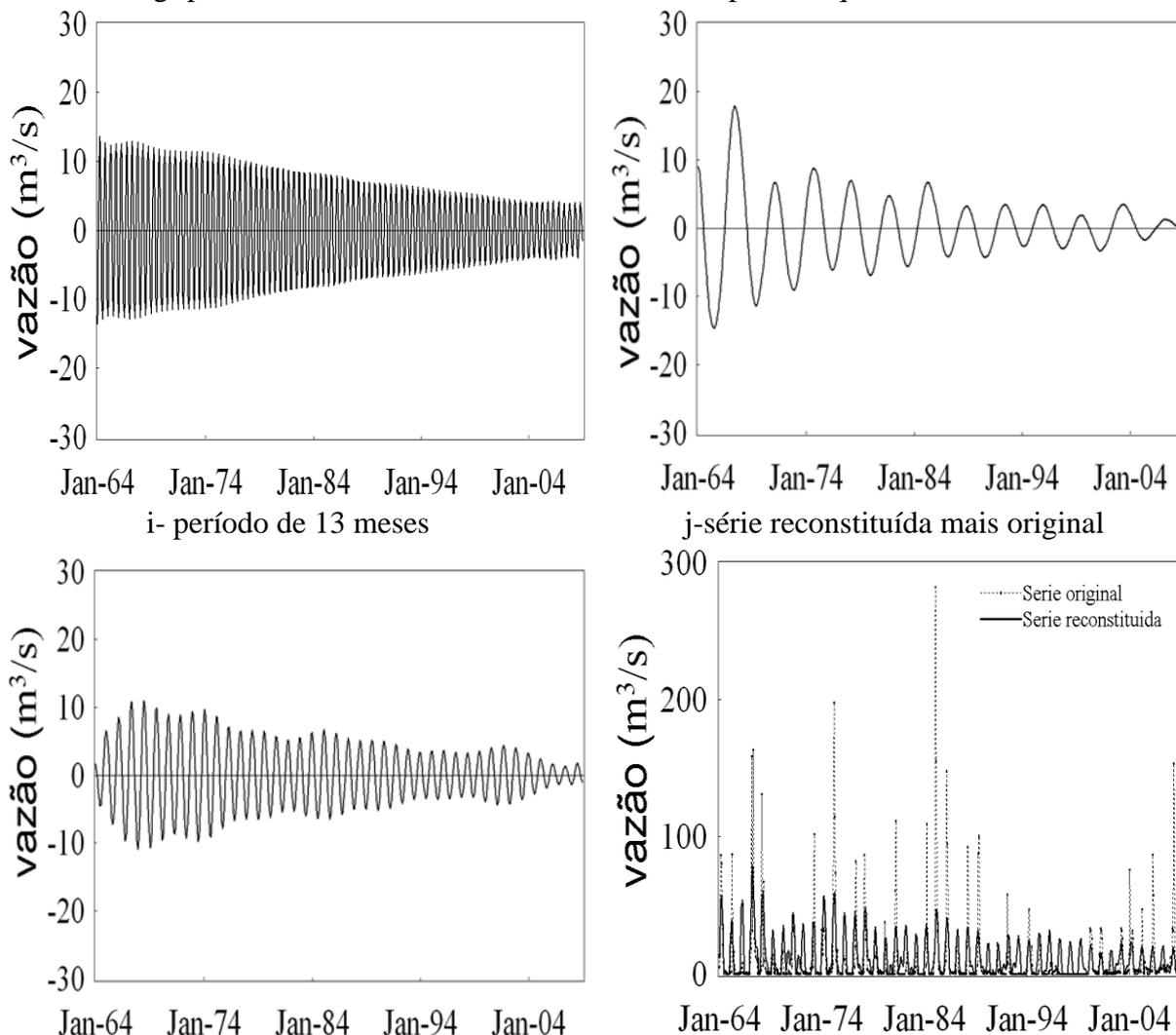


Figura 29- Características da série de vazão do município de Serra Talhada. continuação
 g- período seis meses h- período quarenta e um meses



Somando a variabilidade das quatro oscilações dominante no município que são de 12 meses (Figura 29f), seis meses (Figura 29g), de 41 meses (Figura 29h) e de 13 meses (Figura 29i) a percentagem explicada por esses períodos foi de aproximadamente, 23,7%, isso equivale mais que o dobro do que a tendência explicou.

As Figuras 29c e 29d mostram que o componente periódico da série teve grande contribuição para a variabilidade da vazão no município de Serra Talhada. São oscilações com diversos períodos, sendo que, os mais importantes foram aqueles já citados.

Todos os períodos selecionados mostraram decréscimos nos dados de vazão ao longo dos 45 anos. No entanto, a maior redução foi observada nos períodos de 41e de 13 meses,

respectivamente. Ainda pode-se verificar que a partir de 2004 praticamente não há mais influência dessas duas oscilações na variabilidade da vazão, no município de Serra Talhada.

4.3.2.4 Baixo São Francisco

Na série de vazão de Pão de Açúcar foram selecionados três autovetores designados como parte do componente de tendência, os quais foram um, quatro e sete (Figura 30a). O autovetor um, considerado como tendência geral da série (Figura 30e), mostra tendência negativa da vazão de 1963 a 2010. O quarto autovetor demonstra uma tendência com oscilação (Figura 30f). Do início da série até 1963 há decréscimos nos dados de vazão. Nos anos seguintes até 1982 a tendência da vazão foi positiva e, negativa após essa data até 2000, onde voltou a crescer. O autovetor sete mostra que houve uma redução acentuada no fluxo da vazão de 1959 até 1965. Nos anos seguintes, a tendência da vazão ocorreu de forma oscilatória (Figura 30g).

Quanto aos modos oscilatórios da série, 16 autovetores foram selecionados para recompor o sinal básico da série de vazão de Pão de Açúcar, os quais formam oito modos oscilatórios, os quais têm período de 12 meses (Figura 30h), 38 meses (três anos aproximadamente) (Figura 30i), 75 meses que corresponde a seis anos e dois meses (Figura 30j), 11 meses (Figura 30l) que mostra valores decrescentes da vazão após a década de 70; nove meses (Figura 30m), cinco meses (Figura 30n) onde se observa diminuição da vazão a partir da década de 60, 17 meses (Figura 30o) e oito meses (Figura 30p). Isso tudo indica que a vazão no município de Pão de Açúcar foi dominada pelas escalas intrazonal e interanual.

Portanto, o sinal da série de vazão pode ser reconstituído com 19 autovetores dos 301 produzidos, sendo que, o componente de tendência foi formado por três e o de periodicidade com 16, dos quais, produziram oito períodos distintos. A série reconstituída por esses dois componentes equivale a 87,7%, aproximadamente, de toda a variação dos dados originais. A maior parte desse percentual foi atribuída ao componente de tendência (75,2%) e 12,5% ao de periodicidade, sendo que, mais da metade (7,9%) foi devido ao período anual. Apesar de o componente periódico apresentar menor contribuição na variação da vazão, no município de Pão de Açúcar, vale salientar, que a segunda e a terceira oscilação que mais influência o comportamento da mesma, foi da escala interanual de aproximadamente três e seis anos. A vazão exibe tendência decrescente no município de Pão de Açúcar (Figura 30e). O principal contribuinte para essa redução pode ser atribuída ao período de 12 meses, uma

vez que é a periodicidade que mais colabora para a variação da vazão. Mas, a de 32, 11 e 17 meses, também tiveram suas parcelas de cooperação para esse decréscimo.

Figura 30 - Características da série de vazão do município de Pão de Açúcar.

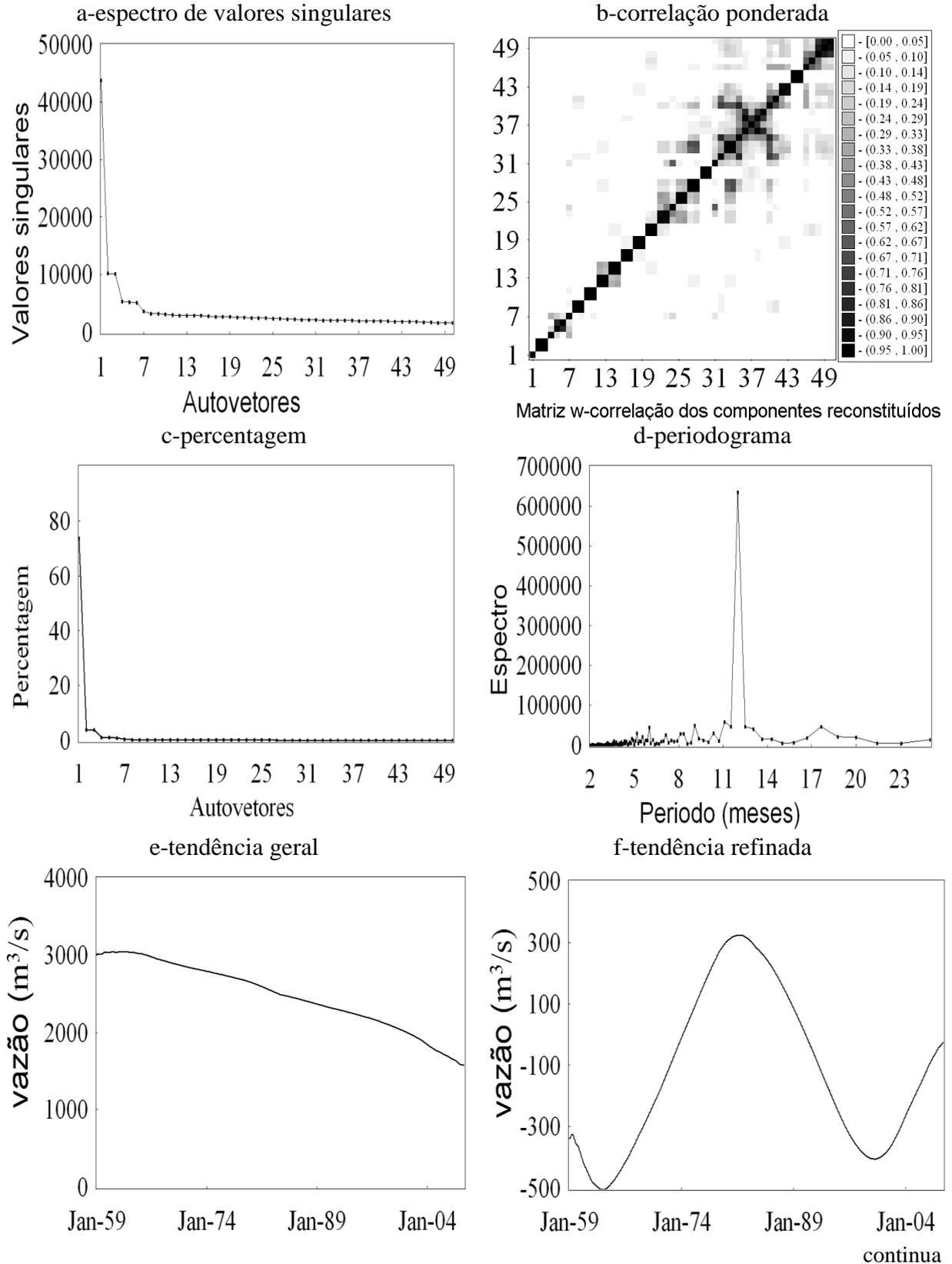
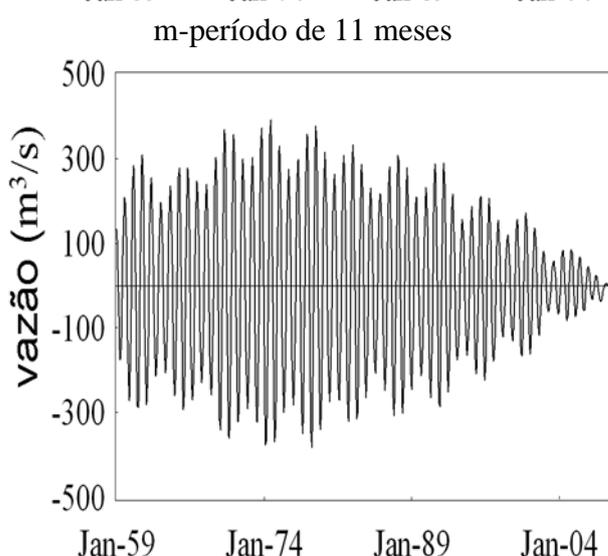
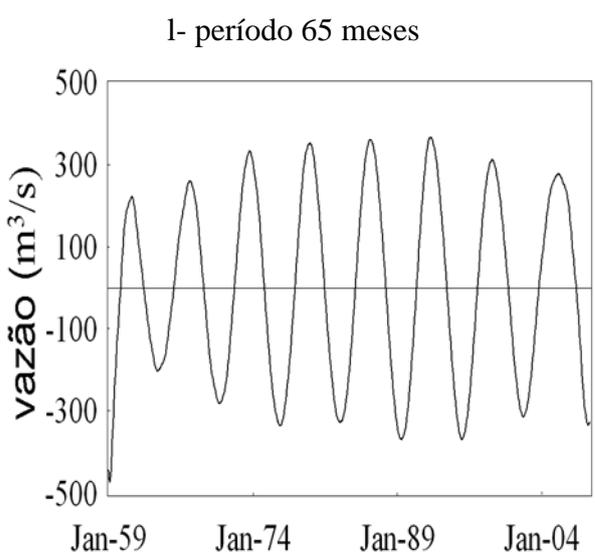
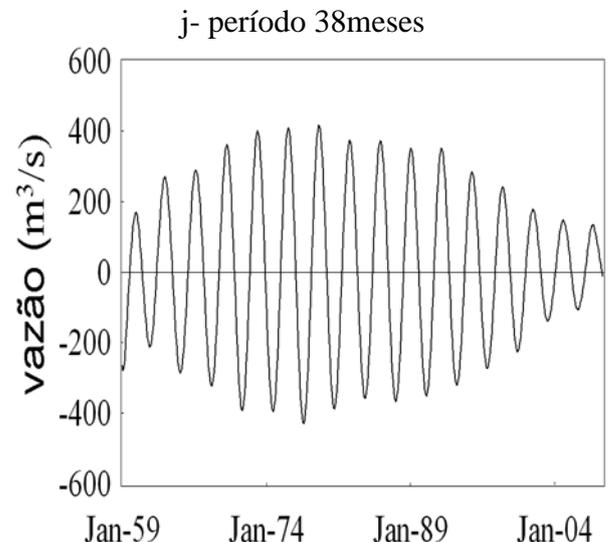
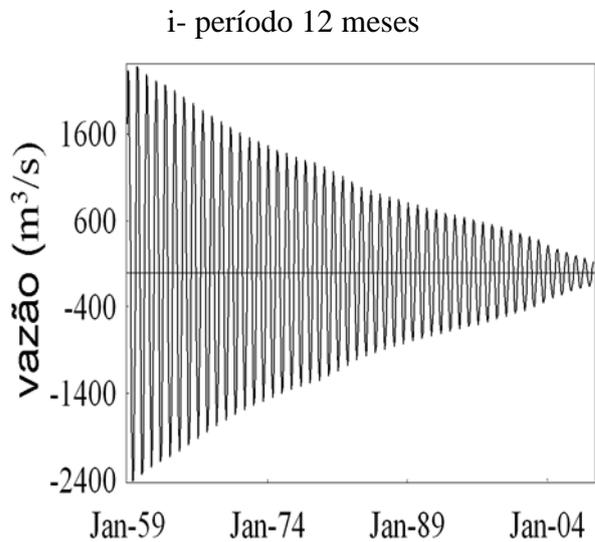
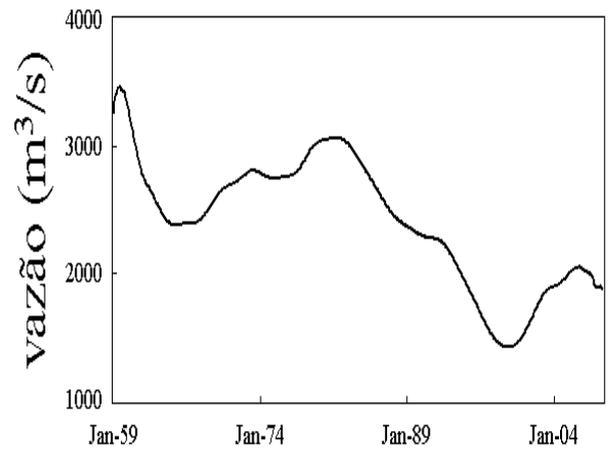
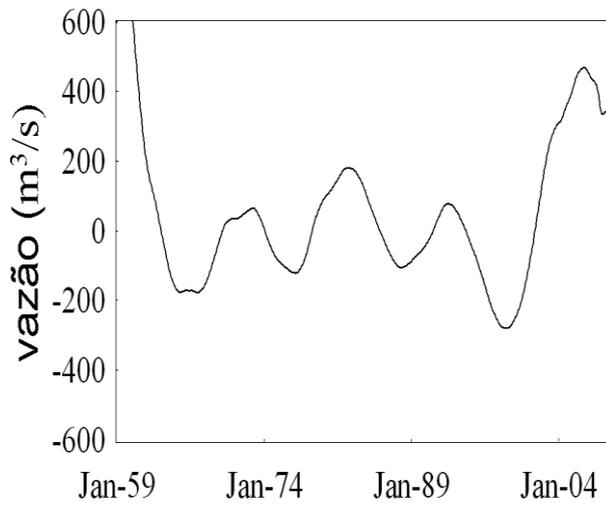
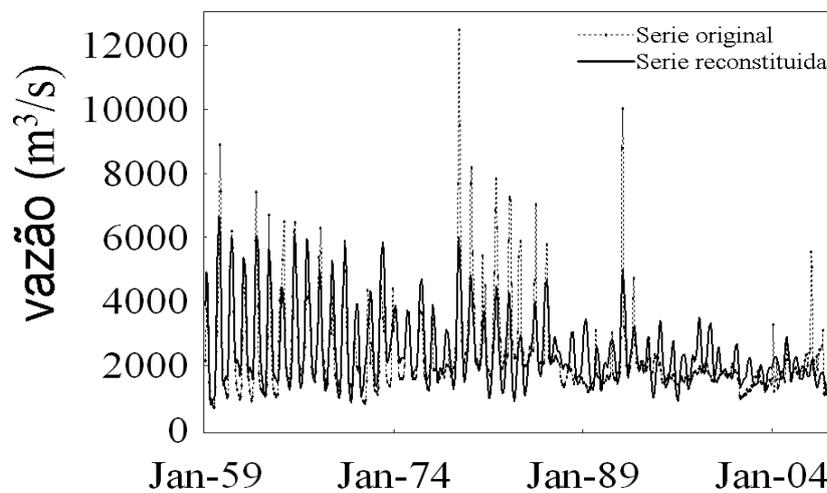
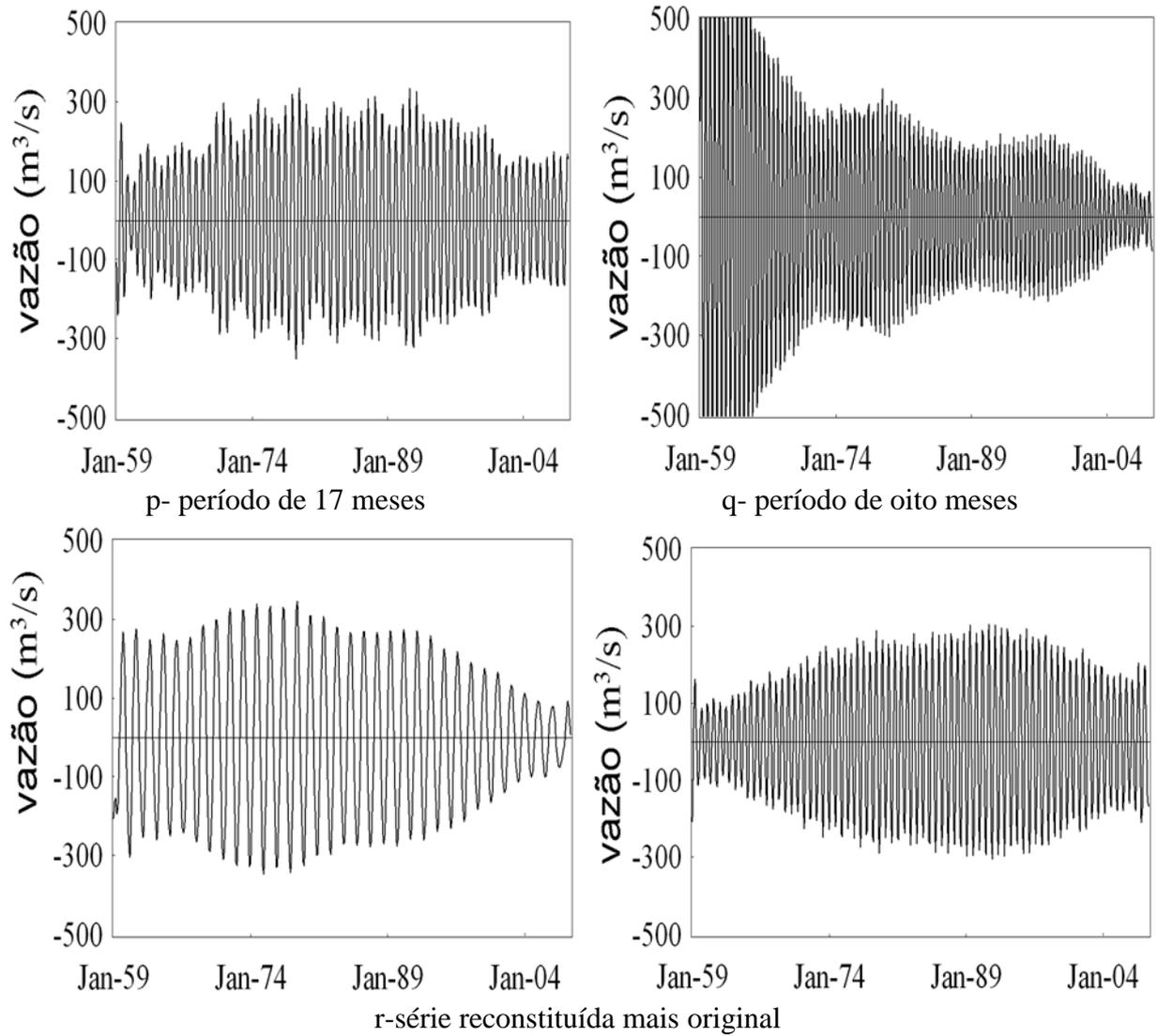


Figura 30- Características da série de vazão do município de Pão de Açúcar. continuação
 g-tendência refinada
 h-tendência refinada



continua

Figura 30- Características da série de vazão do município de Pão de Açúcar. continuação
 n- período de 9 meses
 o- período de 5 meses

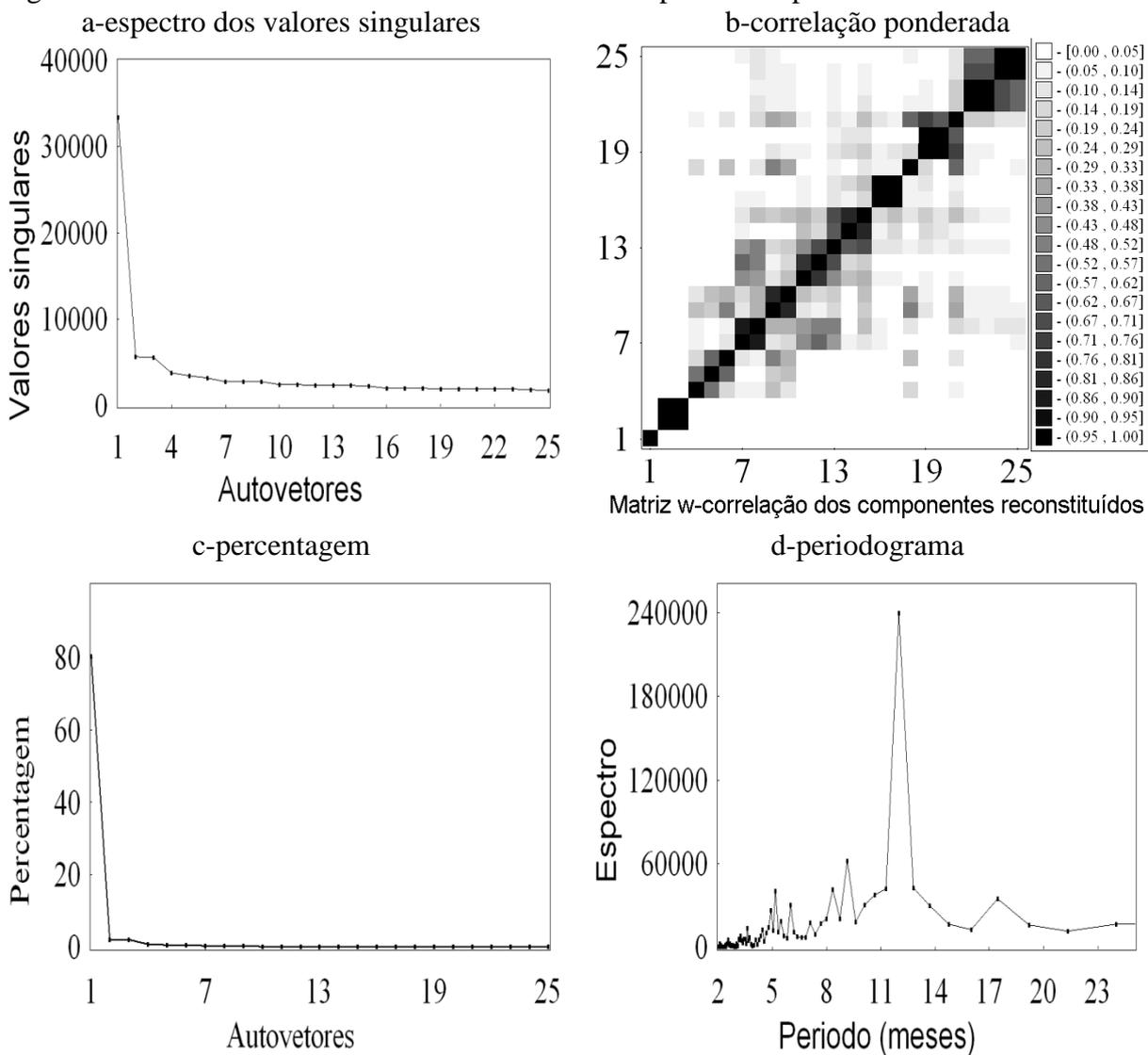


Como pode ser observada na Figura 31 a série de vazão em Traipú mostra que existem um autovetor que representa o componente de tendência e dois autovetores correspondentes

ao periódico (Figura 31a), cujo período é anual (Figura 31d). Isso significa que os demais autovetores não exibiram separabilidade fraca, como requer a metodologia aplicada, ou ainda, que o componente de tendência pode ser reconstituído apenas com o autovetor um, enquanto que, o modo oscilatório apenas com o período anual. Pode-se observar por meio da Figura 31b que os autovetores um, dois e três realmente estão relacionados ao sinal da série de vazão, enquanto que do quatro autovetor em diante (grande bloco preto e cinza) corresponde o ruído da série.

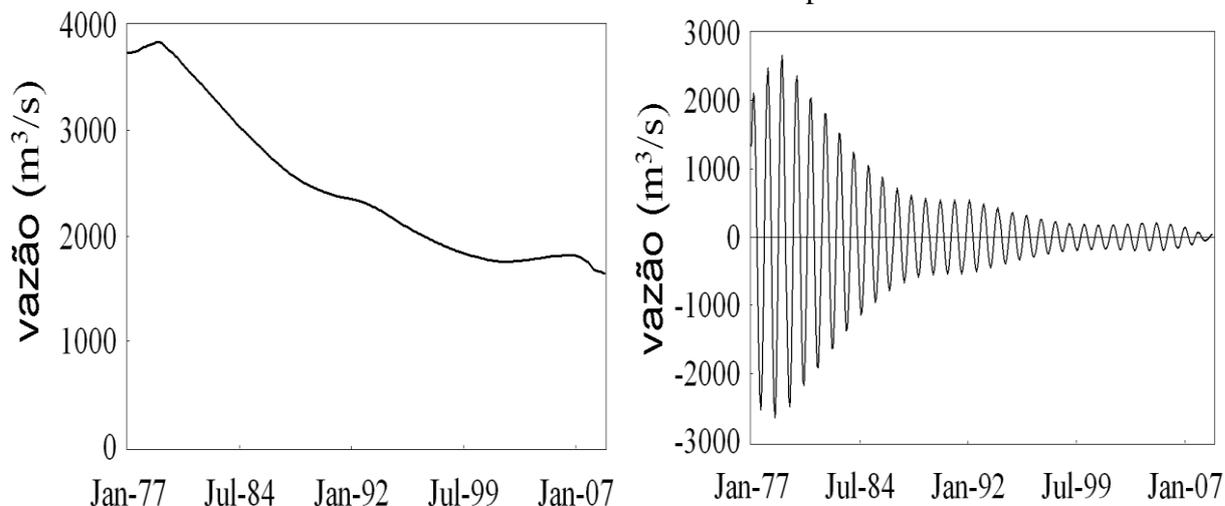
Assim, o componente de tendência explicou 80,2% (Figura 31a e 31c) da variação total dos dados e período anual (Figura 31g) apenas 4,5%. Portanto, os dois explicaram, aproximadamente, 85%. A reconstituição da série pode ser observada na Figura 31f a qual mostra que após a década de 1980, a vazão foi praticamente constante.

Figura 31- Características da série de vazão do município de Traipu.

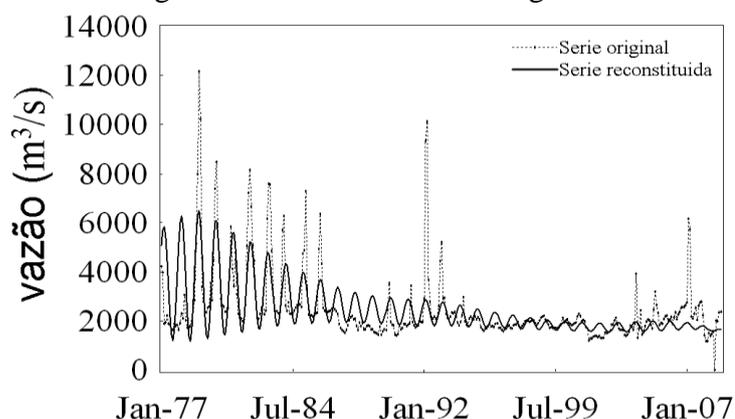


continua

Figura 31- Características da série de vazão do município de Piranhas. continuação
 e-tendência f-período de 12 meses



g-série reconstituída mais original



Em Traipú a vazão apresentou tendência negativa, visto que, o componente de sazonalidade indica que a partir da década de 80, a vazão e sua variação foram diminuindo, no decorrer dos anos. E nas últimas duas décadas a vazão passou a ser constante, ou seja, não se observa mais a sua variabilidade.

A extração dos modos oscilatórios via Análise espectral Singular revelou que a principal oscilação que influenciou a vazão na bacia do rio São Francisco foi a de 12 meses. A segunda mais importante variou de escala nas quatro sub-regiões da bacia. No Alto São Francisco as oito séries de vazão apresentaram o período de seis meses como a segunda mais importante. Destaca-se também que nessa região, os municípios de Vargem Bonita, Juatuba e Várzea da Palma mostram oscilações com escala de nove, três e quatro anos respectivamente. Em Santo Hipólito houve influência das escalas de 17 e seis anos na variabilidade da vazão (Tabela 5).

Tabela 5 – Oscilações dominantes presentes nas séries de vazão do Alto São Francisco. Os períodos estão em ordem decrescente de importância.

Município	Estado	Código	Comprimento da série (meses)	Comprimento da janela (meses)	Oscilações dominantes (período em meses)
Vargem Bonita	MG	40025000	876	438	12, 6, 110, 12, 63,10, 10, 13, 43
Juatuba	MG	40800001	876	438	12, 6, 51
Várzea da Palma	MG	41990000	876	438	12, 6, 209, 73, 14
Santo Hipólito	MG	41818000	588	276	12, 6
Cordisburgo	MG	41600000	504	252	12, 6
Nova Lima	MG	41199998	456	216	12, 6
Claro dos Poções	MG	42100000	444	216	12, 8, 6
Augusto Lima	MG	41890000	468	216	12

No Médio São Francisco, das 31 estações analisadas, dez apresentaram o período de seis meses como a segunda mais importante, sendo que, seis delas estão situadas no estado de Minas Gerais e quatro no estado da Bahia. Ainda na mesma região, 13 estações exibiram que o segundo modo oscilatório que mais influenciou a variação na vazão, foi da escala decadal. Dentre essas estações estão a do município de Buritizeiro (4221000) com escala de aproximadamente 21 anos. O município de Paracatu apresentou a estação 42257000 com escala de nove anos enquanto que a estação 4239500 indicou escala de 12 anos. Esta última escala também foi observada no município de Unaí (4249000).

Em Santa Fé de Minas verificou que a escala do segundo periódico foi de 15 anos. O município de Manga manifestou escala de 18 anos, Montalvânia e Mansidão de aproximadamente dez anos, Cotegipe 12 anos e Santa Rita de Cássia 37 (ver Tabela 6). No Baixo São Francisco, foi observado período de aproximadamente três anos como a segunda oscilação que causa variação na vazão (Tabela 8). Portanto, o Médio São Francisco foi a região onde a vazão mais sofreu influência da escala decadal. Esses resultados concordam com os estudos de Melo et al., (2012) e de Sá et al., (1998) que detectaram oscilação nas escalas intrasazonal, interanual e década nos dados de vazão aplicando a metodologia de ondeletas em bacia hidrográfica do rio Jaguaribe no Ceará e para o rio Paraguai em Lendário (MS), respectivamente. Esta pesquisa também está de acordo com as de Krepper et al., 2006 e de Destro (2010) que também encontram oscilações dominantes na escala decadal nos dados de vazão por meio do método da SSA. Os primeiros aplicaram a metodologia para o rio Uruguai e o segundo para o rio Cuiabá.

A maioria das estações mostraram que o componente de tendência explicou mais a variabilidade da vazão do que os periódicos. No entanto, as estações dos municípios de Claro

dos Porções, no Alto São Francisco e, Jaíba no Médio São Francisco, indicaram que os autotriples selecionados, os quais constituíram o componente periódico, explicou grande parte da variação dos dados originais.

Tabela 6 – Oscilações dominantes presentes nas séries de vazão do Médio São Francisco. Os períodos estão em ordem decrescente de importância

Município	Estado	Código	Comprimento da série (meses)	Comprimento da janela (meses)	Oscilações dominantes (período em meses)
Coração de Jesus	MG	42187000	444	216	12, 6
Buritzeiro	MG	42210000	624	252	12, 6
Guarda-Mor	MG	42250000	444	204	12, 6
Paracatu	MG	42435000	420	204	12, 6, 27
Paracatu	MG	42255000	432	216	12, 6
Paracatu	MG	42257000	432	216	12, 108, 6
Paracatu	MG	42395000	540	252	12, 145, 6
Unai	MG	42490000	540	252	12, 145, 58, 24
Unai	MG	42540000	540	252	12, 145, 13, 58, 5
Santa Fé de Minas	MG	42980000	684	324	12, 180, 6
São Romão	MG	4320000	698	348	12, 6, 8
Buritis	MG	43300000	444	204	12, 120, 24, 13
Urucuia	MG	43670000	516	240	12, 139
São Francisco	MG	4420000	924	444	12, 53, 34, 11
Januária	MG	44250000	444	204	12, 24, 5, 7, 4, 10, 2
Pedra de Maria da Cruz	MG	44290002	456	228	12, 6
Manga	MG	44540000	432	216	12, 6
Manga	MG	44500000	888	444	12, 222, 6
Jaíba	MG	44670000	583	276	12, 6, 13, 5, 8, 39, 3, 10, 8, 26, 11, 6
Montalvânia	MG	45131000	768	384	12, 128, 6, 4, 11, 5, 8, 54

continua

Tabela 6 – Oscilações dominantes presentes nas séries de vazão do Médio São Francisco. Os períodos estão em ordem decrescente de importância.

Município	Estado	Código	Comprimento da série (meses)	Comprimento da janela (meses)	Oscilações dominantes (período em meses)
Juvenília	MG	45260000	576	288	12, 24, 6,
Carinhanha	MG	45298000	876	420	12, 6
Serra do Ramalho	BA	4548000	804	384	12, 6, 52, 11
Ibotirama	BA	46150000	684	324	12, 6, 52, 11
Morpará	BA	46360000	684	324	12, 6, 52, 11
Cotegipe	BA	46675000	564	264	12, 150
Formosa do Rio Preto	BA	46770000	468	216	12
Formosa do Rio Preto	BA	46790000	828	396	12
Santa Rita de Cássia	BA	46830000	852	408	12
Mansidão	BA	46902000	924	444	12, 120

Tabela 7 – Oscilações dominantes presentes nas séries de vazão do Submédio São Francisco. Os períodos estão em ordem decrescente de importância.

Município	Estado	Código	Comprimento da série (meses)	Comprimento da janela (meses)	Oscilações dominantes (período em meses)
Juazeiro	BA	48020000	996	480	12, 6, 11
Serra Talhada	PE	48850000	540	252	12, 6, 41, 13

Tabela 8 - Oscilações dominantes presentes nas séries de vazão do Baixo São Francisco. Os períodos estão em ordem decrescente de importância.

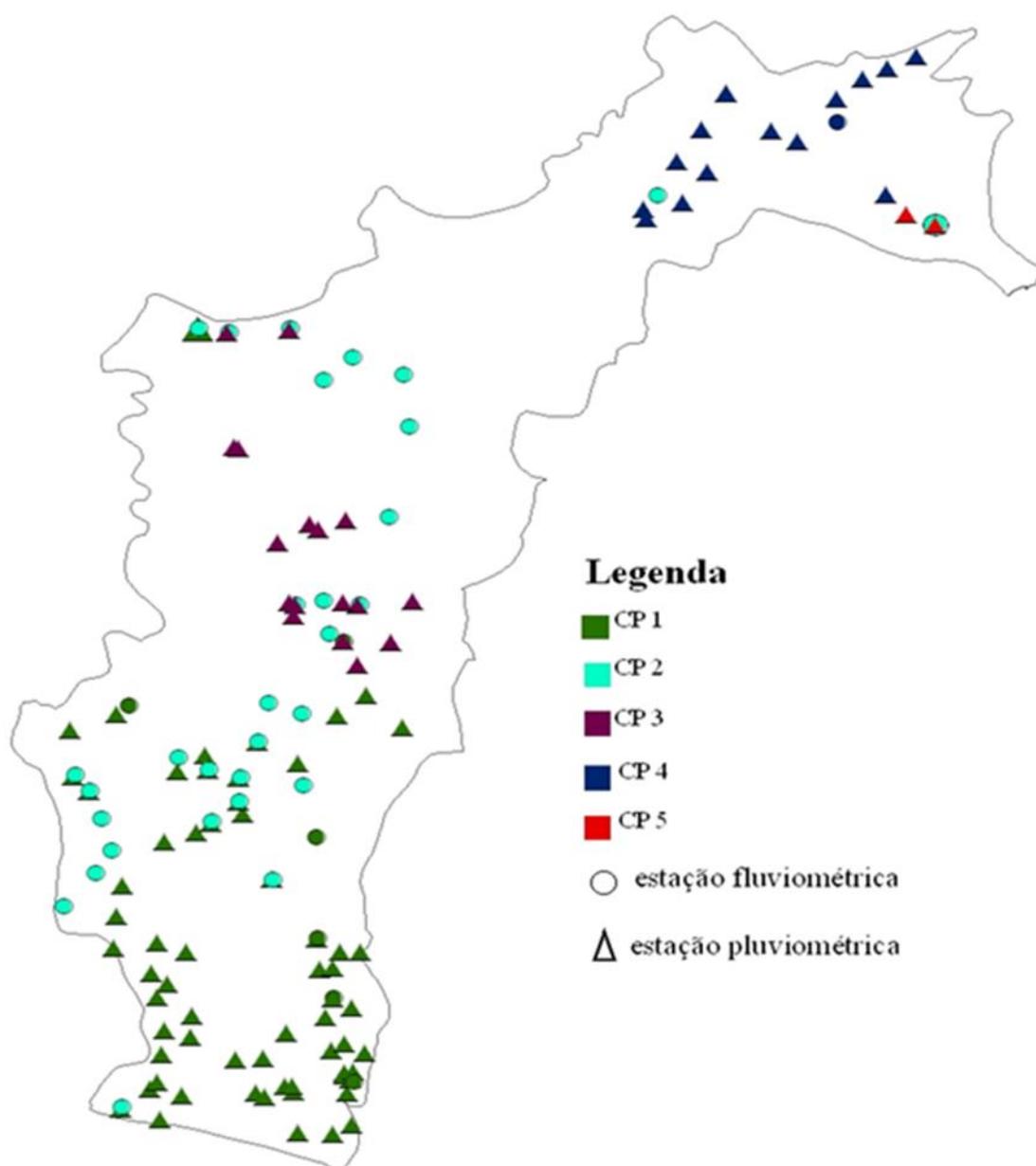
Município	Estado	Código	Comprimento da série (meses)	Comprimento da janela (meses)	Oscilações dominantes (período em meses)
Pão de Açúcar	AL	4937000	600	300	12, 38, 75, 11, 9, 5, 17, 8
Traipu	AL	49660000	384	192	12

4.4. Regionalização da precipitação e vazão na bacia do rio São Francisco

A análise da estrutura espacial das séries de precipitação e vazão foi realizada via análise de componentes principais a fim de verificar se as forçantes antrópica e fisiográficas

podem transformar a forçante atmosférica na influência das duas variáveis citadas. A Figura 32 mostra a distribuição espacial das estações de precipitação e vazão, ao longo da bacia do rio São Francisco e, as regionalizações dos postos formados após aplicação da análise de componentes principais. Foram formados cinco grupos homogêneos.

Figura 32 - Distribuição espacial das estações de precipitação e vazão ao longo da bacia do rio São Francisco e regiões homogêneas.



A componente um (CP1) agregou todas as estações de precipitação da região do Alto São Francisco (45 estações) e mais aquelas estações do Médio São Francisco, que estão situadas mais ao sul da região (21 estações), localizadas no estado de Minas Gerais. Também foram inseridas na CP1, sete estações de vazão, quatro delas pertencem ao Alto São Francisco e três ao Médio, mas todas situadas em Minas Gerais, totalizando então, 73 estações.

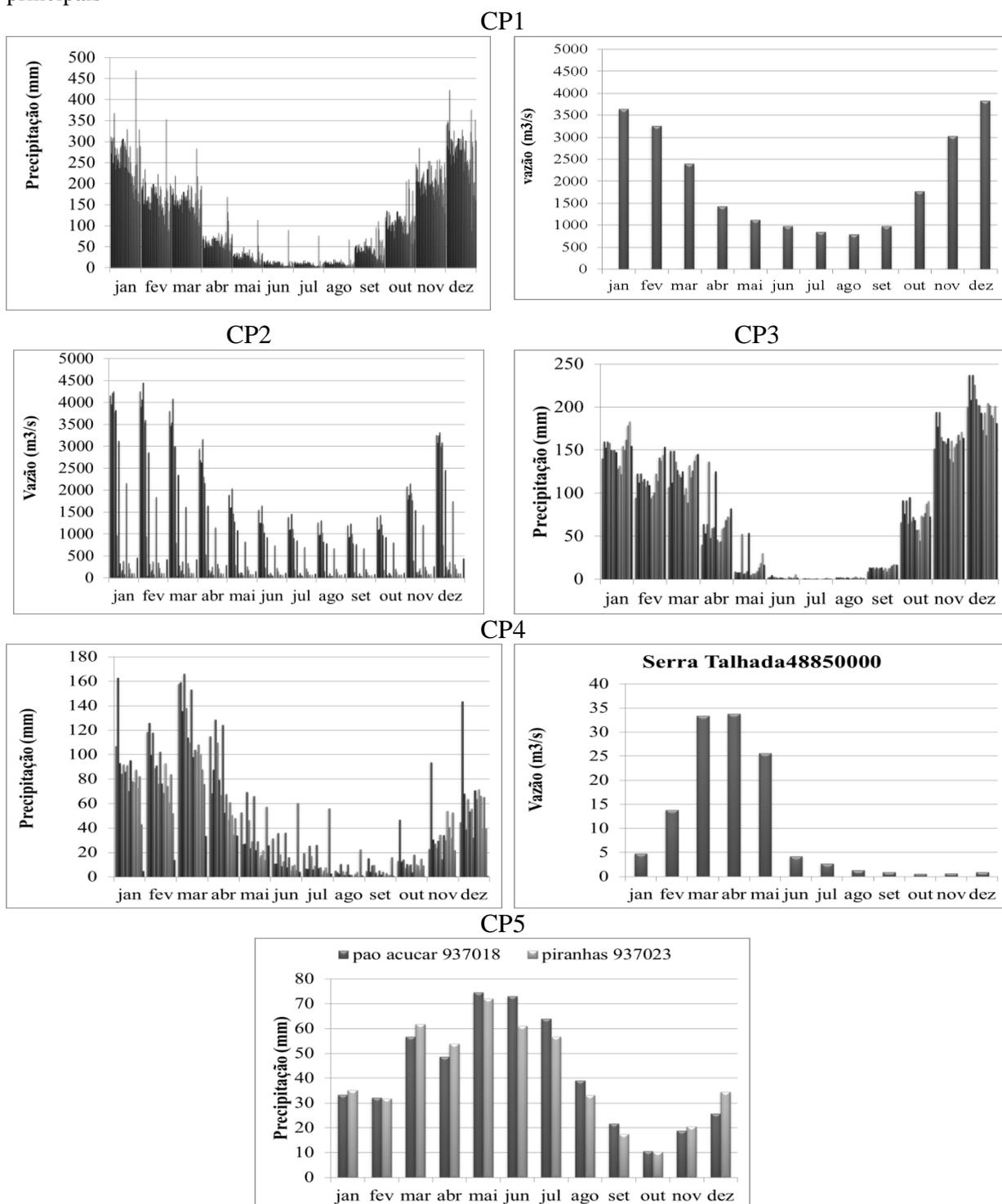
As características comuns entre as séries de precipitação que fizeram com que as estações se agrupassem na componente um, foram com relação aos períodos de maior e menor precipitação. Essas séries apresentaram período chuvoso de novembro a março, principalmente as estações pertencentes ao Alto São Francisco, as quais apresentaram maiores cargas na componente um. Os meses menos chuvosos foram maio, junho, julho e agosto. Quanto à vazão, observou-se a máxima vazão no mesmo período da estação chuvosa e, a mínima no período de menor precipitação (Figura 33a).

O principal sistema meteorológico que produz precipitação na região da CP1 é a Zona de Convergência do Atlântico Sul, então se pode nomear a componente principal um, como fator atmosférico associado à Zona de Convergência do Atlântico Sul. Portanto, na parte alta da bacia do São Francisco, o principal fator que influenciou a precipitação e a vazão foi de ordem atmosférica ou natural.

As maiores cargas observadas na segunda componente principal (CP2) que explicou aproximadamente 18% da variação dos dados, foram apenas das estações de vazão. Essa componente agregou estações de três regiões da bacia, quais sejam: Alto, Médio e Baixo São Francisco. Analisando as cargas das estações que compôs essa componente, percebeu-se que aquelas de maior contribuição foram justamente as que estão situadas no leito principal do rio São Francisco, nos municípios de Ibotirama, Serra do Ramalho, Carinhanha, Morpará, Pedra de Maria da Luz, São Francisco, dentre outras. Os postos dos quatro primeiros municípios, os quais fazem parte do Médio São Francisco e, situados no estado da Bahia, foram os que apresentaram maiores cargas.

Os postos que menos contribuíram para a CP2 foram aqueles que não estão localizados no rio São Francisco, tais como os dos municípios de Urucuia (4388000), Vargem Bonita, Formosa do rio Preto, Várzea da Palma, Coração de Jesus, dentre outras. No entanto, esses postos ficam situados próximos de usinas hidrelétricas ou próximos de polos de irrigação, como o posto de Formosa do Rio Preto que está próximo ao polo de Barreiras e a de Várzea da Palma situado no polo Belo Horizonte.

Figura 33 – Distribuição da precipitação e vazão media anual de acordo com os componentes principais



Devido os postos de vazão, que mais contribuíram para CP2, estão localizados ao longo do leito principal da bacia do São Francisco e, ficarem situadas a jusante de hidrelétricas e, também os de menores contribuição estarem próximos de polo de irrigação, o CP2 foi denominado de fator antrópico que influenciou a variabilidade da vazão ao longo da BSF.

A terceira componente principal (CP3) foi formada pelos postos de precipitação da parte central do Médio São Francisco. As séries de precipitação dessas estações mostraram que novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março correspondem aos meses chuvosos dessa região. Esse foi o mesmo período chuvoso do ASF, o que diferenciaram as duas componentes principais, são os meses de maior precipitação, que na CP3 são os meses de novembro e dezembro (Figura 33c). O período seco foi também o mesmo do ASF, de maio a setembro, no entanto esta componente apresentou os meses com menor índice de precipitação do que o observado na CP1. Dessa forma, o principal sistema atmosférico que causa precipitação na região central do Médio São Francisco foi também a Zona de Convergência do Atlântico Sul. Como mostra as Figuras 33a e 33c os dados de precipitação ocorridos no ASF são quase duas vezes os do MSF.

A componente quatro (CP4) foi formada pelas 16 estações do Submédio São Francisco, sendo que uma foi de vazão. As características comuns que as uniram nesse componente foram também os períodos chuvosos e secos.

As séries de precipitação mostram que os meses mais chuvosos foram janeiro, fevereiro, março e abril, caracterizando assim, a estação chuvosa nos municípios que esses postos representam. Percebe-se também que o mês mais chuvoso nesses 35 anos de dados, foi o mês de março. O posto fluviométrico no município de Serra Talhada seguiu o comportamento observado da precipitação, sendo que, os meses de maior vazão foram março, abril e maio, que se justifica pelo atraso inerente a vazão com relação à precipitação (Figura 35d).

Vale ressaltar que o posto de Delmiro Gouvêia apresentou carga alta tanto na CP4 quanto na CP5, como na componente quatro foi ligeiramente maior, a estação ficou na CP4. No entanto, a distribuição mensal de precipitação foi semelhante ao observado nos postos que compõem a CP5.

Na região do Submédio São Francisco, no período de maior ocorrência de precipitação, os principais sistemas que causam instabilidade são os Vórtices Ciclônicos de Ar Superior, principalmente no mês de janeiro e a Zona de Convergência Intertropical nos meses de março e abril, principalmente no mês de março. Portanto, pode-se denominar a CP4 de fator atmosférico associado à Zona de Convergência Intertropical e aos Vórtices Ciclônicos de Ar Superior, ou seja, fator atmosférico.

A quinta componente (CP5) foi constituída pelos dois postos do Baixo São Francisco, que são os do município de Pão de Açúcar e Piranhas. Cinco meses apresentam maiores índices de precipitação que foram março, abril, maio, junho e julho, sendo o mês mais

chuvoso o de maio. Os meses menos chuvosos foram setembro outubro e novembro o que caracteriza a estação seca do Baixo São Francisco (Figura 33e). Essas características são compatíveis com dois sistemas atmosféricos, a saber: Zona de Convergência Intertropical influenciando a precipitação em março e abril e as Ondas de Leste nos meses de maio, junho e julho.

Então, a CP5 pode ser designada como fator atmosférico associado as Ondas de Leste porque os meses mais chuvosos são maio e junho em Pão de Açúcar e Zona de Convergência Intertropical devido os meses mais chuvosos em Piranhas serem maio e março.

A análise da estrutura espacial dos dados de precipitação e vazão na bacia do rio São Francisco, por meio da Análise de Componentes Principal, revelou que as nove primeiras componentes principais explicaram 84,88%. Contudo, apenas as cinco primeiras foram selecionadas, os quais explicaram 82,07%, devido apresentar um padrão fisicamente mais consistente.

A primeira componente explicou 38,49% da variação dos dados de precipitação e da vazão e mostra o padrão de precipitação da parte alta da bacia. Os maiores valores totais mensais de precipitação que foram observados nessa região, chega a ser quase o dobro da segunda região mais chuvosa da bacia, que foi a do CP3 que compreende a parte central do Médio São Francisco. A CP3 explicou 12,03% da variação dos dados com apenas séries de precipitação.

Essas duas componentes (CP1 e CP3) têm o mesmo regime de precipitação e, portanto o mesmo sistema atmosférico atuante. Apesar da CP1 está misturada com postos fluviométricos, os postos que mais contribuíram para a formação dessa componente, foram os de precipitação. E juntos, essas duas componentes explicaram 50,5 % da variação dos dados, aproximadamente. Em vista disso, em termo de fator natural que influencia a precipitação e vazão na bacia do São Francisco, esta é totalmente dependente das oscilações atmosféricas que causam variabilidade na precipitação e, conseqüentemente na vazão, na parte alta da bacia. O que explica porque a ocorrência de cheias é maior na parte alta da bacia, principalmente no estado Minas Gerai, onde a taxa de urbanização é a maior da bacia, (BRASIL, 2004). Portanto, a estrutura hidroclimática da bacia do São Francisco é dependente de sistemas atmosféricos indutores de precipitação na parte alta da bacia.

4.5 Teste de Mann-Kendal

4.5.1 Precipitação

A extração de tendência via Análise Espectral Singular das séries temporais de vazão e precipitação indicou que quase todas as séries das regiões da bacia do São Francisco apresentaram tendência positiva ou negativa. Para verificar se a tendência das séries de precipitação foi significativa ou não, o teste de Mann-Kendall foi aplicado. No Alto São Francisco (Tabela 9), das quarenta e três estações, vinte e sete apresentou tendência positiva, no entanto, em apenas duas delas foi significativa no nível de 0,05 e 0,01 as do município de Baldim e Onça de Pitangui, respectivamente. Dezesesseis estações mostraram tendência negativa sendo que apenas em duas foi significativa as quais ficam situadas nos municípios de Várzea da Palma (nível de significância de 0,01) e Presidente Juscelino (nível de significância de 0,05).

Tabela 9 - Teste de Mann-Kendall dos postos de precipitação no Alto São Francisco. Preenchimento preto nível de significância para o posto que apresentou tendência significativa.

Município	Z	$\alpha=0,10$	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$	Período
Várzea da Palma	-5,212				1941-2010
Gouvêia	-1,506				1941-2010
Presidente Juscelino	-2,2				1941-2010
Presidente Juscelino	1,386				
Presidente Juscelino	-0,419				1974-2010
Santo Hipólito	1,242				1941-2010
Serra da Saudade	-0,548				1941-2010
São Gonçalo do Abaeté	0,529				1959-2010
Tiros	0,039				1959-2010
Tiros	-0,537				1959-2010
Patos de Minas	0,379				1959-2010
Sabará	-0,228				1941-2010
Belo Horizonte	-0,74				1941-2010
Belo Horizonte	0,362				1962-2010
Taguaçu de Minas	1,004				1941-2010
Santana do Riacho	-0,172				1956-2010
Baldim	2,083				1975-2010
Betim	1,185				1941-2010
Vespasiano	1,065				1941-2010
Lagoa Santa	0,432				1974-2010
Florestal	1,683				1941-2010
Pedro Leopoldo	0,319				1941-2010
Paraopeba	0,388				1962-2010

continua

Tabela 9 - Teste de Mann-Kendall dos postos de precipitação no Alto São Francisco. Preenchimento preto nível de significância para o posto que apresentou tendência significativa.

Município	Z	$\alpha=0,10$	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$	Período
Onça de Pitangui	3,022				1941-2010
Santana de Pirapama	0,422				1958-2010
Jequitibá	-0,234				1961-2010
Bom Despacho	0,183				1941-2010
Dores do Indaiá	0,055				1959-2010
Nova Lima	-1,47				1855-2010
Nova Lima	-0,598				1941-2010
Congonhas	-1,227				1941-2010
Carmo do Cajuru	-0,902				1941-2010
Divinópolis	0,634				1941-2010
Entre Rios de Minas	0,065				1974-2010
Itaúna	1,237				1941-2010
Itaúna	0,245				1975-2010
Itaúna	0,51				1974-2010
BambuÍ	0,253				1941-2010
BambuÍ	1,645				1941-2010
Iguatama	1,369				1941-2010
Piumhi	-0,613				1975-2010
Vargem Bonita	1,294				1975-2010

A precipitação no Médio São Francisco apresentou tendência positiva e significativa em duas estações, das quinze que apresentaram tendência positiva. Vinte quatro estações mostram tendência de precipitação negativa.

No Submédio onze municípios tiveram tendência crescente nos índices de precipitação, porém apenas em duas foi significativa. Três estações dessa região apresentaram tendência negativa e significativa. Nas duas estações do Baixo São Francisco a tendência dos dados de precipitação foi positiva, porém apenas na estação de Pão de Açúcar a tendência foi significativa.

Na região Nordeste do Brasil, Da Silva e De Souza (2013) identificaram tendência negativa de precipitação no norte do estado de Alagoas em direção ao estado de Pernambuco. Assis et al. (2013) observam tendência negativa de precipitação no sertão de Pernambuco. Na bacia hidrográfica do rio Pajeú, Lacerda et al. (2009) também perceberam declínio nos dados de precipitação. Assim como Souza e Da Silva (2013) para a bacia do rio Jaguaribe

Tabela 10 - Teste de Mann-Kendall dos postos de precipitação no Médio São Francisco. Preenchimento preto nível de significância para o posto que apresentou tendência significativa

Município	Z	$\alpha=0,10$	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$	Período
Mansidão	-0,583				1937-2010
Santa Rita de Cássia	-0,308				1912-2010
Formosa do Rio Preto	0,316				1942-2010
Formosa do Rio Preto	3,155			■	1964-2010
São Desidério	-1,685	■			1973-2010
São Desidério	-0,605				1972-2010
Santana	-2,035		■		1937-2010
Coribe	-0,254				1972-2010
Correntina	-0,29				1972-2010
Santa Maria da Vitória	0,033				1745-2010
Manga	-0,747				1937-2010
Manga	-0,941				1967-2010
Manga	-0,809				1963-2010
Carinhanha	-0,668				1912-2010
Palma de Monte Alto	-1,639				1912-2010
Montalvânia	0,886				1947-2010
Montalvânia	-1,379				1972-2010
Cocos	-0,458				1947-2010
Itacarambi	-0,885				1975-2010
São Francisco	-0,499				1937-2010
São Francisco	-0,454				1965-2010
Janaúba	-0,46				1972-2010
Varzelândia	0,473				1965-2010
Buritis	1,06				1962-2010
Cabeceiras	1,059				1974-2010
Brasília de Minas	0,589				1974-2010
São Romão	1,026				1953-2010
São Romão	-1,456				1953-2010
São Romão	-1,733				1962-2010
Santa Fé de Minas	0,59				1953-2010
Buritizeiro	0,847				1972-2010
Buritizeiro	0				1975-2010
Buritizeiro	0,331				1965-2010
Unaí	-0,284				1965-2010
Unaí	-0,144				1974-2010
João Pinheiro	-1,577				1962-2010
João Pinheiro	-0,69				1972-2010
João Pinheiro	2,407		■		1972-2010
Presidente Olegário	0,181				1972-2010
Presidente Olegário	-0,513				1959-2010

Tabela 11 - Teste de Mann-Kendall dos postos de precipitação no Submédio São Francisco. Preenchimento preto nível de significância para o posto que apresentou tendência significativa

Município	Z	$\alpha=0,10$	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$	Período
Afogados da Ingazeira	3,525				1914-2010
Flores	-2,047				1912-2010
Serra Talhada	0,327				1975-2010
Floresta	1,888				1935-2010
Floresta	-0,736				1975-2010
Belém de São Francisco	3,58				1947-2010
Mirandiba	-2,018				1963-2010
Parnamirim	-0,116				1963-2010
Parnamirim	0,232				1965-2010
Santa Maria da Boa Vista	0,613				1975-2010
Santa Maria da Boa Vista	-6,165				1941-2010
Abaré	1,844				1978-2010
Curuçá	1,038				1977-2010
Delmiro Gouvêia	0,327				1975-2010
Juazeiro	-0,014				1975-2010
Juazeiro	1,21				1924-2010
Juazeiro	-0,101				1973-2010
Juazeiro	1,348				1975-2010

Tabela 12 - Teste de Mann-Kendall dos postos de precipitação no Baixo São Francisco. Preenchimento preto nível de significância para o posto que apresentou tendência significativa

Município	Z	$\alpha=0,10$	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$	Período
Pão de Açúcar	1,816				
Piranhas	0,74				

4.5.2 Vazão

Os dados de vazão evidenciaram que no Alto São Francisco, das sete estações, cinco apresentaram tendência positiva nos dados de vazão, sendo que em apenas uma, a estação de Augusto Lima, a tendência foi estatisticamente significativa. As estações de Várzea da Palma e Claro dos Porções mostraram tendência decrescentes. Mas apenas no primeiro município o decréscimo foi significativo (Tabela 13).

Das vinte e nove estações de vazão do Médio São Francisco (Tabela 14), seis indicaram tendência positiva, porém em duas, ela foi significativa. As estações restantes, vinte e três, a tendência foi negativa e, em sete dessas estações, a tendência foi significativa. No Submédio (Tabela 15), as duas estações analisadas, as de Serra Talhada e Juazeiro, indicaram tendência decrescente, sendo que na última foi significativa. Nos municípios de Pão de Açúcar e Traipu (Tabela 16), a tendência nos dados de vazão, também foi negativa, no entanto, apenas no segundo município foi significativa. Portanto, na bacia do rio São Francisco, há

tendência positiva de vazão na parte alta da bacia e tendência negativa nas demais regiões. Além das regiões do Médio, Submédio e Baixo São Francisco manifestarem tendência negativa nos dados de vazão.

Tabela 13 - teste de Mann-Kendall dos postos fluviométricos do Alto São Francisco. Preenchimento preto nível de significância para a estação que apresentou tendência significativa.

Município	código	Z	$\alpha=0,10$	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$	Período
Vargem Bonita	4025000	1,33				1938-2010
Várzea da Palma	41990000	-2,186				1938-2010
Santo Hipólito	41818000	0,164				1962-2010
Cordisburgo	41600000	1,496				1969-2010
Nova Lima	41199998	1,144				1973-2010
Claro dos Poções	42100000	-0,471				1974-2010
Augusto Lima	41890000	2,081				1972-2010
Coração de Jesus	42187000	-3,858				1974-2010
Buritizeiro	42210000	0,134				1959-2010
Guarda-Mor	42250000	-1,823				1974-2010
Paracatu	424350000	-1,512				1966-2010
Paracuru	42257000	-1,423				1977-2010
Paracuru	42395000	-2,37				1966-2010
Unai	42490000	-0,89				1966-2010
Unai	42540000	-0,89				1966-2010
Santa Fé de Minas	42980000	0,007				1954-2010

Tabela 14 Teste de Mann-Kendall dos postos de fluviométricos do Médio São Francisco. Preenchimento preto nível de significância para a estação que apresentou tendência significativa.

Município	código	Z	$\alpha=0,10$	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$	Período
Juvenília	45260000	-5,111				1963-2010
Carinhanha	45298000	-1,633				1938-2010
Serra do Ramalho	45480000	-0,395				1944-2010
Ibotirama	46150000	-0,613				1954-2010
Morpará	46360000	-1,039				1954-2010
Cotegipe	46675000	-0,44				1964-2010
Formosa do Rio Preto	46770000	-4,307				1972-2010
Formosa do Rio Preto	46790000	0,803				1942-2010
Santa Rita de Cássia	46830000	2,685				1940-2010
Mansidão	46902000	2,551				1934-2010

continua

Tabela 14 - teste de Mann-Kendall dos postos fluviométricos do Médio São Francisco. Preenchimento preto nível de significância para a estação que apresentou tendência significativa.

Município	código	Z	$\alpha=0,10$	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$	Período
São Romão	43200000	1,205				1954-2010
Buritis	43300000	-1,426				1974-2010
Urucuaia	43670000	-1,737				1968-2010
Urucuaia	4388000	-1,707				1963-2010
São Francisco	442000	-0,009				1934-2010
Januária	44250000	-4,617				1974-2010
Pedras de Maria da Cruz	44290002	-1,232				1973-2010
Manga	44540000	-2,37				1975-2010
Manga	4450000	-0,635				1937-2010
Jaíba	44670000	-1,244				1963-2010
Montalvânia	45131000	-2,729				1947-2010

Tabela 15 Teste de Mann-Kendall dos postos fluviométricos do Submédio São Francisco. Preenchimento preto nível de significância para a estação que apresentou tendência significativa.

Município	código	Z	$\alpha=0,10$	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$	Período
Juazeiro	48020000	-3,374				1928-2010
Serra Talhada	48850000	-1,291				1964-2010

Tabela 16 Teste de Mann-Kendall dos postos fluviométricos do Baixo São Francisco. Preenchimento preto nível de significância para a estação que apresentou tendência significativa.

Município	código	Z	$\alpha=0,10$	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$	Período
Pão de Açúcar	4937000	-3,421				1928-2010
Traipu	49660000	-3,292				

5. CONCLUSÕES

O método de regressão linear múltipla foi eficiente no preenchimento dos postos com dados faltosos tanto para a precipitação quanto para a vazão. No entanto, deve-se levar em consideração que os postos de precipitação estejam na mesma latitude. Se o município apresentar uma grande extensão territorial é até preferível que seja usado postos de município vizinho ao invés do mesmo município, mas que esteja na mesma latitude para que o modelo de regressão represente melhor a variabilidade dos dados. A consistência dos dados, por meio do método de dupla massa, apresentou coeficiente de correlação acima de 0,98 indicando a boa homogeneidade das séries de vazão e precipitação e também do preenchimento dos dados faltantes.

A extração do componente de tendência dos dados de precipitação revelou que a precipitação na bacia do São Francisco tende a aumentar no Alto São Francisco o que pode ocasionar mais eventos de enchentes, uma vez que é a região mais antropizada da bacia do São Francisco. Por outro lado, no Médio São Francisco há indicativo que poderá ficar mais seco devido a maioria das séries de precipitação indicar tendência negativa, porém quando aplicou o teste de Mann-Kendall apenas em Santana a tendência negativa foi significativa. Situação contrária foi observada no Submédio São Francisco grande parte dos postos pluviométricos indica tendência positiva de precipitação, mas o teste de Mann-Kendall indicou que apenas em dois municípios essa tendência positiva foi significativa. Tanto a Análise Espectral Singular quanto o teste de Mann-Kendall apontam que não há uma mudança climática na bacia associada ao aquecimento global e sim uma mudança climática inerente as características locais uma vez que postos de precipitação de um mesmo município ou postos de municípios de locais próximos revelaram tendências opostas, isto é, enquanto um mostrava tendência positiva o outro indicava tendência negativa de precipitação. A extração dos componentes de tendência das séries de vazão pela metodologia da SSA indicou tendência negativa de vazão ao longo da bacia do rio São Francisco. Quando aplicado o método de Mann-Kandel nos dados de vazão grande parte dos postos fluviométricos apresentaram tendência negativa e significativa.

Foram detectados modos de escala temporal intrasazonal, interanual e decadal nas séries de precipitação da bacia. Na parte alta da bacia os principais modos oscilatórios são da escala intrasazonal sendo o principal modo o de 12 meses seguido pelo de seis meses com influência de fenômenos de escala interanual com ciclo entre, principalmente, de 18 a 20 meses. No Médio São Francisco as oscilações dominantes são da escala intrasazonal, no entanto essas oscilações são moduladas pelas escalas intrasazonal e decadal. Já o Submédio

São Francisco apresentou séries de precipitação como terceiro modo oscilatório dominante na escala interanual com período acima de três anos. No Baixo São Francisco a escala temporal dominante foi a intrasazonal. Assim, a parte alta da bacia recebe mais precipitação porque os fenômenos que produzem precipitação têm escala temporal menor do que aqueles que causam precipitação no Médio e Submédio São Francisco podendo essas duas regiões experimentar períodos úmidos ou secos maiores do que a região do Alto São Francisco. A previsão e monitoramento desses fenômenos deverão ajudar diversos setores da sociedade como nos recursos hídricos e agricultura, principalmente a de subsistência.

Nos dados de vazão do Alto São Francisco a escala oscilatória predominante foi intrasazonal, todavia, ciclos com escala interanual como quatro e cinco anos foram observados além da escala decadal. O principal modo oscilatório da vazão do Médio São Francisco foi de 12 meses, mas foi à região da bacia que mais apresentou postos fluviométrico com modos oscilatórios dominantes na escala decadal e depois a interanual com ciclo de quatro anos. Isto é, a variabilidade da vazão do Médio São Francisco foi dominada por fenômenos da escala decadal. A extração dos principais modos oscilatórios das séries fluviométricas indicou que a vazão do Submédio e Baixo São Francisco são influenciadas pelas escalas temporais de um e quatro anos.

A análise da estrutura espacial das séries de precipitação e vazão por meio da Análise de Componentes Principais indica que a variabilidade da precipitação na bacia do rio São Francisco foi influenciada pelo fator atmosférico ou natural. Enquanto que a variação da vazão foi influenciada por fator antrópico nas regiões do Médio, Submédio e Baixo São Francisco. No Alto e Submédio São Francisco a vazão tem como principal causa de variabilidade os sistemas atmosféricos.

6. REFERÊNCIAS

- ABREU, M. L., 1998: Climatologia da Estação Chuvosa de Minas Gerais: de Nimer (1977) à Zona de Convergência do Atlântico Sul, *Revista Geonomos*, Belo Horizonte, MG, v. 6, pág. 9-16.
- ABREU SÁ, L. D.; SAMBATTI, S. B. M.; GALVÃO, G. P. Ondeleita de Morlet aplicada ao estudo da variabilidade do nível do rio Paraguai em Ladário, MS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 13, p. 1775-1785, 1998.
- AGUADO, E. et al. Climatic fluctuations and the timing of West Coast streamflow. **Journal of Climate**, v. 5, n. 12, p. 1468-1483, 1992.
- AGUADO, E. et al. Climatic fluctuations and the timing of West Coast streamflow. **Journal of Climate**, v. 5, n. 12, p. 1468-1483, 1992.
- ALEXANDRE, G. R. **Estudo para identificação de tendência do regime pluvial na região metropolitana de Belo Horizonte a partir de métodos estatísticos e modelos climáticos**. p.215. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.
- ALLEN, M. R.; SMITH, L. A. Monte Carlo SSA: Detecting irregular oscillations in the presence of colored noise. **Journal of Climate**, v. 9, n. 12, p. 3373-3404, 1996.
- ARAGÃO, J. O. R.. O impacto do ENSO e do Dipolo do Atlântico no Nordeste do Brasil. **Bull. Inst. fr. études andines**, v. 27, n. 3, p. 839-844, 1998.
- ARAGÃO, J.R. Um estudo da estrutura das perturbações sinóticas do nordeste do Brasil, 1975. p.214. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas, especialidade em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- BARNETT, T. P. et al. Human-induced changes in the hydrology of the western United States. **science**, v. 319, n. 5866, p. 1080-1083, 2008.
- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: **Hidrologia: ciências e aplicação**. TUCCI, C. E. M (org.). Porto Alegre, UFRGS, 2007.
- BRASIL. Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional. **Consolidação dos Estudos Ambientais**. IBAMA, 2002.
- BRASIL. Subprojeto 2.2.C –**Análise multitemporal da dinâmica de alteração da conformação do leito do São Francisco-trecho Médio**. In projeto de gerenciamento integrado das Atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco. Brasília, 2003.
- BRASIL. Subprojeto 4.5B –**Formulação de um programa de gerenciamento integrado da bacia do rio São Francisco**. In projeto de gerenciamento integrado das Atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco. Brasília, 2003.

BRASIL. Subprojeto 4.5C – Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco-PBHSF (2004-2013). In projeto de gerenciamento integrado das Atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco. Brasília, 2004.

BROOMHEAD, D. S.; KING, G. P. Extracting qualitative dynamics from experimental data. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 20, n. 2, p. 217-236, 1986a.

BROOMHEAD, D. S.; KING, G. P. On the qualitative analysis of experimental dynamical systems. **Nonlinear Phenomena and Chaos**, v. 113, p. 114, 1986b.

BROOMHEAD, D. S.; KING, G. P. On the qualitative analysis of experimental dynamical systems. *Nonlinear Phenomena and chaos*, Sarkar S (Ed.), Adam Hilger, Bristol, 113-144, 1986b.

BROWN, A. E. et al . A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. **Journal of hydrology**, v. 310, n. 1, p. 28-61, 2005.

BURIOL, G. A. et al. Homogeneidade e estatísticas descritivas dos totais mensais e anuais de chuva de Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 4, p. 89-97, 2006.

CARVALHO, J. R. P; ASSAD, E. D. Análise espacial da precipitação pluviométrica no Estado de São Paulo: comparação de métodos de interpolação. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 377-384, 2005.

CAVALCANTI, I. F. A.; ROWNTREE, P. A Zona de Convergência do Atlântico Sul no modelo climático do Hadley Centre. In **X Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 25-30 de outubro de 1998 – Brasília.

Cavalcanti, I. F. A.; ROWNTREE, P.A. A Zona de Convergência do Atlântico Sul no Modelo climático do Hadley centre . In CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10, 1998, Brasília. **Anais eletrônicos**.Brasília, 1998.

CHAN, C.S. Análise de distúrbios ondulatórios de leste sobre o oceano Atlântico equatorial sul. 1990. p.134. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

COELHO, C.A.S.; DRUMOND, A. R.M.; AMBRIZZI, T. Estudos climatológicos da precipitação sobre o Brasil em episódios extremos da oscilação sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.14, n.1, p. 49-65, 1999. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2008WAF2222155.1>

COUTINHO, M. D. L.; COUTINHO, M. D. L.; BRITO, J. I. B. Análise de componentes principais com dados pluviométricos no estado do Ceará. In: Congresso Brasileiro de meteorologia, XVI, 2010, Belém. **Anais do XVI CBMET, 2010**.

CUNHA, T. J. F. C. et al. **Solos do Submédio do vale do São Francisco. Potencialidades e limitações para uso agrícola**. Embrapa Semi-árido, Petrolina, 2008.

DA SILVA, D. F.; DE SOUSA, A. B. Detecção de Tendências Climáticas no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 3, p. 442-455, 2013.1.

DA SILVA, D. F.; MOLION, L. C. B. Influência da variabilidade climática interanual na hidrologia da bacia do rio São Francisco. In: Anais eletrônico do **XV Congresso Brasileiro de Meteorologia**, São Paulo. 2008.

DA SILVA, D. F. Influência da variabilidade climática interanual na hidrologia da bacia do rio São Francisco. **Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Meteorologia)**, Universidade Federal de Alagoas–UFAL, 2003.

DA SILVA, D. F., BRITO, J. B. Variabilidade do vento na bacia hidrográfica do rio São Francisco durante a ocorrência da ZCAS. **AMBIÊNCIA**, v. 4, n. 2, p. 221-235, 2009.

DA SILVA, D.F. Influência interdecadal (ODP e OMA) nas cotas do rio São Francisco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 6, p. 1529-1538, 2013.

DESTRO, C. A. M.; LIMA, G. Al. R.; ZEILHOFER, P. **Análise de Séries Temporais de Vazão Média Mensal do Rio Cuiabá Através do Método de Análise de Espectro Singular**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. V.12, n. 2, p.111-120, 2012.

DESTRO, C. A. M. Séries Temporais de Variáveis Ambientais: análise, preenchimento e previsão utilizando o Método de Análise de Espectro Singular. p.102. Dissertação mestrado (mestrado Recursos Hídricos Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos). Universidade Federal de Matogrosso. Cuiabá, 2010.

DETTINGER, M. D.; DIAZ, H. F. Global characteristics of stream flow seasonality and variability. **Journal of Hydrometeorology**, v. 1, n. 4, p. 289-310, 2000.

DETTINGER, Michael D. et al. North--South Precipitation Patterns in Western North America on Interannual-to-Decadal Timescales. **Journal of Climate**, v. 11, n. 12, 1998.

DUNTEMAN, G. H. **Principal components analysis**. Iowa.Sage, 1989.

ESPINOZA, E. S. Distúrbios Ondulatórios de Leste na região. **Tropical.Climanalise Especial**, v. 10.

Espinoza, E. S., 1996: Distúrbios nos Ventos de Leste no Atlântico Tropical. INPE, São José dos Campos. 123.

ESQUIVEL, R. M. **Análise espectral singular: modelagem de séries temporais através de estudos comparativos usando diferentes estratégias de previsão**. 2012. p.174. Dissertação (Mestrado em Modelagem computacional e Tecnologia Industrial). SENAI CIMATEC, Salvador.

ESTEBAN, P.; MARTIN-VIDE, J.; MASES, M. Daily atmospheric circulation catalogue for Western Europe using multivariate techniques. **International Journal of Climatology**, v. 26, n. 11, p. 1501-1515, 2006..

FECHINE, J. A. L. Análise estatística dos impactos do clima na bacia hidrográfica do rio Brígida-PE.131p. Tese doutorado (Doutorado em Ciências Geográficas). Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2012.

FECHINE, J. A. L.; GALVÍNCIO, J. D. Tendência das precipitações na bacia hidrográfica do rio Brígida–estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia física**, v. 2, n. 2, p. 01-10, 2009.

FERRARI, A. **Variabilidade de tendências da temperatura e pluviosidade nos municípios de Pirassununga, Rio Claro, São Carlos e São Simão (SP): estudo sobre mudança climática de curto prazo em escala local**. p.172. Tese doutorado (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental). Universidade de São Paulo. São Carlos, 2012.

FIELD, A. **Descobrimo a estatística usando o SPSS**. Ed. 2ª. Bookman, 2009.

FONTES, L. C. S. O rio São Francisco após as grandes barragens. Mudanças recentes no regime hidrosedimentológico e na dinâmica fluvial do baixo curso. In Lucas Netto (orgs). **Águas do São Francisco**. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, 2011. V.1, p.127-146.

FRAGOSO, M.; GOMES, P. T.. Classification of daily abundant rainfall patterns and associated large-scale atmospheric circulation types in Southern Portugal. **International journal of climatology**, v. 28, n. 4, p. 537-544, 2008.

GALVÍNCIO, J. D. Impactos dos eventos El Niño na precipitação da Bacia do rio São Francisco.117p. Dissertação de Mestrado (mestrado em Meteorologia) Universidade Federal da Paraíba .Campina Grande, 2000.

GAN, M.; KOUSKY, V. E.. Vórtices ciclônicos da alta troposfera no Oceano Atlântico Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 1, n. 92.651, p. 19-28, 1986.

GHIL, M., Allen, M. R., Dettinger, M. D., Ide, K., Kondrashov, D., Mann, M. E., Robertson, A. W., Saunders, A., Tian, Y., Varadi, F., and Yiou, P.: Advanced spectral methods for climatic time series, *Rev. Geophys.*, 40, 1003, doi:10.1029/2000RG000092, 2002.

GHIL, M.; TARICCO, C. Advanced spectral analysis methods. **Past and present variability of the solar-terrestrial system: measurement, data analysis and theoretical models**, p. 137-159, 1997.

GOCHIS, D. J. et al. Spatial and temporal patterns of precipitation intensity as observed by the NAME event rain gauge network from 2002 to 2004. **Journal of climate**, v. 20, n. 9, 2007.

GOLYANDINA, N. On the choice of parameters in Singular Spectrum Analysis and related subspace-based methods. **arXiv preprint arXiv:1005.4374**, 2010.

GOLYANDINA, N.; NEKRUTKIN, V.; ZHIGLJAVSKY, A. A. **Analysis of time series structure: SSA and related techniques**. CRC Press, 2001.

GOLYANDINA, N.; OSIPOV, E. The “Caterpillar”-SSA method for analysis of time series with missing values. **Journal of Statistical planning and Inference**, v. 137, n. 8, p. 2642-2653, 2007.

GROPPO, J. D. et al. Análise de séries temporais de vazão e precipitação em algumas bacias do Estado de São Paulo com diferentes graus de intervenções antrópicas. **Geociências**, v. 24, n. 2, p. 181-192, 2005.

GUEDES, R. S. et al. Análise em componentes principais da precipitação pluvial no estado do Piauí e agrupamento pelo método de Ward. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 27, n. 1, p. 218-233, 2010.

HAIR, J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. Ed. 5ª. Bookman, 2005.

HAO, X.; CHEN, Y.; LI, W. Impact of anthropogenic activities on the hydrologic characters of the mainstream of the Tarim River in Xinjiang during the past 50 years. **Environmental geology**, v. 57, n. 2, p. 435-445, 2009.

HASSANI, H.; SOOFI, A. S.; ZHIGLJAVSKY, A. A. Predicting daily exchange rate with singular spectrum analysis. **Nonlinear Analysis: Real World Applications**, v. 11, n. 3, p. 2023-2034, 2010.

HOREL, J. D.; HAHMANN, A. N.; GEISLER, J. E. An investigation of the annual cycle of convective activity over the tropical Americas. **Journal of Climate**, v. 2, n. 11, p. 1388-1403, 1989.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Bacia hidrográfica do rio São Francisco**. Estudo faz diagnóstico socioeconômico da bacia hidrográfica do rio São Francisco, 2009. Disponível em: <http://saladeimprensa.ibge.gov.br/noticias>: Acesso em: 20 de outubro de 2012.

IONITA, M.; RIMBU, N.; LOHMANN, G. Decadal variability of the Elbe River streamflow. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 1, p. 22-30, 2011.

JAYAWARDENE, H. K. W. I.; SONNADARA, D. U. J.; JAYEWARDENE, D. R. Spatial interpolation of weekly rainfall depth in the dry zone of Sri Lanka. **Climate Research**, v. 29, n. 3, p. 223, 2005.

JOLLIFFE, I. T. **Principal component analysis**. Ed. 2ª. New York; Springer-Verlag, 2002.

JONES, J. A. Hydrologic responses to climate change: considering geographic context and alternative hypotheses. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 12, p. 1996-2000, 2011.

KOSTOPOULOU, E.; JONES, P. D. Comprehensive analysis of the climate variability in the eastern Mediterranean. Part I: map-pattern classification. **International journal of climatology**, v. 27, n. 9, p. 1189-1214, 2007.

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

KOUSKY, V. E.; GAN, M. A.. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. **Tellus**, v. 33, n. 6, p. 538-551, 1981.

KUMAR, M.; DUFFY, C. J. Detecting hydroclimatic change using spatio-temporal analysis of time series in Colorado River Basin. **Journal of hydrology**, v. 374, n. 1, p. 1-15, 2009.

LAJOIE, F. et al. Impacts of dams on monthly flow characteristics. The influence of watershed size and seasons. **Journal of hydrology**, v. 334, n. 3, p. 423-439, 2007.

LAMBIN, E. F.; GEIST, H. J.; LEPEERS, E. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. **Annual review of environment and resources**, v. 28, n. 1, p. 205-241, 2003.

LANDIM, P. M. B. Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas. **DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto Didático**, v. 2, p. 20, 2000.

LOBO, P.R.V. **Um estudo climatológico da zona de convergência intertropical (ZCIT) e sua influência sobre o nordeste do Brasil**. 1982. p.93. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

MARENGO, J. A.; et al. **Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro**. Campina Grande, 2011.

MELO JÚNIOR, J. C. F. et al. Determinação de regiões homogêneas quanto à distribuição de frequência de chuvas no leste do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 408-416, 2006.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. Qualidade da água em bacias hidrográficas rurais: um desafio atual para a sobrevivência futura. **Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável**, v. 3, n. 4, p. 33-38, 2002.

MOROCO, J. **Análise Estatística com Utilização do SPSS**. Ed. 3^a. Lisboa; Sílabo, 2007.

MOTA, G. V.; GANDU, A. W.. Análise de distúrbios ondulatórios de leste que afetam o Nordeste brasileiro: um estudo de caso. In: **Anais do IX Congresso Brasileiro de Meteorologia, Campos do Jordão (SP)**. 1996. p. 450-454.

MOURA, A. D.; SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulation model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 38, n. 12, p. 2653-2675, 1981.

MYUNG, N K. **Singular Spectrum Analysis**. 2009. Tese de Doutorado. University of California, Los Angeles.

NIMER, E., 1989: Climatologia do Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, RJ; 421 p.

O'DRISCOLL, M. et al. Urbanization effects on watershed hydrology and in-stream processes in the southern United States. **Water**, v. 2, n. 3, p. 605-648, 2010.

PAEGLE, J. N.; BYERLE, L. A.; MO, Kingtse C. Intraseasonal modulation of South American summer precipitation. **Monthly Weather Review**, v. 128, n. 3, 2000.

PEREIRA, N.J.; SANCHES, M.; SILVA DIAS, M.A.F. Composição da zona de convergência do atlântico sul em períodos de el niño e la niña. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.19, n.1, p. 89-98, 2004.

PINHEIRO, K. S. F. et al. Caracterização espaço-temporal da precipitação efetiva e do índice de aridez na bacia hidrográfica do Riacho da Boa Hora, Urbano Santos-MA. **XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil**, 2005.

PHILANDER, S.G. **El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation**. Academic Press, INC, 19898.

QUADRO, M. F. L; ABREU, M. L. 1994: Estudo de Episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul sobre a América do Sul. **Anais do VIII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Belo Horizonte, MG, 18 a 25 de Outubro, v. 2, 620-623.

QUADRO, M.F.L. et al. Análise climatológica da precipitação e do transporte de umidade na região da ZCAS através da nova geração de reanálises. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n.2. p. 152-162, 2012.

RAO, B V.; LIMA, M. C.; FRANCHITO, S. H. Seasonal and interannual variations of rainfall over eastern northeast Brazil. **Journal of Climate**, v. 6, n. 9, p. 1754-1763, 1993.

RAYNE, S.; FOREST, K. Temporal trends in annual water yields from the Mackenzie, Saskatchewan-Nelson, Churchill, and Missouri-Mississippi River watersheds in western and northern Canada. **Nature Precedings**, 2010.

RENTSCH, A. **Effects of Land Use Change on Streamflow: An Evaluation of the Salt River Basin, Kentucky**. 2011. Tese de Doutorado. UNIVERSITY OF WISCONSIN.

REZENDE, M. L. et al. Utilização da análise fatorial para determinar o potencial de crescimento econômico em uma região do sudeste do Brasil. **Economia e Desenvolvimento**, n. 19, 2007.

RICHMAN, M. B. Rotation of principal components. **Journal of climatology**, v. 6, n. 3, p. 293-335, 1986.

ROBERTSON, A. W.; MECHOSO, C. R. Circulation regimes and low-frequency oscillations in the South Pacific sector. **Monthly weather review**, v. 131, n. 8, 2003.

ROMERO, R. et al. A 30-year (1964-1993) daily rainfall data base for the Spanish Mediterranean regions: First exploratory study. **International Journal of Climatology**, v. 18, n. 5, p. 541-560, 1998.

SÁ, I. B. et al. Mapeamento e caracterização da cobertura vegetal Bacia Hidrográfica do São Francisco. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 14. Natal. Anais eletrônico São José dos Campos, 2009. p. 6305-6312.

SALTON, J. F. T. Mapeamento pluviométrico da região hidrográfica do rio Uruguai. 2012. p.97. Trabalho Conclusão de Curso. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo.

SCHOELLHAMER, D. H. Singular spectrum analysis for time series with missing data. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 16, p. 3187-3190, 2001.

SHARMA, S. **Applied multivariate techniques**. John Wiley & Sons, 1996.

SINGER, M. B. The influence of major dams on hydrology through the drainage network of the Sacramento River basin, California. **River Research and Applications**, v. 23, n. 1, p. 55-72, 2007.

SIQUEIRA, J. R.; MACHADO, L. A. T.. Influence of the frontal systems on the day-to-day convection variability over South America. **Journal of Climate**, v. 17, n. 9, 2004.

SOUSA, A.; DA SILVA, D. F. Causas climáticas da variabilidade pluviométrica e tendências climáticas na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe (CE). **Caminhos de Geografia**, v. 14, n. 46, 2013.

SULTAN, B.; JANICOT, S. CORREIA, C. Medium Lead-Time Predictability of Intraseasonal Variability of Rainfall in West Africa. **Weather & Forecasting**, v. 24, n. 3, 2009.

SULTAN, B.; JANICOT, S.; CORREIA, C. Medium Lead-Time Predictability of Intraseasonal Variability of Rainfall in West Africa. **Weather & Forecasting**, v. 24, n. 3, 2009.

TABACHNICK, B. G.; FIDELL, L. S. **Using multivariate statistics**. Pearson, 2002.

TALI, P. A. S.; KANTH, T. A. **Land use/Land cover Change and its Impact on Flood Occurrence: A Case Study of Upper Jhelum Floodplain**. 2012. Tese de Doutorado.

TEIXEIRA, R. F.B. O fenômeno da brisa e sua relação com a chuva sobre Fortaleza-CE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 3, p. 282-291, 2008.

TOMER, M. D.; SCHILLING, K. E. A simple approach to distinguish land-use and climate-change effects on watershed hydrology. **Journal of hydrology**, v. 376, n. 1, p. 24-33, 2009.

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

- UVO, C. B. et al. The relationships between tropical Pacific and Atlantic SST and northeast Brazil monthly precipitation. **Journal of Climate**, v. 11, n. 4, 1998.
- VANZELA, L. S.; HERNANDEZ, F. B T; FRANCO, R. A. M. Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do Córrego Três Barras, Marinópolis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 55-64, 2010.
- VAREJÃO-SILVA, M. A. Meteorologia e Climatologia. Recife, 2006. Versão digital 2. 463 p.
- VAUTARD, R.; GHIL, M. Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 35, n. 3, p. 395-424, 1989.
- VAUTARD, R.; YIOU, P.; GHIL, M. Singular-spectrum analysis: A toolkit for short, noisy chaotic signals. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 58, n. 1, p. 95-126, 1992.
- VITOUSEK, P. M. et al. Human domination of Earth's ecosystems. **Science**, v. 277, n. 5325, p. 494-499, 1997.
- WANG, D. et al. Climate change impact on meteorological, agricultural, and hydrological drought in central Illinois. **Water Resources Research**, v. 47, n. 9, 2011.
- WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. Ed. 2^a. Academic press, 2006.
- XU, Z. et al. Trends of major hydroclimatic variables in the Tarim River basin during the past 50 years. **Journal of Arid Environments**, v. 74, n. 2, p. 256-267, 2010.
- YANG, D.; YE, B.; KANE, D. Streamflow changes over Siberian Yenisei river basin. **Journal of Hydrology**, v. 296, n. 1, p. 59-80, 2004. YANG, Daqing; YE, Baisheng; L KANE, Douglas. Streamflow changes over Siberian Yenisei river basin. **Journal of Hydrology**, v. 296, n. 1, p. 59-80, 2004.
- YANG, H. H. et al. Impact of land-use changes toward base-flow regime in Lui and Langat Dengkil sub-basin. **International Journal of the Physical Sciences**, v. 6, n. 21, p. 4960-4976, 2011.
- YIOU, P.; SORNETTE, D.; GHIL, M. Data-adaptive wavelets and multi-scale singular-spectrum analysis. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 142, n. 3, p. 254-290, 2000.
- YIOU, R. et al. Paleoclimatic variability inferred from the spectral analysis of Greenland and Antarctic ice-core data. **Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)**, v. 102, n. C12, p. 26441-26454, 1997.
- ZAHAR, Y.; GHORBEL, A.; ALBERGEL, J. Impacts of large dams on downstream flow conditions of rivers: aggradation and reduction of the Medjerda channel capacity downstream of the Sidi Salem dam (Tunisia). **Journal of hydrology**, v. 351, n. 3, p. 318-330, 2008.

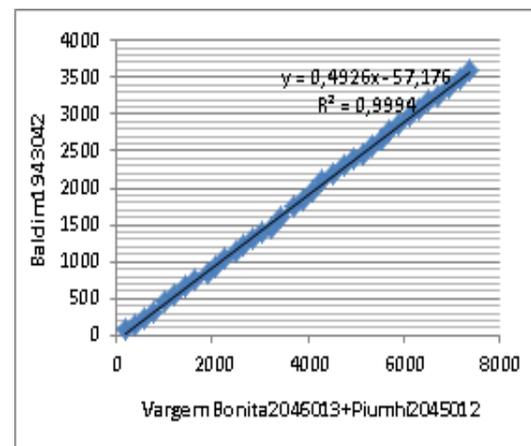
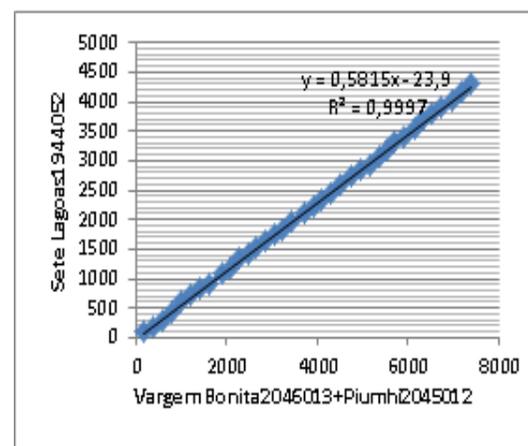
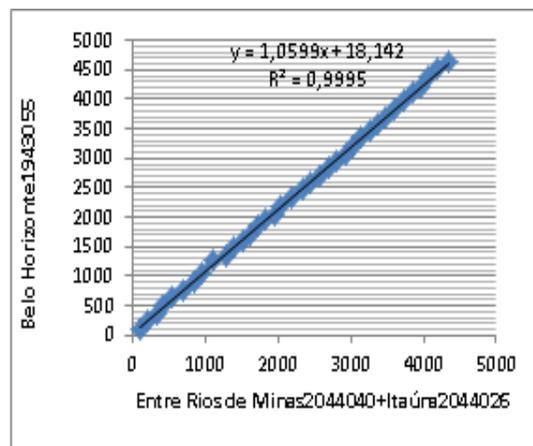
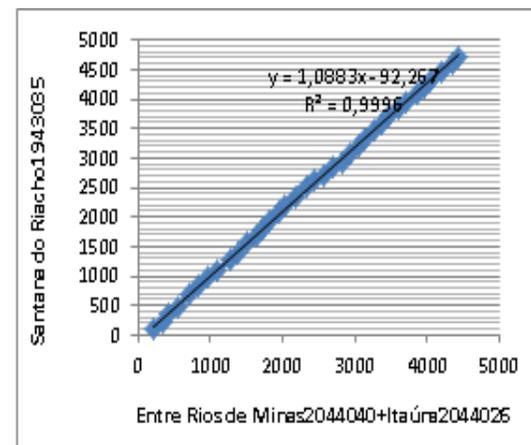
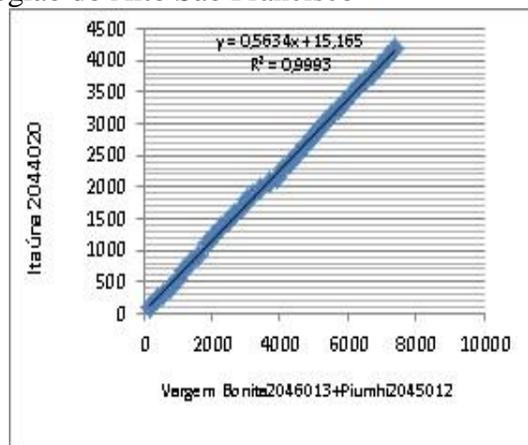
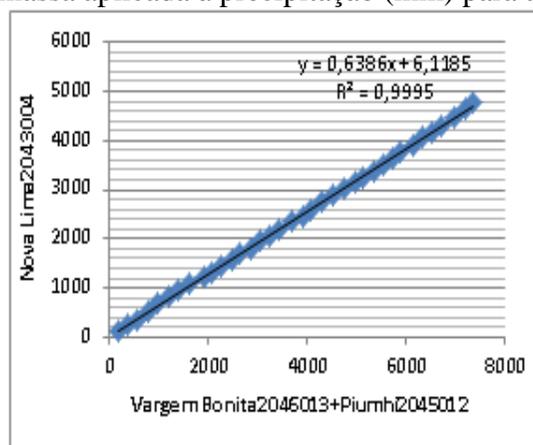
ZHAN, C. et al. The impacts of climate variability and human activities on streamflow in Bai River basin, northern China. **Hydrology Research**, v. 44, n. 5, p. 875-885, 2013.

ZHAO, F. et al. Streamflow response to climate variability and human activities in the upper catchment of the Yellow River Basin. **Science in China Series E: Technological Sciences**, v. 52, n. 11, p. 3249-3256, 2009.

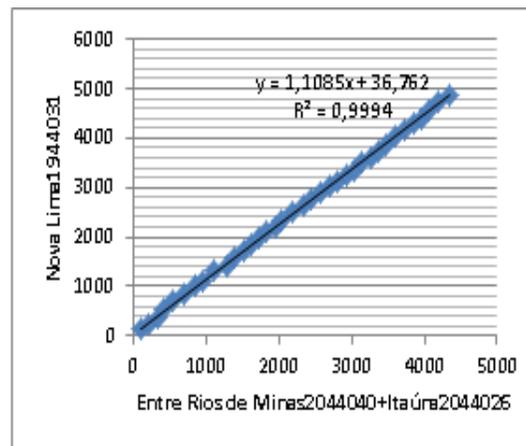
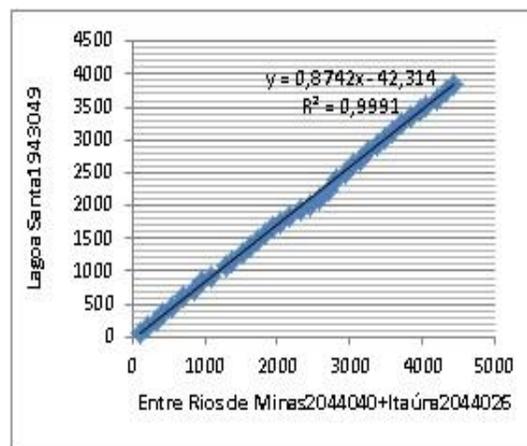
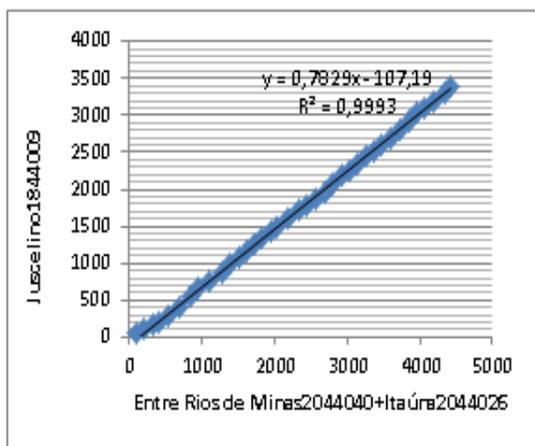
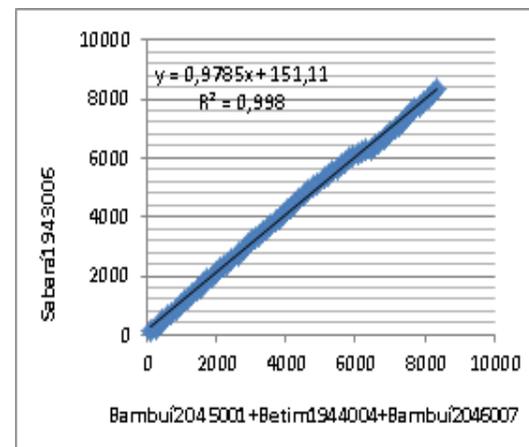
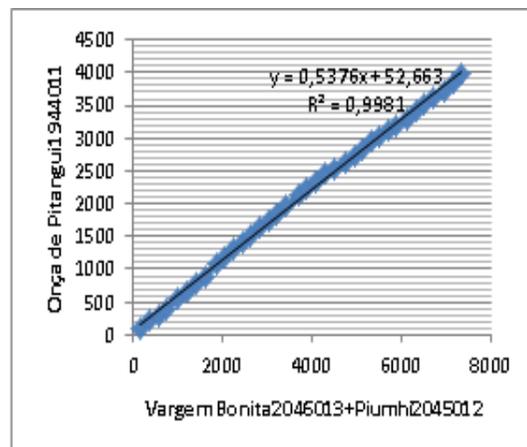
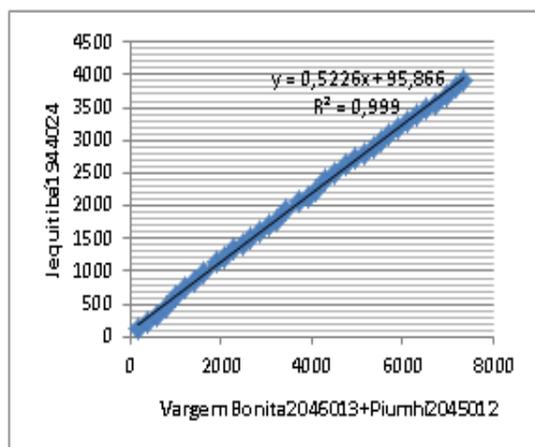
ZHIGLJAVSKY, A.. Singular Spectrum Analysis for time series: Introduction to this special issue. **Statistics and its Interface**, v. 3, n. 3, p. 255-258, 2010.

APÊNDICE

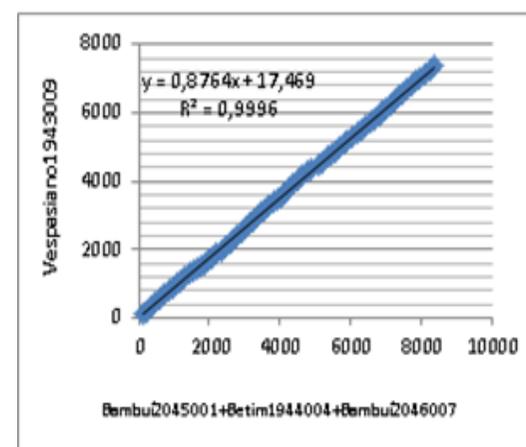
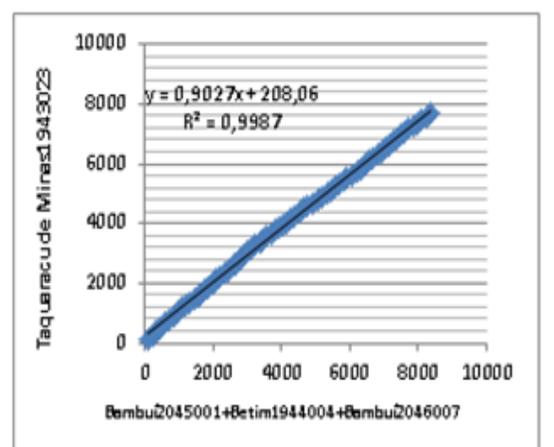
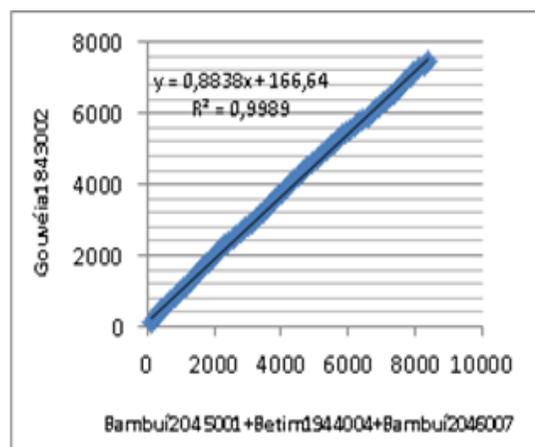
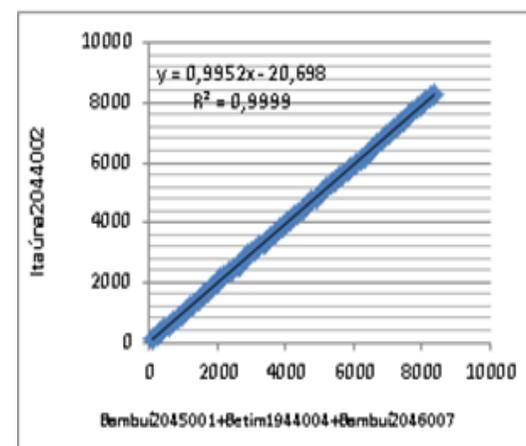
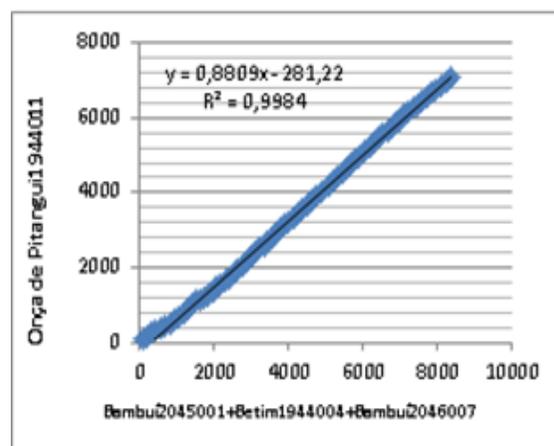
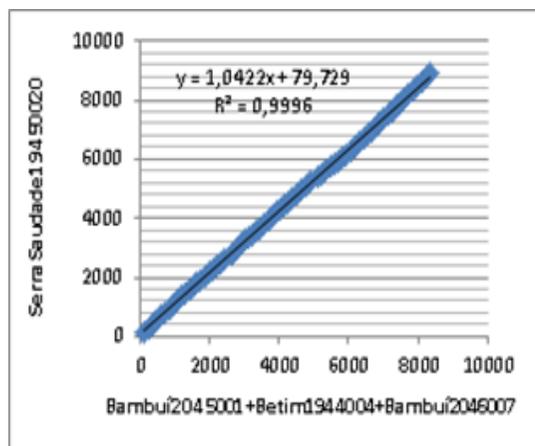
massa aplicada à precipitação (mm) para a região do Alto São Francisco



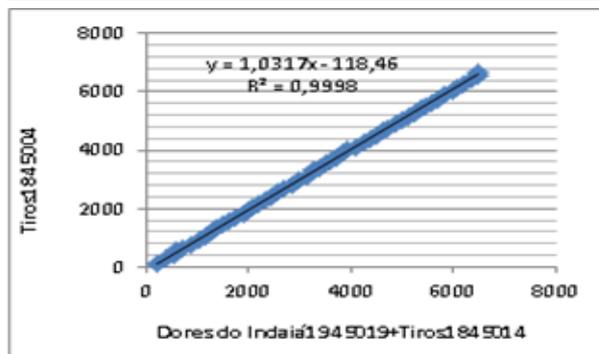
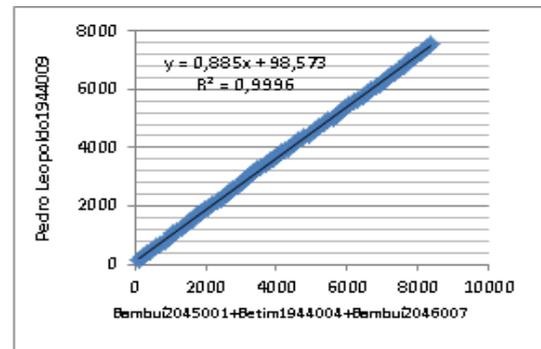
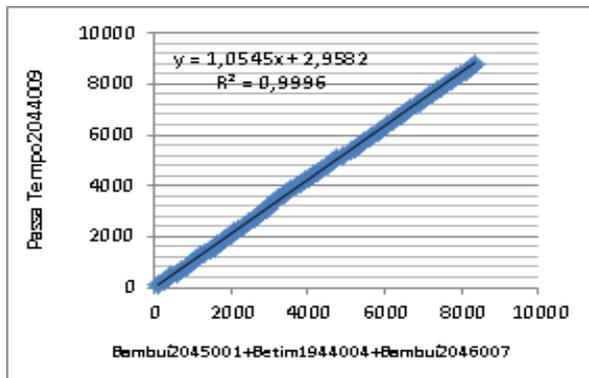
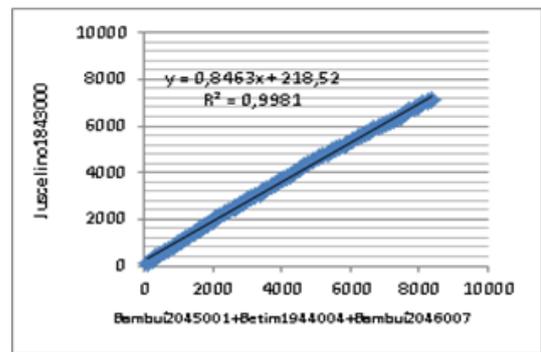
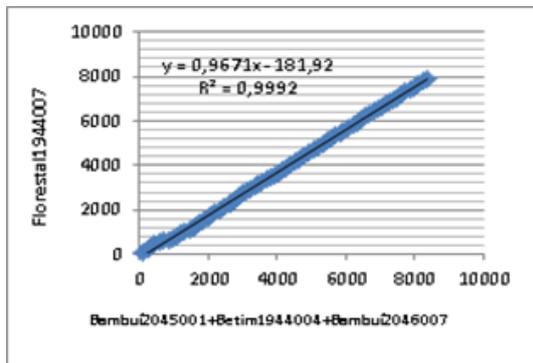
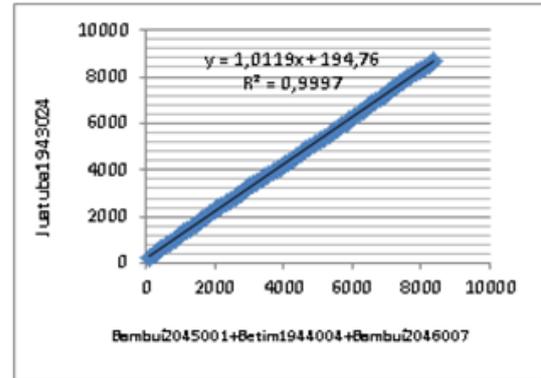
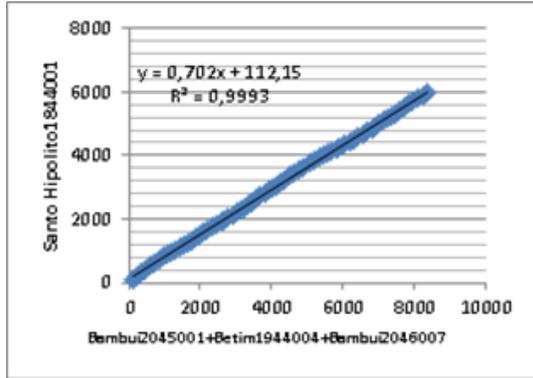
Dupla massa aplicada à precipitação (mm) para a região do Alto São Francisco.



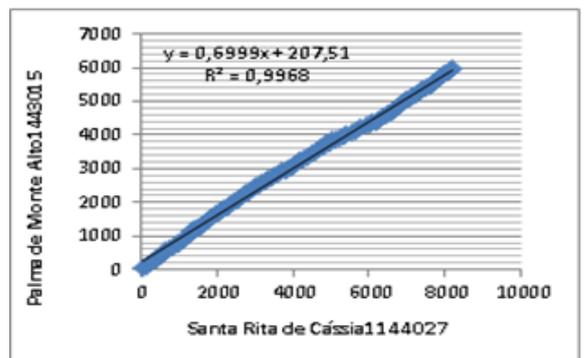
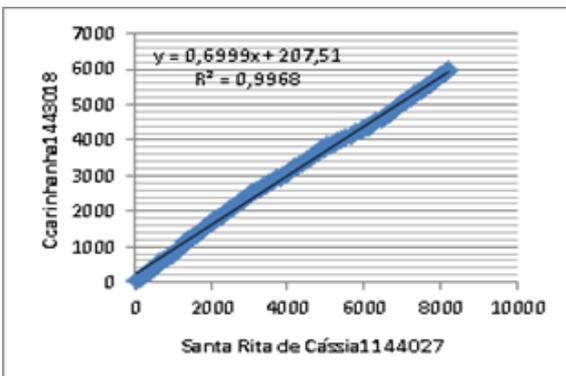
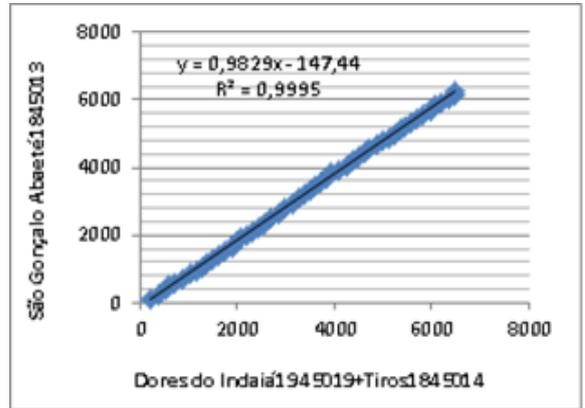
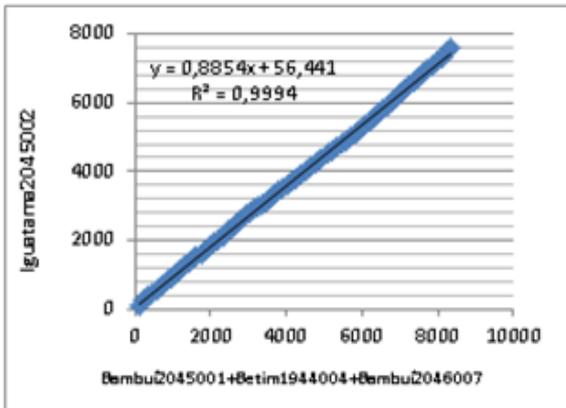
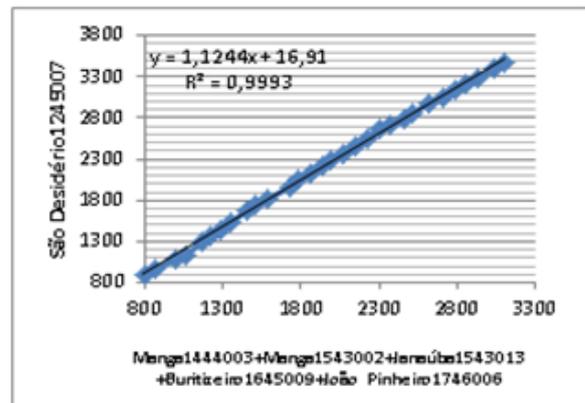
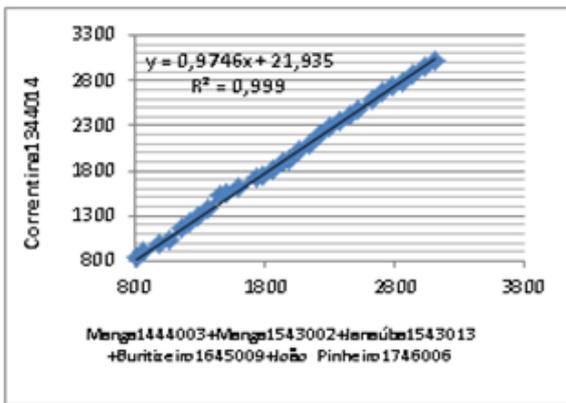
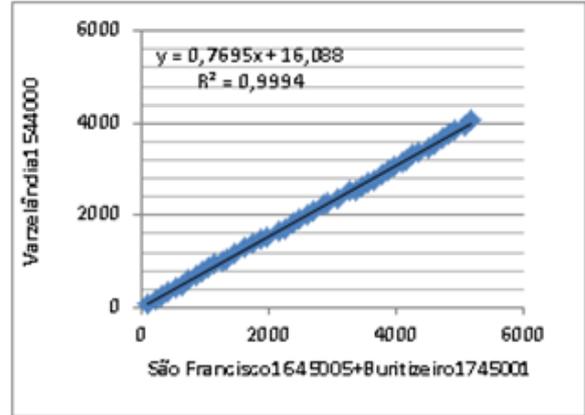
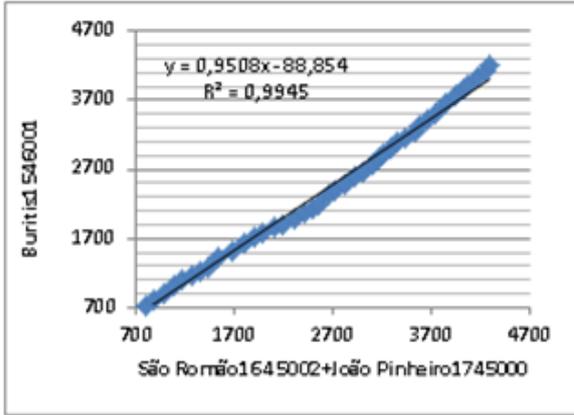
Dupla massa aplicada à precipitação (mm) para a região do Alto São Francisco.



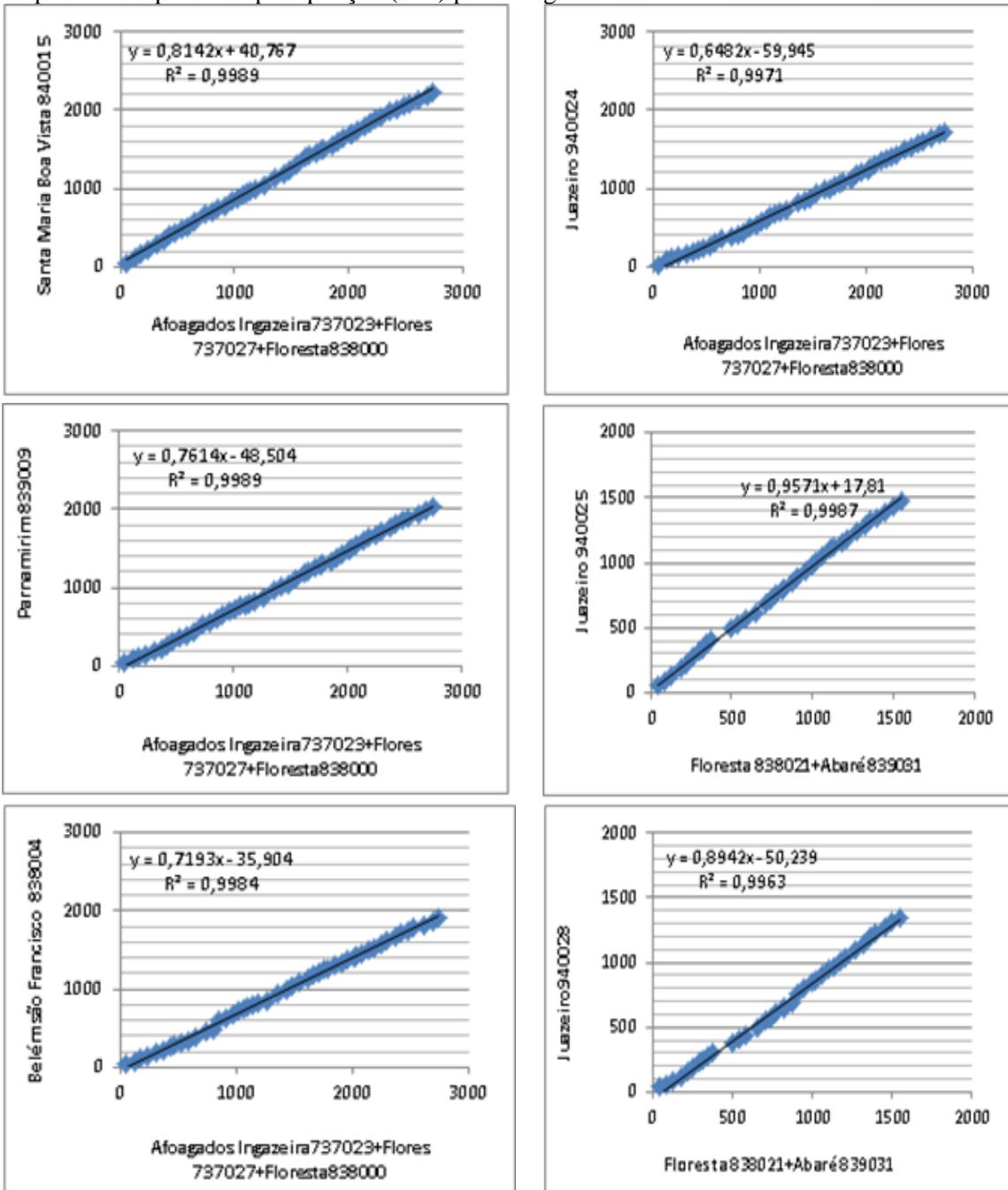
Dupla massa aplicada à precipitação (mm) para a região do Alto São Francisco.



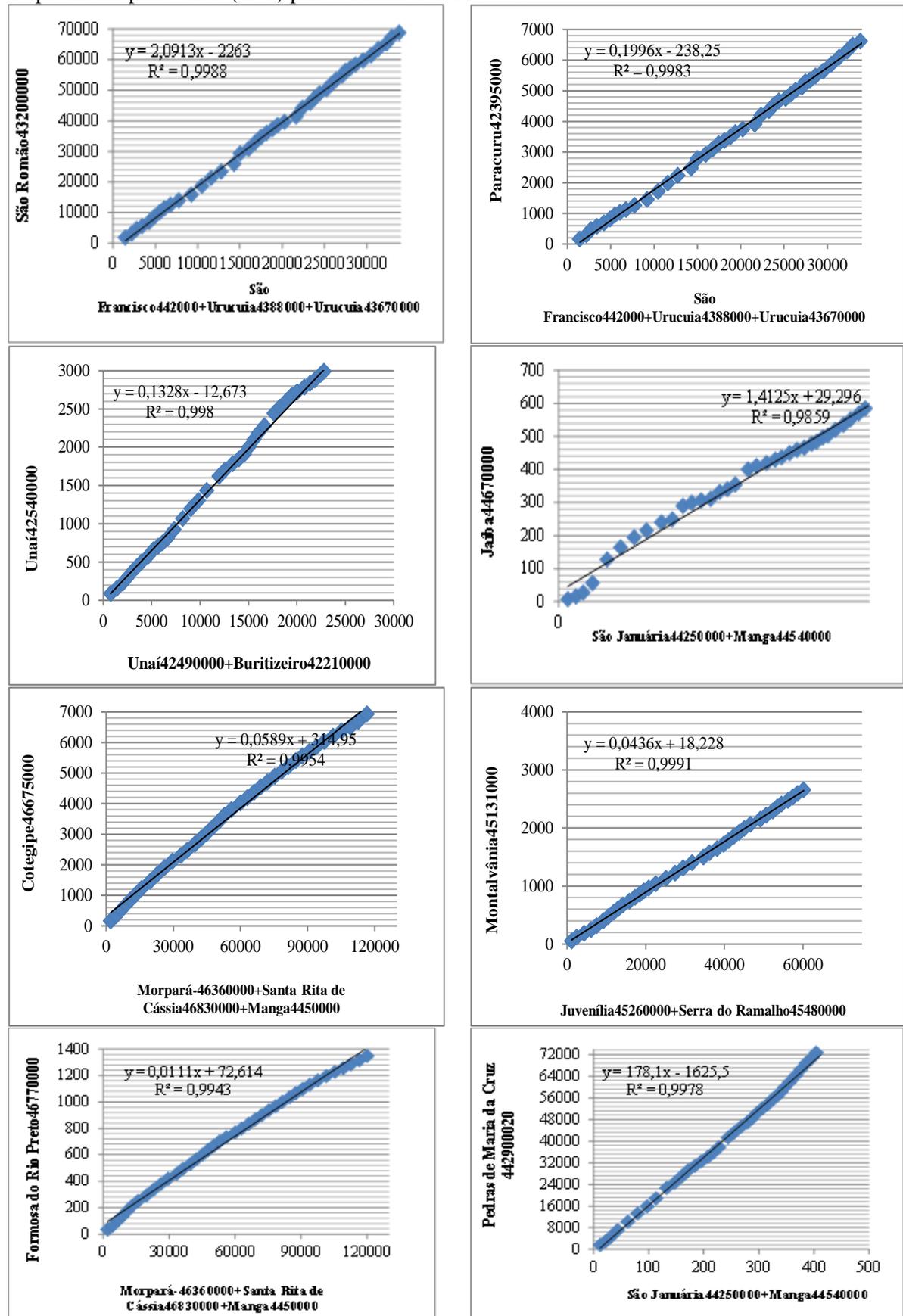
Dupla massa aplicada à precipitação (mm) para a região do Médio São Francisco



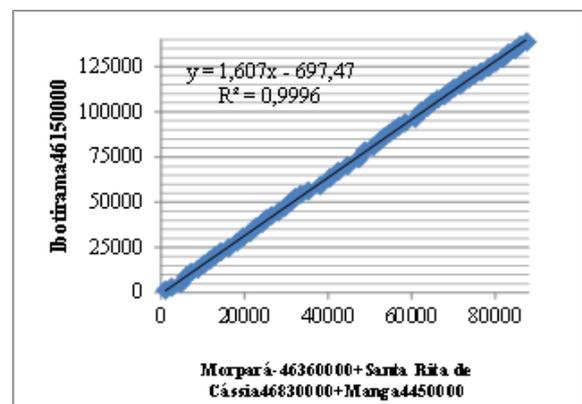
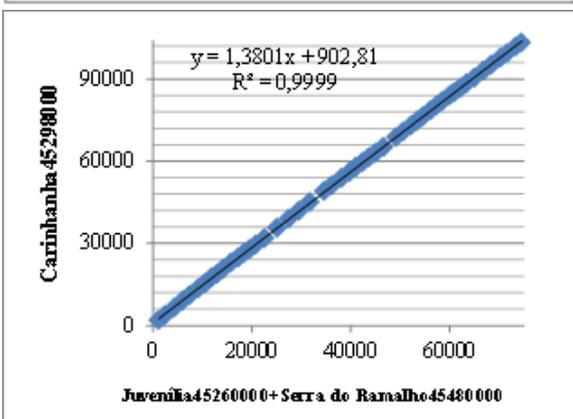
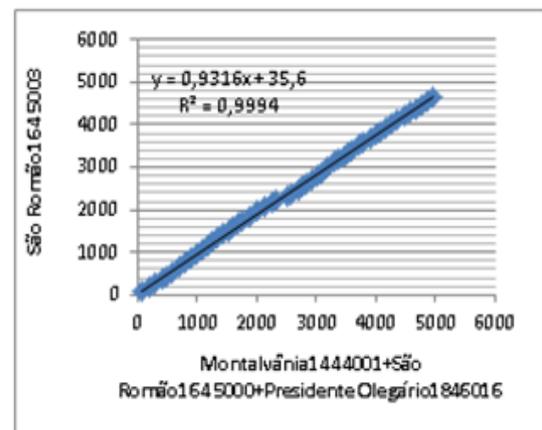
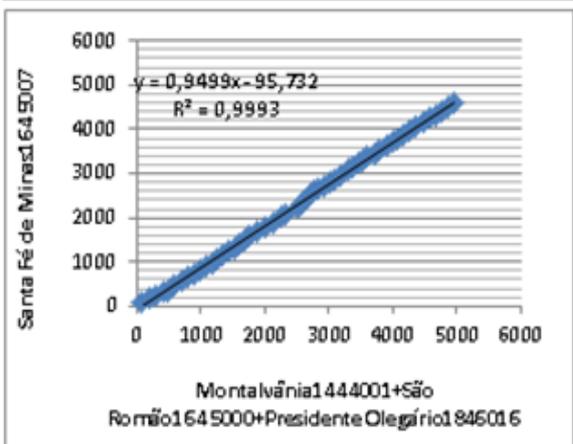
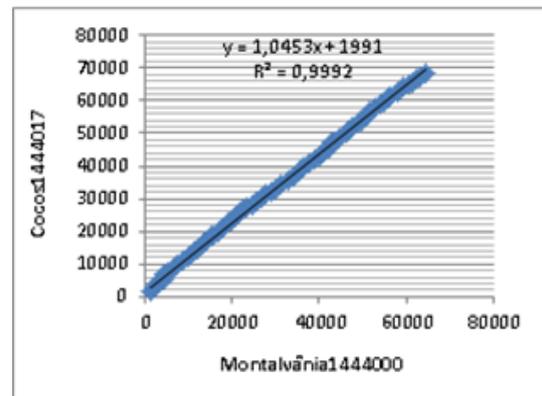
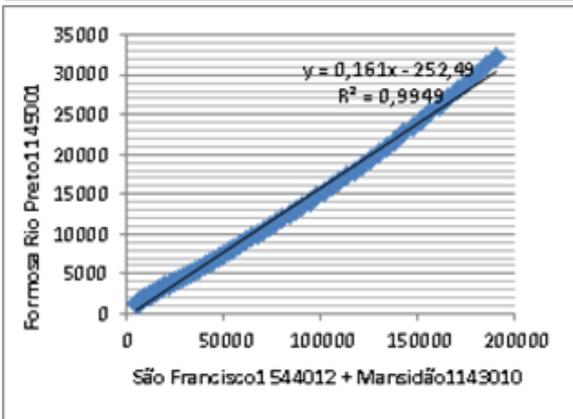
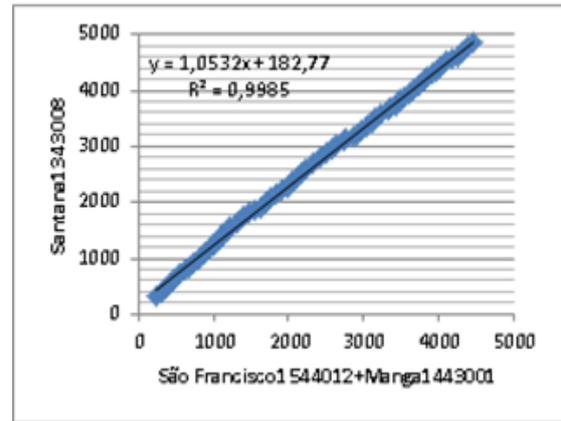
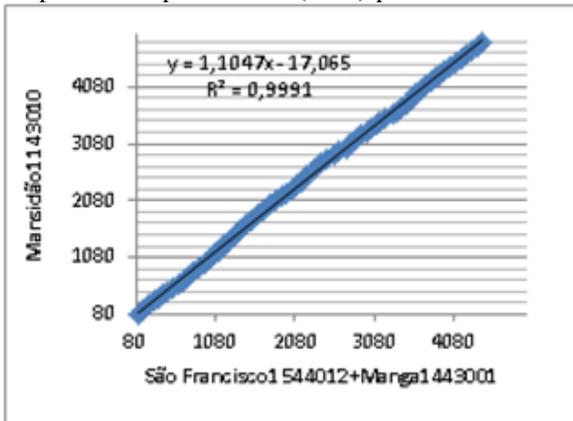
Dupla massa aplicada à precipitação (mm) para a região do Submédio São Francisco.



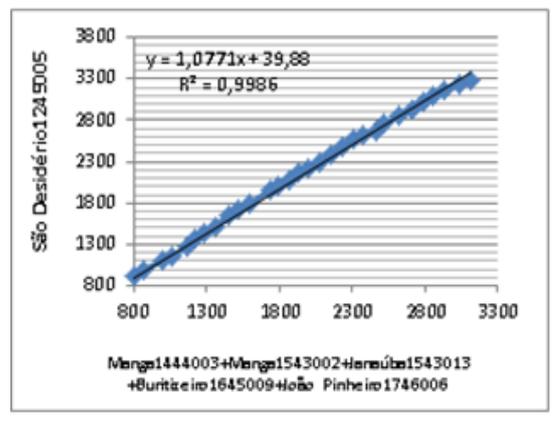
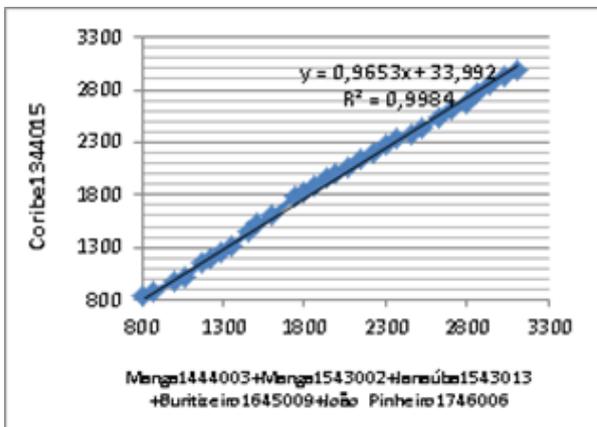
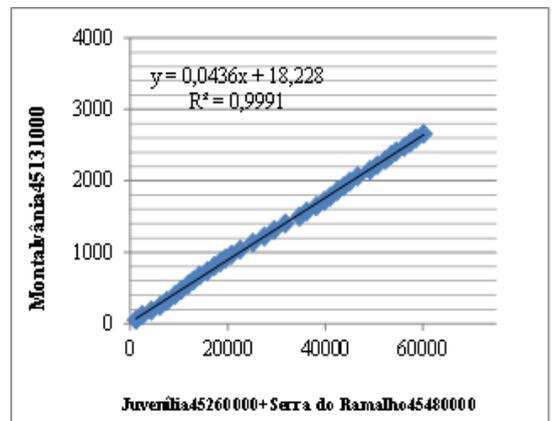
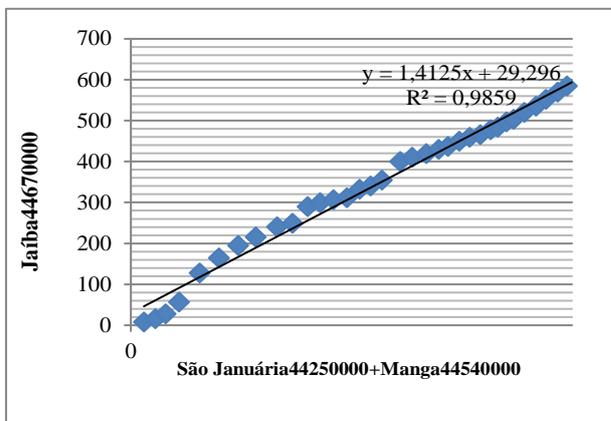
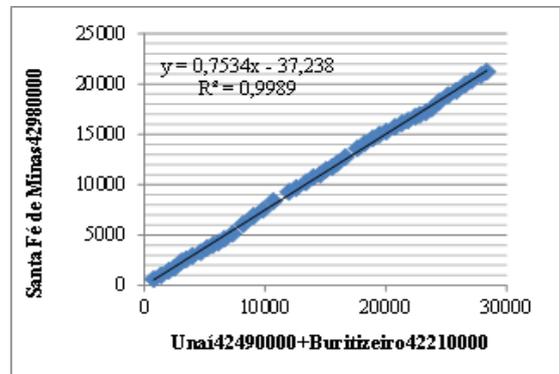
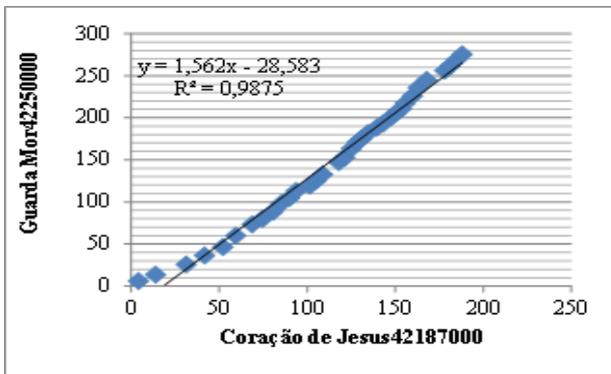
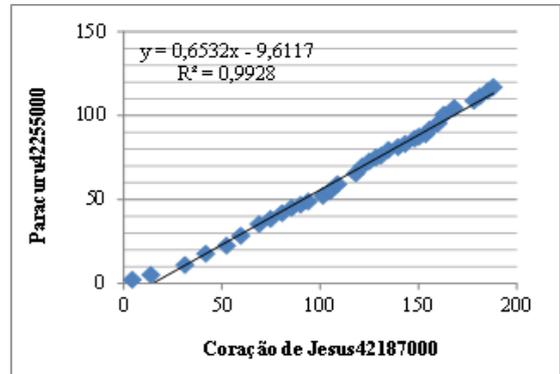
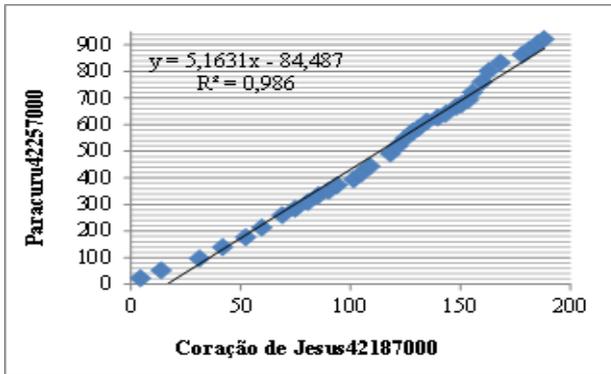
Dupla massa para vazão (m^2/s) para o Médio São Francisco



Dupla massa para vazão (m^2/s) para o Médio São Francisco



Dupla massa para vazão (m²/s) para o Médio São Francisco



Dupla massa para vazão (m^2/s) para o Médio São Francisco

