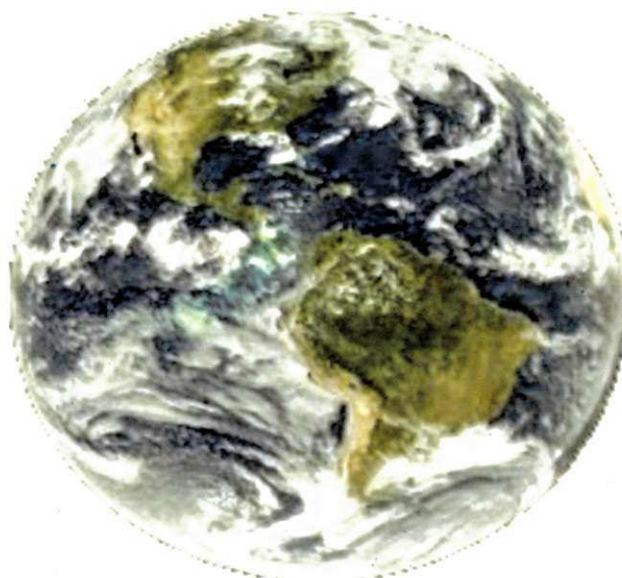


UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

Programa de Pós-Graduação em Meteorologia



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Simulação hidrológica e aplicação de uma análise multivariada no estudo de
chuva-vazão na bacia hidrográfica do Rio São Francisco**

LEANDRO RODRIGUES DE SOUZA

Campina Grande – PB
Março de 2012

LEANDRO RODRIGUES DE SOUZA

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E APLICAÇÃO DE UMA ANÁLISE
MULTIVARIADA NO ESTUDO DE CHUVA-VAZÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIO SÃO FRANCISCO**

Campina Grande – PB

2012

LEANDRO RODRIGUES DE SOUZA

SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E APLICAÇÃO DE UMA ANÁLISE
MULTIVARIADA NO ESTUDO DE CHUVA-VAZÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIO SÃO FRANCISCO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande, na área de concentração Meteorologia de Meso e Grande Escala em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Magaly de Fátima Correia

Campina Grande – PB

2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S725s Souza, Leandro Rodrigues de.
Simulação hidrológica e aplicação de uma análise multivariada no estudo de chuva-vazão na bacia hidrográfica do Rio São Francisco / Leandro Rodrigues de Souza. — Campina Grande, 2012.
69 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Magaly de Fátima Correia.

1. Análise Fatorial. 2. Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. 3. KMO. 4. Simulação Hidrológica. 5. Willmott. I. Título.

CDU 502.51(28) (43)

LEANDRO RODRIGUES DE SOUZA

SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E APLICAÇÃO DE UMA ANÁLISE
MULTIVARIADA NO ESTUDO DE CHUVA-VAZÃO NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 09/03/2012

BANCA EXAMINADORA


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


Prof. Dra. CELIA CAMPOS BRAGA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


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

A todos meus familiares que me fazem sempre acreditar em meus objetivos, em especial a minha mãe Laíde Rodrigues de Souza por me motivar e pela educação, a minha avó Maria de Nazaré Rodrigues por sempre me apoiar na vida.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Escrever o agradecimento é a última tarefa na redação de um trabalho como este. São tantas as pessoas, ao longo dos últimos anos, que de alguma forma contribuíram para que essas páginas fossem escritas. Quero registrar aqui meus sinceros agradecimentos a todos.

A Deus, pela vida, pela família e amigos que sempre estiveram ao meu lado.

A minha família pelo grande incentivo e apoio na minha vida estudantil.

A minha orientadora Prof. Magaly de Fátima Correia, pela confiança desde o início, e visão científica no desenvolvimento da pesquisa.

A Ana Paula por todo amor, carinho, companheirismo e que esteve presente em todos os momentos deste trabalho me incentivando.

Ao Prof. Dr. Alan Cavalcanti da Cunha, pelo incentivo e apoio no desenvolvimento da pesquisa desde início desta jornada científica (2007).

Aos professores Célia Campos Braga, Lincoln Eloi de Araújo e Maria Regina da Silva Aragão pelas contribuições no plano de dissertação que deram rumo ao trabalho.

Aos professores do Curso de Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande pela contribuição à minha formação profissional.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos, pois não teria como alimentar este sonho hoje realizado.

A todos os alunos do curso de Meteorologia que nesses 2 anos de mestrado fizeram valer o significado de amizade, respeito e incentivo.

Aos funcionários do DCA, especialmente a Divanete Rocha.

A todos que contribuíram direto e indiretamente na conclusão deste trabalho, meu muito obrigado.

EPÍGRAFE

Imagine que o mundo seja algo como uma gigantesca partida de xadrez sendo disputada pelos deuses, e que nós fazemos parte da audiência. Não sabemos quais são as regras do jogo; podemos apenas observar seu desenrolar. Em princípio, se observarmos por tempo suficiente, iremos descobrir algumas das regras. As regras do jogo é o que chamamos de física fundamental.

Richard Feynman

RESUMO

O objetivo principal do estudo foi utilizar o modelo hidrológico IPHS1 para simular o processo de chuva-vazão na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF) e verificar a resposta hidrológica sobre os reservatórios de Sobradinho e Itaparica no ano de 2007. Além disso, aplicou-se Análise Fatorial em Componentes Principais para determinar o padrão e regime de precipitação pluvial na BHSF a fim de verificar os sistemas atmosféricos que atuam na Bacia e sua interação com hidrogramas observados. Foram aplicados os testes estatísticos KMO e Bartlett para verificar o grau de ajuste dos dados multivariados. Após o ajuste do modelo hidrológico no ano de 2005, verificou-se que o modelo IPHS1 conseguiu representar com fidelidade o comportamento da vazão nos pontos específicos sobre a bacia hidrográfica no ano de 2007, inclusive validado o modelo através do teste de Willmott. Ademais, a BHSF apresentou 4 regimes de chuva através da retenção de apenas 4 fatores comum que explicaram situações de anomalias observadas neste ano, talvez devido ao fenômeno de El Niño e La Niña que alteram o padrão de precipitação da área de estudo. Os 4 fatores explicam 84,04% da variância total da precipitação observada, em que o primeiro fator explica 45,98% da variância e mostrou altas correlações com as chuvas ocorridas nos meses de março a setembro, que são influenciadas, principalmente pela atuação de Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e brisas marítimas. O segundo fator explicou 18,42% da variância dos dados e apresentou correlações expressivas com as chuvas de novembro a fevereiro, e está possivelmente relacionado à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Sistemas Frontais. O terceiro fator explicou 11,36% da variância dos dados e apresentou correlações positivas com chuvas em outubro, e pode esta relacionada a Sistemas Frontais. Por último, percebe-se que as contribuições relativas ao quarto fator, com 9,13% da variância dos dados, representado pelo mês de fevereiro, e pode está associado a LI's. Além disso, os testes de KMO e Bartlett foram estatisticamente relevantes para este estudo. Conclui-se que o modelo IPHS1 pode ser utilizado para previsão de vazão na BHSF, mas é necessário investigar os sistemas precipitantes sobre uma bacia hidrográfica a fim de compreender o impacto que podem causar sobre barragens e reservatórios quando atuam de maneira anômala.

Palavras-chave: Análise fatorial, Bacia Hidrográfica do rio São Francisco, KMO, Simulação hidrológica, Willmott.

ABSTRACT

The main goal of this study was to use the IPHS1 hydrologic model to simulate the process of rainfall-runoff in the São Francisco river watershed (BHSF) and check on the hydrological response of Sobradinho and Itaparica reservoirs in 2007. In addition, was applied Principal Component Factor Analysis to determine the pattern and rainfall regime in the BHSF in order to check the weather systems that operate in the Basin and its interaction with observed hydrographs. Were applied statistical tests to check KMO and Bartlett adjustment of the degree of multivariate data. After adjustment of the hydrological model in 2005, it was found that the model could IPHS1 represent faithfully the behavior of the flow at specific points on the basin in 2007, including validated the model by testing Willmott. Furthermore, the BHSF had four rain regimes by retaining only four common factors that explain situations anomalies observed this year, perhaps due to El Niño and La Niña that alter the pattern of precipitation in the study area. The four factors explain 84.04% of the total variance of precipitation observed, in the first factor explains 45.98% of the variance and showed high correlations with rainfall occurring in the months from March to September, which are is influenced mainly by the performance Eastern Waves (EW), the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) and maritime breezes. The second factor explained 18.42% of the variance of the data and showed significant correlations with rainfall from November to February, and is possibly related to the convergence zone of the South Atlantic (SACZ) and Frontal Systems. The third factor explained 11.36% of data variance and showed positive correlations with rainfall in October, and this be may related to Frontal Systems. Finally, it is clear that the relative contributions to the fourth factor, with 9.13% of the variance of the data represented by the month of February, and can lines is associated with instabilities. Furthermore, tests and Bartlett KMO were statistically significant in this study. It is concluded that the model IPHS1 can be used to predict the flow in the BHSF, but it is necessary to investigate the precipitation systems on a watershed in order to understand the impact they can have on dams and reservoirs when they act so anomalous.

Key-words: Factor analysis, River Basin San Francisco, KMO, Hydrologic simulation, Willmott

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área em estudo	11
Figura 2. Distribuição das sub-bacias da BHSF.....	13
Figura 3. Distribuição espacial dos postos pluviométricos na BHSF.....	15
Figura 4. Interface do IPHS1 com destaque para bacia e aplicativos (sub-bacias, trechos de canais e barragem) do modelo.....	17
Figura 5. Interface com os módulos da Bacia	19
Figura 6. Método de Clark	21
Figura 7. Isócrona e histograma tempo – área.....	21
Figura 8. Formas de histograma tempo-área para diferentes valores do parâmetro XN	22
Figura 9. Propagação de cheia no trecho do rio	23
Figura 10. Variabilidade mensal da descarga líquida afluente ao reservatório de Sobradinho.....	31
Figura 11. Índice de ENSO	32
Figura 12. Área de El Niño no Oceano Pacífico	32
Figura 13. Variabilidade mensal da descarga líquida afluente ao reservatório de Itaparica	33
Figura 14. Resultados da simulação hidrológica: (a) hidrograma afluente ao reservatório em Sobradinho e (b) hidrograma afluente ao reservatório de Itaparica no ano de 2005	34
Figura 15. Variabilidade do hidrograma em três pontos da bacia no ano de 2005	35
Figura 16. (a) Hidrograma afluente ao reservatório de Sobradinho e (b) diferenças percentual diária das vazões simuladas e observadas afluente ao reservatório de Sobradinho em 2007.....	36
Figura 17. (a) Hidrograma afluente ao reservatório de Itaparica e (b) diferenças entre vazões simuladas e observadas afluente ao reservatório de Itaparica em 2007	37
Figura 18. Variabilidade dos hidrogramas simulados para o ano de 2007 (a montante da afluência de Sobradinho, afluente a Sobradinho e afluente a Itaparica).....	38
Figura 19. Espacialização dos totais médios anuais pluviométricos (mm) na BHSF entre 1961 a 2009.....	40
Figura 20. Espacialização do total anual pluviométrico (mm) na BHSF no ano de 2007	42
Figura 21. Variabilidade mensal da descarga líquida a montante do ponto afluente a Sobradinho.....	43
Figura 22. Espacialização da precipitação pluvial no ano de 2005 no primeiro trimestre (janeiro, fevereiro e março)	44
Figura 23. Espacialização da precipitação pluvial no ano de 2007 no primeiro trimestre (janeiro, fevereiro e março)	45
Figura 24. Espacialização da precipitação pluvial no ano de 2005 no último trimestre (outubro, novembro e dezembro).....	46
Figura 25. Espacialização da precipitação pluvial no ano de 2007 no último trimestre (outubro, novembro e dezembro).....	47
Figura 26. Scree Plot ou “Curva cotovelo” da distribuição dos autovalores versus o número de componentes.....	48
Figura 27. Cargas fatoriais rotacionadas (correlações) para os três fatores comuns que explicam 96,59% do total dos dados de precipitação na BHSF	49
Figura 28. Padrão espacial associado ao primeiro fator comum dos totais médios mensais da precipitação pluvial (mm) na BHSF	50

Figura 29. Padrão espacial para a segunda componente principal associada ao segundo fator comum dos totais médios mensais da precipitação pluvial (mm) na BHSF ..	51
Figura 30. Padrão espacial para a terceira componente principal associada ao terceiro fator comum dos totais médios mensais da precipitação pluvial (mm) na BHSF ..	52
Figura 31. <i>Scree Plot</i> ou “Curva cotovelo” da distribuição dos autovalores de 2007....	53
Figura 32. Cargas fatoriais rotacionadas (correlações) para os quatro fatores comuns que explicam 85,04% do total dos dados de precipitação na BHSF em 2007	54
Figura 33. Padrão espacial associado ao primeiro fator comum dos totais médios mensais da precipitação pluvial (mm) na BHSF	55
Figura 34. Posição do centro dos Vórtices em Altos Níveis (VCAN) com a indicação dos dias de atuação sobre a América do Sul em março/2007	56
Figura 35. Padrão espacial para a segunda componente principal associada ao segundo fator comum dos totais médios mensais da precipitação pluvial (mm) na BHSF ..	57
Figura 36. Sistemas Frontais e ZCAS atuando no norte de Minas Gerais (Alto da BHSF)	57
Figura 37. Posição do centro dos Vórtices em Altos Níveis (VCAN) com a indicação dos dias de atuação sobre a América do Sul em janeiro/2007	58
Figura 38. Padrão espacial para a terceira componente principal associada ao terceiro fator comum dos totais médios mensais da precipitação pluvial (mm) na BHSF ..	59
Figura 39. Padrão espacial associado ao quarto fator comum dos totais médios mensais da precipitação pluvial (mm) na BHSF	60
Figura 40. Recortes das imagens do satélite GOES-12, no canal infravermelho, às 21:00TMG, mostrando LI's na região central da Bahia (Médio São Francisco em FEVEREIRO/2007	60
Figura 41. Posição do centro dos Vórtices em Altos Níveis (VCAN) com a indicação dos dias de atuação sobre a América do Sul em fevereiro/2007	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Localização das sub-bacias	12
Tabela 2. Parametrização do modelo de escoamento superficial IPH II	25
Tabela 3. Grau de ajuste através do teste KMO	29
Tabela 4. Teste de Bartlett.....	29
Tabela 5. Critérios de interpretação do índice de desempenho (c) dos métodos de estimativa da vazão	30
Tabela 6. Avaliação do desempenho do modelo hidrológico anual em 2005 e 2007	39
Tabela 7. Valores Próprios, Variância Explicada (%) e Inércia Acumulada (%) da precipitação mensal.....	48
Tabela 8. Valores Próprios, Variância Explicada (%) e Inércia Acumulada (%) da precipitação mensal.....	53
Tabela 9. Teste KMO e Bartlett.....	62

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACP	Análise de Componentes Principais
ANA	Agência Nacional de Águas
AGCM	Atmosphere Global Circulation Model
AP	Amapá
BA	Bahia
BH	Bacia Hidrográfica
BHSF	Bacia Hidrográfica do rio São Francisco
CHESF	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
CP	Componente Principal
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CODEVASP	Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba
DOL	Distúrbios Ondulatórios de Leste
ENOS	El Niño Oscilação Sul
FOE	Funções Ortogonais Empíricas
HEC	Hydrologic Engineering Center
HTA	Histograma Tempo-Área
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IMP	Área Impermeável
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
KMO	Kaiser-Meyer-Olkin
LI's	Linhas de Instabilidade

MGB	Modelo de Grandes Bacias
MCGA	Modelo de Circulação Geral da Atmosfera
MG	Minas Gerais
NEB	Nordeste do Brasil
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PC	Personal Computer
PNMM	Pressão ao Nível Médio do Mar
RAMS	Regional Atmospheric Modeling System
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
RLS	Reservatório Linear Simples
RS	Rio Grande do Sul
SCS	Serviço de Conservação do Solo
SP	São Paulo
VBEIC	Vazão de Base Especifica no Início da Chuva
VCAN	Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</u>	<u>1</u>
<u>CAPÍTULO 2 - OBJETIVOS</u>	<u>3</u>
2.1. OBJETIVO GERAL	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
<u>CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	<u>4</u>
3.1. ESTUDOS REALIZADOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO	4
3.2. SIMULAÇÃO E MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	5
3.3. ANÁLISE MULTIVARIADA DE VARIÁVEIS HIDROMETEOROLÓGICAS	7
<u>CAPÍTULO 4 - MATERIAL E MÉTODOS.....</u>	<u>11</u>
4.1. ÁREA EM ESTUDO	11
4.2. DADOS.....	14
4.2.1. OBSERVADOS	14
4.3. MODELO HIDROLÓGICO	15
4.3.1. MODELO HIDROLÓGICO IPHS1.....	15
4.3.1.1. ESTRUTURA DO MODELO IPHS1.....	16
4.3.2. AJUSTE E CALIBRAÇÃO DO IPH II.....	24
4.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA	25
4.4.1. ANÁLISE FATORIAL EM COMPONENTES PRINCIPAIS.....	26
4.4.2. TESTE ESTATÍSTICO KMO E DE BARTLETT.....	28
4.4.3. TESTE ESTATÍSTICO DE WILLMOTT.....	29
<u>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</u>	<u>31</u>
5.1. VARIABILIDADE MENSAL DA VAZÃO AFLUENTE NOS RESERVATÓRIOS DE SOBRADINHO E ITAPARICA	31
5.1.1. ANÁLISE OBSERVACIONAL	31
5.1.2. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	33
5.1.3. O EVENTO DE 2007	35
5.1.4. TESTE DE WILLMOTT	39
5.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA	39

5.2.1. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO PLUVIAL	39
5.2.2. PADRÕES DE VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL ASSOCIADA À CHUVA NA BHSF ENTRE 1961 A 2009	47
5.2.3. PADRÕES DE VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL ASSOCIADA À CHUVA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO EM 2007	52
5.2.4. VALIDAÇÃO DA ANÁLISE FATORIAL.....	62
<u>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES</u>	63
<u>CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	65

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O conhecimento da demanda hídrica em bacias hidrográficas (volumes de chuva concentrados ou distribuídos) é fundamental na gestão e planejamento do capital natural no uso pela agroindústria, populações ribeirinhas e no meio urbano. Portanto, identificar o padrão temporal e espacial das chuvas em uma bacia hidrográfica ajuda na compreensão da evolução do escoamento superficial. Neste contexto, é imprescindível conhecer o grau de influência da distribuição espacial e intensidade de chuva nos valores da vazão e cota dos rios (resposta hidrológica). O conhecimento da evolução temporal destes parâmetros é importante na definição de regras de operação de reservatórios indispensáveis na geração de energia bem como na regularização de vazões pelo o setor energético. Desta maneira, o estabelecimento de metodologias apropriadas para definir a variabilidade pluvial, e conseqüentemente de vazão e cota, é de suma importância para suprir as deficiências de informações hidrometeorológicas essenciais aos dos diversos usuários, dentre os quais setores estratégicos como a defesa civil e a agropecuária.

Em virtude da relação existente entre as condições atmosféricas de uma região, a variabilidade espaço-temporal das chuvas e mudanças no volume do escoamento superficial é necessária uma série de procedimentos para reduzir incertezas relacionadas às condições climáticas futuras na previsão da vazão.

A engenharia de recursos hídricos tem baseado seus projetos no princípio básico de que as séries temporais de vazão são estacionárias (TUCCI, 2005). No entanto, quando consideradas séries médias mensais verifica-se que são tipicamente não-estacionárias e geralmente com forte componente sazonal associada com os períodos chuvosos e de estiagem nas proximidades dos rios. Quando consideradas séries longas é possível identificar sinais de que estas séries não são estacionárias devido à influência de um ou mais dos seguintes fatores: (a) modificação na cobertura e uso do solo na bacia hidrográfica; atividades que afetam substancialmente aspectos hidrológicos na bacia; (b) variabilidade climática inter-decadal (longo prazo), inerente a natureza do funcionamento do clima e (c) modificação climática devido ao efeito estufa (IPCC, 2001).

A bacia hidrográfica pode ser considerada como um sistema físico, através do qual uma variável de entrada, como a precipitação, infiltração, área da bacia, etc. é

transformada em uma variável de saída (vazão), por diversos processos do ciclo hidrológico. Neste contexto, entender a evolução espaço-temporal de eventos hidrológicos neste sistema requer o conhecimento detalhado sobre o comportamento de variáveis hidrometeorológicas e características físicas locais. A variabilidade nas condições atmosféricas pode alterar parâmetros hidráulicos da Bacia modificando os processos hidrodinâmicos de tal forma que se torna difícil prever as conseqüências, principalmente, quando se considera à complexidade dos processos de interação biosfera-atmosfera. Webster (1994) investigando o papel do ciclo hidrológico nas interações superfície-atmosfera verificou a não linearidade na estrutura de ambos os sistemas, hidrosfera e atmosfera.

A construção de represas em regiões com grandes limitações hídricas a exemplo do semiárido brasileiro cria um ambiente favorável para buscas desenfreadas pelos recursos hídricos e quase sempre com uma ocupação do solo desordenada. A transformação decorrente das mudanças nas características da superfície do solo pela substituição da vegetação e áreas urbanas por grandes espelhos de água afeta as condições ambientais no entorno de reservatórios. Essas mudanças também influenciam as condições atmosféricas mudando o padrão de vento local pela formação da brisa lacustre, a temperatura e a umidade atmosférica (CORREIA & SILVA DIAS, 2003). Se a intervenção no ciclo hidrológico ocorre em regiões de clima árido ou semiárido onde a carência de água potável é significativa, a formação de grandes reservatórios de água pode representar simultaneamente a possibilidade de crescimento socioeconômico, mas também o aumento da vulnerabilidade ambiental de uma região aos eventos hidrológicos extremos.

Este trabalho está dividido em 7 capítulos, sendo o capítulo 1 a introdução do trabalho, relatando aspectos relevantes de estudos sobre as alterações no ciclo hidrológico. No Capítulo 2 são descritos os objetivos da pesquisa. O capítulo 3 apresenta um levantamento bibliográfico da área em estudo e metodologia utilizada para atingir os objetivos do trabalho. No Capítulo 4 foi detalhada região em estudo, os dados utilizados, em seguida apresentado o modelo hidrológico utilizado e análise estatística aplicada tanto na determinação do padrão de precipitação pluvial na Bacia Hidrográfica do rio São Francisco (BHSF) quanto na validação do IPHS1 e dados multivariados de precipitação pluvial. Já no Capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados obtidos através da metodologia. Finalizando, as conclusões e referências descritas nos capítulos 6 e 7, respectivamente.

CAPÍTULO 2 - OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar a eficiência de utilização conjunta da modelagem hidrológica e aplicação de técnicas estatísticas no entendimento da variabilidade relação chuva-vazão em regiões semiáridas com fortes influências antrópicas.

2.2. Objetivos Específicos

- Detectar padrões atmosféricos determinantes na distribuição espacial a temporal da precipitação pluvial na BHSF;
- Avaliar o grau de influência de perturbações atmosféricas transientes a pressões antrópicas nas vazões afluentes dos reservatórios de Sobradinho e Itaparica;
- Caracterizar a rede hidrográfica da BH de estudo, a partir dos dados referenciais do regime hidrológico do principal curso d'água (chuvas e vazões médias, mínimas e máximas);
- Avaliar o desempenho do modelo IPHS1 nas simulações de vazão em localidades vulneráveis a eventos meteorológicos extremos;
- Aplicar testes estatísticos para validação de resultados obtidos com a modelagem hidrológica e da análise fatorial.

CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Situada quase que totalmente em áreas de planalto a BHSF tem um leito com declive bastante acentuado (elevações entre 400 e 1000m) o que reflete o alto potencial de geração de energia hidrelétrica. Essa energia abastece parte da região Sudeste (usina de Três Marias, em Minas Gerais) e toda região Nordeste (usinas de Sobradinho, Itaparica e Paulo Afonso, na Bahia). Considerada sob o ponto de vista econômico como uma das Bacias Hidrográficas (BH's) mais importantes do país, representa um significativo meio de ligação entre as Regiões Nordeste e Sudeste é tema de pesquisa com abordagens em diversas áreas científicas envolvendo aspectos sociais, políticos, econômicos e ambientais.

O grande número de barramentos realizados nas últimas décadas para construções das hidrelétricas na região do Médio e Submédio da Bacia, o planejamento e execução do projeto de transposição do rio São Francisco estão entre os temas de maior relevância abordados nas pesquisas científicas. Empreendimentos deste porte juntamente com a intensificação dos projetos de irrigação e atividades ligadas à pecuária levam à degradação ambiental, alterações no ciclo hidrológico e mudanças no clima local.

3. 1. Estudos realizados na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco

Estudos diversos foram realizados com o objetivo de analisar a variabilidade no comportamento de processos meteorológicos decorrentes das ações antrópicas na BHSF. Pela forte influência de mecanismo em escala local a grande maioria dos trabalhos abordou conjuntamente aspectos observacionais e de modelagem numérica da atmosfera. Através da técnica de análise de variância aplicada a grupo de dados coletados antes e depois da construção de Sobradinho, Correia (2001) mostrou que a inundação de áreas urbanas para formação do lago alterou significativamente o padrão de vento local e o teor de umidade atmosférica nos baixos níveis.

Simulações numéricas realizadas com modelo atmosférico RAMS mostram que a proximidade de grandes corpos d'água é um fator importante na organização de sistemas produtores de chuva em pequena e mesoescala devido à brisa gerada pelo aquecimento desigual da superfície e sua variação ao longo de 24 horas (CORREIA & SILVA DIAS, 2003). As autoras verificaram que no caso da represa de Sobradinho as

características do terreno na região do lago contribuem para o desenvolvimento de um sistema de circulações complexo, incluindo brisas lacustres, terrestres, ventos anabáticos e catabáticos.

Santos *et al.* (2010) estabeleceram relações entre padrões atmosféricos específicos, variabilidade temporal e espacial da precipitação e formação de cheias no semiárido da BHSF. As análises tiveram como foco a região do Submédio e parte do Médio do rio São Francisco. Os autores aplicaram a técnica de análise de componentes principais (ACP) e verificaram que um modelo com três componentes foi adequado para representar a estrutura das variáveis, retendo 60% da variância total da precipitação. Os autores concluíram que os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) foram determinantes para o desenvolvimento de sistemas precipitantes intensos e ocorrência de inundações a jusante do reservatório, nos meses de janeiro e abril de 1985, causando prejuízos econômicos para população.

A técnica de análise fatorial por componentes principais também foi usada por Souza *et al.* (2011) com o objetivo de avaliar padrões espaço-temporal da precipitação pluvial e identificar regiões homogêneas no Estado de Minas Gerais. Os resultados mostraram que sistemas precipitantes de várias escalas espaciais e temporais atuam na região do Alto São Francisco podendo gerar ondas de cheias em direção aos reservatórios inseridos ao longo do rio. É importante ressaltar que cerca 36% da BHSF está localizada no Estado de Minas Gerais.

3. 2. Simulação e Modelagem Hidrológica

Durante muito tempo os estudos de simulação e modelagem hidrológica foram desenvolvidos predominantemente com base em dois componentes do ciclo hidrológico: a precipitação, como principal parâmetro de entrada; e, a vazão como saída, e pequena ênfase era dada às fases de interceptação pela cobertura vegetal, armazenamento superficial, infiltração da água no solo ou evapotranspiração. No entanto, a compreensão do conjunto de processos físicos que ocorrem na bacia hidrográfica é imprescindível para interpretar os resultados obtidos, suas limitações e aplicabilidade a outras áreas (McCULLOCH & ROBINSON, 1993).

Modelos hidrológicos representam ferramentas poderosas em análises científicas que se usadas adequadamente permitem entender e representar melhor o comportamento da BH. A simulação hidrológica é limitada pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos, o que tem propiciado o desenvolvimento de um grande número

de modelos que se diferenciam em função dos dados utilizados, discretização das propriedades de representação dos processos e dos objetivos a serem alcançados.

As limitações básicas dos modelos hidrológicos são a quantidade e a qualidade dos dados hidrológicos disponíveis, além da dificuldade de formular matematicamente alguns processos e a simplificação do comportamento espacial de variáveis e fenômenos.

Silva *et al.* (2007) desenvolveu um estudo na BHSF com o objetivo de aprimorar a metodologia de acoplamento entre modelos atmosféricos e hidrológicos. Para isso usou dados de chuva previstos com os modelos de circulação geral (global) e ETA (regional) como entrada para o modelo hidrológico MGB-IPH. Os resultados foram analisados com enfoque nas usinas de Três Marias e Sobradinho. Quando comparados com o modelo estocástico PREVIVAZM do Operador Nacional do Sistema elétrico (ONS), verificou-se que, em Três Marias, mostraram que o modelo hidroclimático não apresentou vantagens e em relação à usina de Sobradinho o modelo hidroclimático com chuva mostrou pequena vantagem significativa quando usado para antecedências de até 2 meses.

Furtunato (2004) utilizou o modelo hidrológico NAVMO para simular os efeitos da variabilidade de elementos climáticos importantes e uso do solo no escoamento superficial da Bacia do Alto Paraíba. Os resultados mostraram que o modelo simulou razoavelmente bem os processos hidrológicos e que o escoamento é afetado principalmente pela variabilidade conjunta da precipitação e evaporação. Quando avaliados separadamente verificou-se que a precipitação é a variável climática que mais afeta o escoamento e que o efeito da evaporação isoladamente é pequeno.

Marins (2004) avaliou os efeitos do assoreamento sobre a propagação de cheias no reservatório do Vacacaí-Mirim em Santa Maria (RS) por meio da aplicação do modelo IPHS1. O autor concluiu que a redução da capacidade de amortecimento de ondas de cheias encontrada foi pequena tendo em vista o acentuado processo de assoreamento sofrido pelo reservatório ao longo de sua operação. Entretanto, a aplicação do modelo IPHS1 foi válida para a simulação dos níveis do reservatório nos cenários descritos, sendo uma ferramenta útil para o estudo da variabilidade dos reservatórios mediante as alterações ocorridas ao longo dos anos.

Souza *et al.* (2010) aplicaram o modelo IPHS1 na BH do rio Araguari (AP) a fim de simular a variação da vazão com a precipitação, com intuito de verificar possível impacto ambiental na vazão de saída com a construção de barragens ao longo do Rio.

Os autores verificaram que o modelo hidrológico apresentou resultados relevantes na representação do hidrograma em pontos específicos na Bacia, mas com pequenas discrepâncias entre valores dos fluviogramas observados e os simulados na Bacia, os quais foram decorrentes da ausência de dados em algumas localidades na BH, o que dificultou a análise preditiva mais precisa sobre o comportamento hidráulico.

3.3. Análise Multivariada de Variáveis Hidrometeorológicas

Devido à grande escassez de dados observacionais adequados em regiões remotas, diversos estudos aplicam técnicas estatísticas de análise multivariada que ajudam determinar padrões atmosféricos nas diversas escalas espaciais e temporais que afetam o comportamento de variáveis hidrometeorológicas.

No início dos anos 90 do século XX, a ecologia aquática apresentou um novo paradigma para a restauração de rios, alterada pelas atividades antrópicas, o conceito de “regime fluxo natural” que tem permitido a formulação de novos problemas em estudos de impactos hidrológicos sobre barragens. No contexto do estudo desenvolvido por Matteau *et al.* (2009), foram apresentados dois problemas: (1) seleção das variáveis hidrológicas mais alteradas por barragens e (2) identificação dos fatores que influenciam a extensão das alterações hidrológicas. Os autores resolveram as questões utilizando análise multivariada, mais especificamente, a análise de componentes principais e análise canônica.

Os métodos foram aplicados pela primeira vez em análises de impactos hidrológicos em barragens. O primeiro método permitiu a seleção das variáveis hidrológicas mais alteradas a jusante da barragens no Québec (Canadá). Quanto aos fatores que influenciam a magnitude destas mudanças, a análise de correlação canônica mostrou a influência do tipo de regime regulado (barragem modo de gestão), e, em menor grau, o tamanho da BH.

Pandzic & Trninic (1999 - 2000) aplicaram ACP para relacionar a precipitação pluvial mensal, os campos de vazão e a distribuição de pressão ao nível do mar no Euro-Atlântico Norte na Bacia do rio Sava que cobre a parte sul da Planície Pannonian. Os autores verificaram duas diferentes sub-regiões dentro da Bacia do rio Sava em relação aos regimes de precipitação mensal e de vazão. Além disso, quatro padrões de anomalias foram estabelecidos, incluindo a correlação bastante elevada entre os campos meteorológicos e hidrológicos. Por último, foi observada uma associação da precipitação e vazão na Bacia do rio Sava com anomalias nos campos de pressão ao

nível do mar foi observado. Estes resultados corroboraram com a técnica de análise de agrupamento utilizada, também, por Pandzic & Trninic (1998) que relacionaram chuva, vazão e anomalias anuais de pressão no nível do mar anuais na Europa. Esta análise mostrou altas correlações espaciais com eventos extremos.

Galvêncio & Sousa (2002) realizaram estudos com ACP para observar a relação entre a atuação do fenômeno do El Niño e La Niña e os totais mensais de precipitação na BHSF. Os autores verificaram que ao contrário do que se acreditava, o impacto do El Niño na produção de água, no âmbito da BHSF, é positivo, ou seja, em anos de El Niño a Bacia produz mais água que em anos de La Niña, visto que, grande parte do volume escoado sobre o rio é proveniente do Alto São Francisco, onde ocorre elevados índices pluviométricos sob a influência deste fenômeno. Por outro lado, a precipitação na região a jusante do reservatório Sobradinho é fortemente reduzidas com a atuação do El Niño.

Sobradinho é considerado um reservatório de usos múltiplos e foi planejado para ter água disponível (sem problemas) por um período superior a um ano (independente da atuação do principal fenômeno produtor de chuvas, o El Niño). Na prática isso não tem acontecido e as explicações são diversas. No entanto, existe um consenso em relação ao aumento na demanda pela água resultante do crescimento na ocupação do solo (urbanização e expansão da agricultura irrigada).

Ceballos & Braga (1995) aplicaram a análise de agrupamento hierárquico em regiões homogêneas de radiação global diária para estimar dados locais baseados em estações circunvizinhas. Para a simulação das séries adotou-se um critério no qual os estimadores das componentes principais podem ser obtidos com base no método dos mínimos quadrados. Os resultados obtidos foram satisfatórios com erros padrão que não ultrapassaram 5%.

Lima *et al.* (2010) aplicaram análise de componentes principais e agrupamento em 28 estações distribuídas no Nordeste do Brasil (NEB) com objetivo de identificar locais com regime de ventos favoráveis a produção de energia eólica. Os resultados permitiram concluir que as áreas serranas e litorâneas são mais favoráveis para geração de energia.

Silva Oliveira (2011) também utilizou análise multivariada para analisar a variabilidade de vento no NEB. Os resultados mostraram uma variabilidade na velocidade do vento sobre a região litorânea; nos meses menos (mais) chuvosos os valores são maiores (menores) entre 4 a 6 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (1 e 3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). A variabilidade encontrada nos padrões de ventos médios mensais é devido principalmente à alta subtropical do

Atlântico Sul e a outros sistemas atmosféricos de grande escala que atuam nos meses de maior pluviosidade.

Escobar (2007) fez uma padronização sinótica de seqüências de campos de pressão ao nível médio do mar (PNMM) e de altura geopotencial em 500 hPa associada com a ocorrência de ondas de frio na cidade de São Paulo (SP). Para obter os padrões básicos de seqüências da PNMM e da altura geopotencial em 500 hPa foi utilizada a metodologia de (ACP) rotacionadas. Os resultados mostraram 3 tipos de padrões de circulação com ondas de frio para a cidade de São Paulo durante o período 1960-2002 que representam aproximadamente 70% dos casos. O padrão dominante mostrou o ingresso de anticiclones pós-frontais intensos em superfície, aproximadamente em 80°W e 45°S, e a presença de uma crista em altitude no Oceano Pacífico, próximo à costa do Chile, favorecendo a advecção de ar frio sobre o centro-sul do Brasil. O segundo padrão está associado a eventos de ciclogêneses no oceano Atlântico, na altura da região sul do Brasil, e a presença de uma configuração de bloqueio em altitude. Por último, observou-se um padrão relacionado com a passagem de frentes frias com trajetória predominantemente zonal, devido à presença de um intenso cavado orientado na direção quase meridional no sul do continente.

Em se tratando de precipitação pluvial, diversos trabalhos abordam esta variável no estudo com análise multivariada. A técnica permite tanto identificar sistemas atmosféricos de diversas escalas que atuam sobre as regiões, como verificar regiões homogêneas na pluviometria. Muñoz-Díaz & Rodrigo (2004) utilizaram ACP e análise de agrupamento em dados de precipitação sazonal para dividir a Espanha em um número limitado de regiões climaticamente homogênea. Usando a técnica de agrupamento hierárquico através do método de Ward, três grupos foram obtidos no inverno e na primavera, e quatro grupos foram obtidos no verão e outono. A comparação das duas técnicas indicou que o método é adequado para estabelecer padrões espaços-temporais de distribuição sazonal da precipitação na Espanha.

Castañeda & González (2008) usaram ACP para descrever a climatologia da precipitação na Patagônia Argentina e abordar o problema de tendências de chuvas. O uso da técnica mostrou um máximo de precipitação no noroeste da região e revelou que os totais pluviométricos no inverno superam os do verão, especialmente sobre os Andes. De acordo com as análises verificaram tendências positivas de chuva sobre o norte e sul patagônico e negativo na região oeste e central.

Villar *et al.* (2009) estudaram a variabilidade espaço-temporal da precipitação na Bacia Amazônica (Brasil, Peru, Bolívia, Colômbia e Equador) através de componentes principais rotacionadas. Verificaram que as maiores variabilidades interdecadais e interanuais da chuva ocorrem no período chuvoso da região (dezembro a maio) e que estão relacionadas a mudanças de longo prazo do Oceano Pacífico e a eventos de ENOS.

No Brasil há outros trabalhos com uso desta ferramenta estatística. Keller Filho *et al.* (2005) aplicou o método de Ward (1963) para identificar regiões uniformes quanto à distribuição de chuvas e assim contribuir para estudos de riscos climáticos na agricultura. A análise permitiu identificar 25 zonas de chuvas homogêneas em todo território brasileiro.

Vale ressaltar que a aplicação de análise multivariada não se torna viável em uma única variável meteorológica com pouca variação dependendo da escala de tempo e espaço como umidade e temperatura em regiões tropicais. Não se percebe alterações consideráveis, por exemplo, na umidade na Amazônia ou radiação em regiões equatoriais. Logo não tem sentido utilizar tal ferramenta nestes parâmetros. Além disso, a ACP reduz o número de variáveis concentrando seu peso sobre as componentes.

O Alto São Francisco estende-se desde a cabeceira, na Serra da Canastra, município de São Roque de Minas, até a cidade de Pirapora (MG), abrangendo as sub-bacias do rio das Velhas, Pará e Indaiá, além das sub-bacias dos rios Abaeté a oeste e Jequitaí a leste. Situado em Minas Gerais, abrange a Usina Hidrelétrica de Três Marias, e tem uma topografia ligeiramente acidentada, com serras e terrenos ondulados.

O Médio São Francisco compreende o trecho entre Pirapora e a cidade de Remanso (BA), incluindo as sub-bacias dos afluentes, Pilão Arcado, a oeste e Jacaré, a leste. Além dessas, abrange também as sub-bacias dos rios Paracatu, Urucuia, Carinhanha, Corrente, Grande, Verde Grande e Paramirim, situadas nos Estados de Minas Gerais e Bahia. Nesta região as condições atmosféricas tornam-se típicas de uma área com clima tropical semiárido.

O Submédio São Francisco abrange áreas dos Estados da Bahia e Pernambuco, no trecho entre Remanso e a cidade de Paulo Afonso (BA), incluindo as sub-bacias dos rios Pajeú, Tourão e Vargem, além da sub-bacia do rio Moxotó, último afluente da margem esquerda.

O Baixo São Francisco compreende o trecho entre Paulo Afonso à foz, no Oceano Atlântico, e abrange as sub-bacias dos rios Ipanema e Capivara. Situa-se em áreas dos estados da Bahia, Pernambuco, Sergipe e Alagoas. Na Tabela 1, pode-se verificar de forma resumida uma descrição de cada sub-bacia localizada na BHSF.

Tabela 1. Localização das sub-bacias

Sub-bacias*	Descrição
40	Área de drenagem do alto São Francisco até a barragem de Três Marias
41	Compreendida entre Três Marias e a confluência com rio das Velhas
42	Compreendida entre a confluência com rio das Velhas e a confluência do rio Paracatu
43	Compreendida entre a confluência com rio Paracatu e a confluência do rio Urucuia
44	Compreendida entre a confluência com rio Urucuia e a confluência do rio Corrente
45	Compreendida entre a confluência com rio Verde Grande e a confluência do rio Corrente
46	Compreendida entre a confluência com rio Corrente e a confluência do rio Grande
47	Compreendida entre a confluência com rio Grande e a confluência do rio Salitre
48	Compreendida entre a confluência com rio Salitre e a confluência do rio Pajeú
49	Compreendida entre a confluência com rio Pajeú e a foz do rio São Francisco

*Localização das sub-bacias segundo Agência Nacional de Águas

Na Figura 2 observam-se as principais sub-bacias descritas na Tabela 1, no qual segue numeradas de acordo com a ANA. Cada sub-bacia tem importância fundamental

na demanda hídrica da Bacia, pois contribuem alimentando o rio São Francisco através do escoamento de suas águas para calha principal do velho Chico.

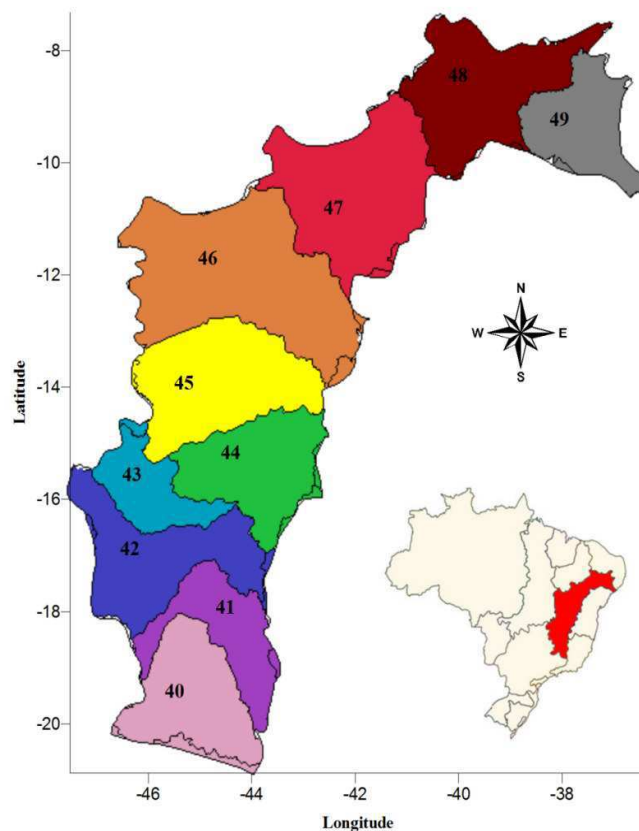


Figura 2. Distribuição das sub-bacias da BHSF
Fonte: Adaptado de ANA, 2011

Os principais reservatórios do rio São Francisco (Sobradinho, Itaparica, Paulo Afonso e Xingó) produzem energia hidrelétrica e se transformam em pólos regionais de desenvolvimento, com a intensificação de usos múltiplos nos últimos 10 anos: irrigação, suprimento de água, turismo e recreação, pesca comercial e pesca esportiva. Os dados para a represa de Xingó indicam um reservatório pouco eutrofizado, mas com evidências claras de efeitos ambientais resultantes dos usos das BH's, principalmente na qualidade da água. O rio São Francisco tem uma enorme importância regional, e pode ser considerado como um dos principais fatores de desenvolvimento no NEB. Através de inúmeros planos de desenvolvimento, um conjunto de idéias de grande porte vem sendo construída, de tal forma que um plano integrado de desenvolvimento, envolvendo

agências de governo federal, governos estaduais, iniciativa privada foi gerado (CODEVASF, 2011).

4.2. Dados

4.2.1. Observados

As principais séries de dados de precipitação pluvial utilizada neste estudo consistem em registros diários, mensais e anuais feitos de estações climatológicas e meteorológicas pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Companhia de Hidrelétrica do São Francisco (CHESF) e Agência Nacional de águas (ANA) distribuídas uniformemente sobre a Bacia no período de 1961 a 2009. No total de foram utilizados 70 postos pluviométricos distribuídos na BHSF como podem ser visto na Figura 3.

As series das vazões afluentes nos reservatórios de Sobradinho e Itaparica foram utilizadas na parametrização (dados de entrada) do modelo.

Na avaliação da variabilidade chuva-vazão em situações críticas sob ponto de vista hidrológico e meteorológico as análises foram concentradas no Submédio e Médio da BHSF. Neste contexto, dois anos foram selecionados. O ano de 2005 cuja evolução temporal das vazões se mostrou dentro da média histórica foi considerado como normal sob o ponto de vista hidrológico e escolhido como base para ajuste do modelo. O ano de 2007, por sua vez, foi escolhido por ter sido considerado significativo sob ponto de vista hidrológico com base na forte variabilidade no volume de Sobradinho conforme informações contidas em relatórios técnicos da (ANA).

Apesar do reservatório de Sobradinho atingir 100% da capacidade e armazenamento de água em março de 2007, não garantiu pleno funcionamento das principais atividades econômicas dependentes dos recursos hídricos da região. Setores importantes dependentes da geração de energia elétrica e agricultura irrigada da região foram substancialmente afetados. Possivelmente, a redução no volume de água do reservatório em Sobradinho ocorreu pela influência do fenômeno de La Niña que diminuiu as chuvas no Alto e Parte do Médio da BHSF.

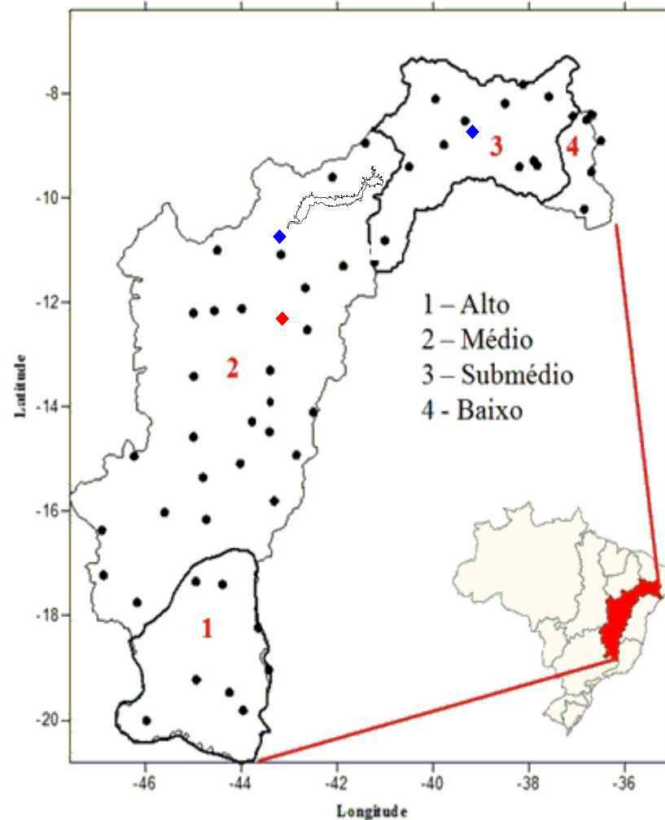


Figura 3. Distribuição espacial dos postos pluviométricos na BHSF

4.3. Modelo Hidrológico

Na realização deste estudo foi utilizado o modelo IPHS1 com a finalidade de simular a vazão em pontos específicos do rio (no trecho compreendido entre o Médio e Submédio do rio São Francisco). Os valores simulados foram comparados com dados observados.

4.3.1. Modelo Hidrológico IPHS1

O modelo IPHS1 foi desenvolvido por Tucci *et al.* (1989) na versão DOS e apresentada por Viegas *et al.* (2000) na versão Windows. Consiste de um sistema computacional modulado, composto de vários modelos existentes em literatura que possibilitam a obtenção de hidrogramas de projeto através da combinação de algoritmos possibilitando a composição de um modelo próprio do usuário.

Na realização de estudos de propagação de cheias (chuva *versus* vazão) faz-se necessária a disponibilidade de séries hidrológicas de vazão, muito embora segundo Tucci (1993) e Viegas *et al.* (2004) afirmam que normalmente são mais curtas que as

séries de precipitação disponíveis. Os modelos de precipitação-vazão representam parte do ciclo hidrológico entre a pluviometria e o escoamento superficial. Os modelos hidrológicos devem assimilar a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação, declividade do solo, o fluxo através do solo pela infiltração, percolação e água subterrânea, escoamento superficial, subsuperficial e no canal principal (BRUN, 1999).

Os modelos chuva-vazão permitem simular a parte do processo do ciclo hidrológico entre a precipitação e a vazão, sendo possível completar períodos desconhecidos de vazão e cota, além de estimá-las para diferentes cenários de bacias hidrográficas e prever a ocorrência de cheias ou outros eventos extremos. Dentre os modelos de chuva-vazão, há aqueles específicos que podem ser usados para tais fins, dependendo dos parâmetros/características da bacia (GERMANO *et al.*, 1998).

No modelo IPHS1 estão acoplados vários modelos hidrológicos, com destaque o IPH II que gera resultados do objetivo de estudo. O Modelo IPH II é do tipo concentrado (uniforme), aplicado para projetos de engenharia em bacias rurais e urbanas, o qual necessita de poucos parâmetros e se baseia em metodologias conhecidas.

O IPHS1 possibilita a realização das simulações para série de dados, considerando suas respectivas médias diárias ou mensais. Chuvas e características físicas da BH (comprimento, largura, profundidade do rio, declividade, área das sub-bacias) são consideradas como informações de entrada do modelo.

Germano *et al.* (1998) utilizaram dados hidrológicos para representar eventos de cheia referentes a 28 bacias urbanas brasileiras de seis diferentes cidades, ajustando o modelo IPH II para cada um deles. Baseado nas respostas obtidas, o estudo propôs a utilização de valores médios para os parâmetros do modelo, sendo calculadas através de equações empíricas, funções das características fisiográficas das bacias. Meller *et al.* (2002) aplicaram o modelo IPH II em sub-bacias localizadas na BH do Vacacaí-Mirim. Os parâmetros resultantes da calibração dos eventos de cheia foram equiparados aos propostos por GERMANO *et al.* (1998).

4.3.1.1. Estrutura do modelo IPHS1

O sistema IPHS1 permite a representação da bacia em estudo em dois módulos básicos: Bacia e Rio (detalhados mais adiante). Essa característica permite a subdivisão da bacia em sub-bacias, trechos de canais e inclui a operação de barragens (Figura 4). O

hidrograma de projeto é determinado com o auxílio da precipitação da região, das características físicas da bacia e de parâmetros de modelos de transformação chuva-vazão.

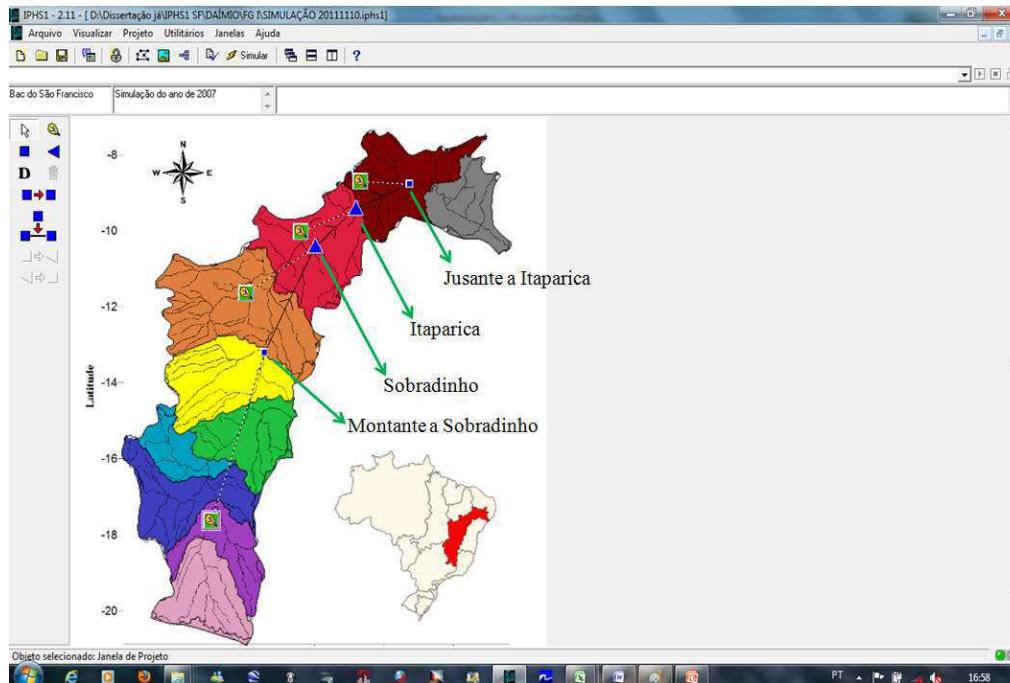


Figura 4. Interface do IPHS1 com destaque para bacia e aplicativos (sub-bacias, trechos de canais e barragem) do modelo

As diferentes fases do processo de transformação de precipitação em vazão são modeladas por algoritmos matemáticos. Na literatura há diferentes algoritmos compostos, os quais identificam modelos tais como HEC-1, SSARR, IPH II, STANFORD IV e HYMO entre outros (VIEGAS *et al.*, 2004). Segundo Tucci (1993), a estrutura modular do modelo IPHS1 tem como objetivo: a) melhorar a compreensão dos processos hidrológicos e dos algoritmos utilizados na simulação; b) ensino de modelos matemáticos; c) oferecer alternativas de escolha do melhor conjunto de algoritmos para uma bacia específica. O sistema de modulação pode ser obtido em versão WINDOWS para PC, ou em versão FORTRAN. No primeiro caso, a entrada de dados é disponibilizada em forma amigável mediante telas explicativas, programadas em DELPHI, permitindo uma fácil integração com o usuário. Os algoritmos de cálculo e a saída foram programados em FORTRAN devido à versatilidade para programação de complicados algoritmos de cálculo. Aos usuários principiantes recomenda-se o uso de

interface WINDOWS, e para programadores existe a possibilidade de acesso às rotinas fontes, que permitirão adaptar o sistema de modulação a requerimentos específicos.

Internamente o sistema está modulado segundo operações hidrológicas, oferecendo as seguintes opções: a) transformação chuva-vazão; b) escoamento em rios; c) propagação em reservatórios; d) entrada, somas ou derivação de hidrogramas. Para cada uma destas opções são fornecidas as características físicas da bacia e os dados históricos. O modelo compõe os resultados de acordo com a numeração seqüencial informada pelo usuário. Cada número identifica o hidrograma resultante no final da bacia ou trecho.

O sistema é formado por três componentes: a) leitura de dados e manejo de arquivos; b) modelos; c) impressão e graficação. A primeira componente (Versão WINDOWS) permite gerar os arquivos de informações que contém os parâmetros, dados hidrológicos e/ou características físicas da bacia de acordo com as necessidades do usuário. Para facilitar a entrada de dados, a interface dispõe de bases de valores dos distintos parâmetros da metodologia de simulação, para distintas situações, podendo ser escolhido o parâmetro em função da informação contida na própria base de dados ou fornecida pelo usuário (TUCCI, 1993).

A segunda componente está dividida em dois módulos: a) módulo da Bacia; b) módulo do Rio. Cada módulo é formado por sub-módulos que realizam operações hidrológicas específicas. Por sua vez, cada sub-módulo apresenta como opções diferentes algoritmos de cálculo.

4.3.1.1.1. Módulo da Bacia

No módulo da Bacia faz-se a divisão do sistema (Bacia) em Sub-Bacias, de acordo com suas características físicas e climáticas, disponibilidade de dados e locais de interesse. Em seguida, a transformação da chuva em vazão para cada Sub-Bacia é feita escolhendo-se os algoritmos de cálculo para a realização das seguintes operações hidrológicas. A Figura 5 ilustra este módulo.



Figura 5. Interface com os módulos da Bacia

Fonte: Viegas *et al.* (2004)

O módulo da Bacia tem a seguinte configuração (VIEGAS *et al.*, 2004):

Separação de Escoamento: separa a parcela de chuva efetiva para a determinação do escoamento direto. Podendo-se aplicar os seguintes algoritmos:

- Algoritmo de Horton modificado – IPH II;
- Método de relações funcionais ou da curva número (SCS);
- Método Exponencial (HEC-I);
- Índice ϕ ;
- Equação de Holtan.

Propagação do Escoamento superficial: é a transformação da chuva efetiva no hidrograma de escoamento direto. Pode ser feita pelos seguintes algoritmos:

- Hidrograma unitário fornecido;
- Hidrograma unitário triangular do SCS;
- Método de Nash modificado (HYMO);
- Método Clark.

Quando a chuva efetiva é calculada pelo algoritmo de Horton Modificado, estimando-se desta forma a infiltração e a percolação tornam-se possível calcular o escoamento de base produzido pela bacia por meio de um reservatório linear simples. Nesta pesquisa foi utilizado o modelo IPH II para trabalhar em conjunto com o método de escoamento superficial Clark no qual foram os modos utilizados nesta pesquisa, visto que, apresentam os parâmetros que melhor representam a bacia de estudo.

Modelo IPH II

Dentre os modelos da série foi escolhido o IPH II que é um modelo do tipo concentrado, aplicado para projetos de engenharia em bacias rurais e urbanas e é o que mais se ajusta às características da região de estudo. Além disso, necessita de poucos parâmetros e se baseia em metodologias conhecidas.

O modelo tem como base um algoritmo de separação do escoamento desenvolvido por Berthelot (1970) *apud* Bravo *et al.* (2007), que utiliza equações de continuidade, combinada com a equação de Horton e uma função empírica para a percolação. Berthelot *et al.* (1972), Sanchez (1972) e Muñoz & Tucci (1974) *apud* Tucci (1998), obtiveram bons resultados ao aplicarem o algoritmo em um modelo chuva-vazão nas bacias dos rios Capivari (SC), Cauca (Colômbia) e Chasqueiro (RS) respectivamente.

O modelo é composto pelos seguintes algoritmos (GERMANO *et al.*, 1998):

- Perdas por evaporação e interceptação;
- Separação dos escoamentos;
- Propagação do escoamento superficial;
- Propagação subterrânea;
- Otimização dos parâmetros (opcional).

Os parâmetros que compõem o modelo IPH II são:

- I_o → capacidade de infiltração máxima do solo (mm);
- I_b → capacidade de infiltração mínima do solo (mm);
- H → parâmetro de decaimento da infiltração no solo (adimensional);
- $R_{máx}$ → capacidade máxima do reservatório de interceptação (adimensional).

Uma análise da sensibilidade dos parâmetros feita por TUCCI (1979) *apud* TUCCI (1998), que constatou que **I_o , I_b , e H** são os mais sensíveis no controle de volumes do hidrograma. Os dois primeiros variam com o valor de H , e o aumento dos três parâmetros produzem redução do volume de escoamento superficial.

Método CLARK

O método Clark (1945) é uma combinação do histograma tempo-área (HTA) com reservatório linear simples (RLS), como indicado pela Figura 6. HTA é a razão entre a translação da chuva e o deslocamento sobre a superfície da bacia. RLS são os

efeitos de armazenamento das partículas de água no percurso até o ponto de saída da bacia.

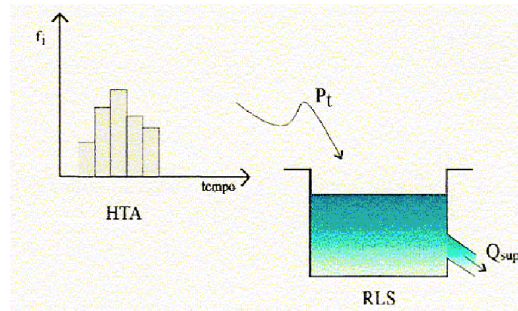


Figura 6. Método de Clark

Fonte: Mine (1998).

Para obter HTA deve-se estimar o tempo de concentração (T_c) da sub-bacia e a posição das isócronas, que são pontos com igual tempo e traslado com igual tempo de controle (Figura 7). Para cada isócrona “ i ” deve-se calcular a área “ A_i ” tracejada “ A_n ”. A partir das diretrizes HEC, os histogramas de tempo-área têm as formas mostradas na Figura 8.

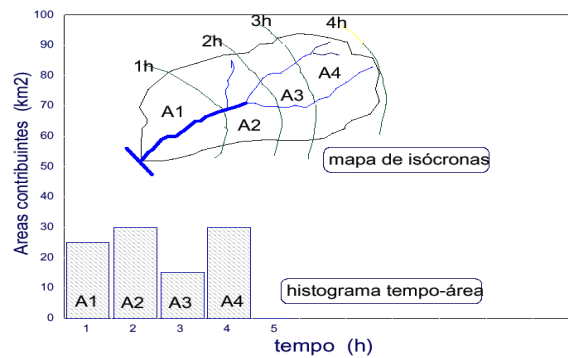


Figura 7. Isócrona e histograma tempo – área

Fonte: Viegas *et al.* (2004)

A área acumulada de contribuição é relacionada ao tempo de percurso pelas Equações (3), (4) e (5).

$$A_c = a.T^n \quad (03)$$

$$A_c = 1 - a.(1 - T^n) \quad (04)$$

$$a = (0.5)^n \quad (05)$$

em que: A_c é a área acumulada expressa relativamente à área total; T é o tempo em unidades do tempo de T_c ; n : é um coeficiente que varia com a forma da bacia.

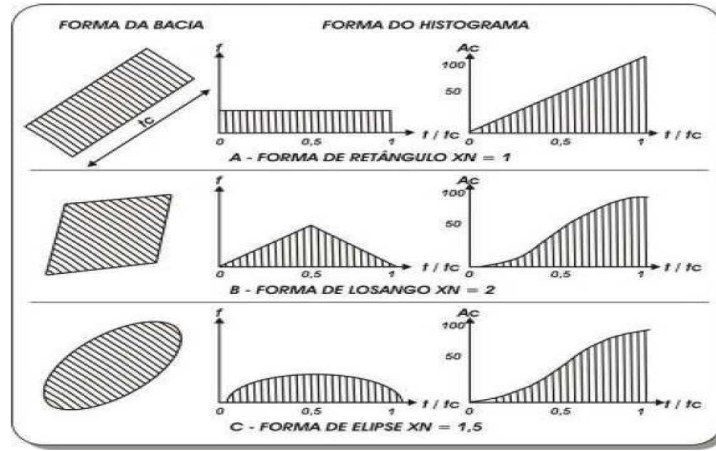


Figura 8. Formas de histograma tempo-área para diferentes valores do parâmetro XN
Fonte: GERMANO *et al.* (1998).

Cada lâmina de chuva efetiva é distribuída no tempo pelo HTA e filtrada pelo (RLS), já a vazão de saída é dada pela Equação 6.

$$Q_{(t+1)} = Q_{(t)} \cdot e^{-\frac{t}{\Delta k}} + VE_{(t+1)} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\Delta k}}) \quad (06)$$

em que: $Q_{(t)}$ é a vazão de saída no instante t ; $VE_{(t+1)}$ é a vazão de entrada ao RLS; K é a constante de armazenamento do RLS.

Os parâmetros são fornecidos pelo usuário ou podem ser calculados pelo modelo, utilizando as Equações 7 e 8.

$$T_{(c)}(h) = 3,83 \cdot \frac{A^{0,41}}{S^{0,17}} \quad (07)$$

$$K(h) = 125,5 \cdot \frac{A^{0,23}}{S^{0,7}} \quad (08)$$

em que: A é a área da bacia em Km^2 ; S é a declividade média da bacia em $(\text{m} \cdot 10\text{Km}^{-1})$.

As seguintes expressões obtidas para bacias urbanas brasileiras, por GERMANO (1998) foram desenvolvidas para uso com o modelo IPH II usando as equações (9) e (10):

$$T_{(c)} \text{ (min)} = 18,628 \cdot \frac{L^{0,882}}{IMP^{0,272}} \quad (09)$$

$$K \text{ (min)} = 24,058 \cdot \frac{L^{1,063}}{S^{0,126} \cdot IMP^{0,549}} \quad (10)$$

em que: L é o comprimento do principal do rio em Km; S é a declividade do rio principal em %; IMP é a área impermeável.

Os parâmetros que compõem o modelo Clark são:

- Ks (h) → Retardo do reservatório linear simples (entre 0 e 15);
- XN → Forma do histograma tempo-área (entre 0 e 2).

4.3.1.1.2. Módulo Rio

É composto dos algoritmos que fazem a propagação das ondas de cheia nos rios, canais e reservatórios (Figura 9).

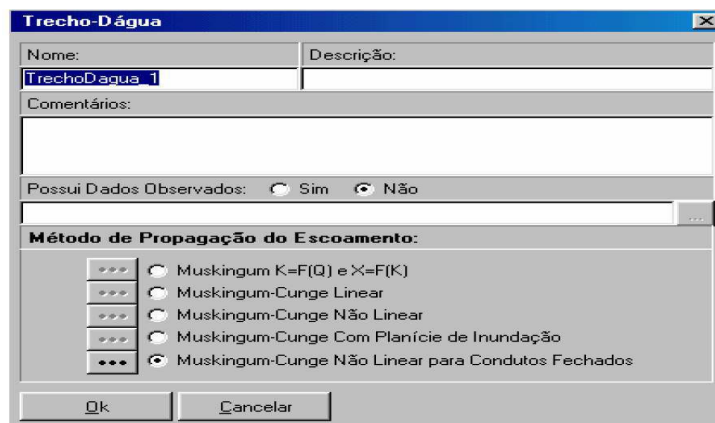


Figura 9. Propagação de cheia no trecho do rio
Fonte: Viegas *et al.* (2004)

O módulo Rio é dividido em três partes:

- Escoamento em rios;
- Escoamento em reservatório;
- Derivações de vazões.

Para o escoamento em rios propriamente existem as seguintes opções:

- Modelo Muskingum: desenvolvido por McCarthy (1940) o algoritmo está baseado na equação da continuidade concentrada e numa função que relaciona o armazenamento com as vazões de entrada e saída do trecho de propagação.

- Modelo Muskingum- Cunge linear ou não linear: Cunge (1969) relacionou a difusão numérica produzida pelo Método de Muskingum com o coeficiente de difusão hidráulica da equação de difusão linearizada. Os parâmetros K e X podem ser estimados pelas características físicas do trecho e pela discretização.

- Modelo Muskingum- Cunge não linear com planície de inundação: Está baseado na metodologia apresentada por Miller & Cunge (1975) utilizando o método Muskingum-Cunge para o caso de extravasamento da calha principal em caso de uma cheia.

Para escoamento em reservatório foi utilizado o método de Pus oferecendo como opções: fornecimento das características das estruturas de saída da água (vertedores ou orifícios) ou diretamente a vazão e saída, operação de comportas, operação de um *bypass* que permita a simulação de reservatório do tipo *off-line*.

Para a derivação de vazões o sistema oferece um algoritmo para simular a separação de fluxo ou divergência produzida por um canal de derivação sem estrutura de controle, neste caso a derivação pode ser diretamente em função das características dos canais, ou mediante uma percentagem fixa.

A terceira e última parte do sistema é a saída que tem por finalidade apresentar os dados utilizados e os resultados numéricos e gráficos, quando solicitados. Esta é realizada dentro da interface do WINDOWS, podendo ser os gráficos exportados para planilhas eletrônicas ou processadores de texto. Dentro da saída do modelo na interface Windows se inclui a saída original do KERNEL FORTRAN (núcleo de cálculo) que embora com menor detalhamento gráfico, possui maiores informações sobre a simulação (valores de parâmetros, singularidades de simulação, etc.) que permitiriam realizar uma análise mais detalhada de singularidade da simulação.

4.3.2. Ajuste e Calibração do IPH II

Obtidos os valores de precipitação dos postos de chuva e características das peculiaridades das sub-bacias, os parâmetros (Tabela 2) do modelo IPH II foram estimados de tal forma que a vazão nos pontos de controle (a montante ao reservatório de Sobradinho, afluente a Sobradinho e Itaparica) se equiparasse com os valores observados. O ponto a montante de Sobradinho (localizado no Médio da BH) está a 250 km de sua afluência, com propósito de verificar influência de sistemas precipitantes neste ponto e, conseqüentemente, no reservatório de Sobradinho.

Tabela 2. Parametrização do modelo de escoamento superficial IPH II

Parâmetros	I_0 (mm/h)	I_b (mm/h)	H	R_{max} (mm)	% da Área Impermeável	VBEIC* (m ³ /s/km ²)
Montante a Sobradinho	10	9	0,5	2,5	0,16	0,01
Sobradinho	8	3	0,5	25	0,10	0,01
Itaparica	11	5	0,5	28	0,10	0,01

*Vazão de Base Específica no Início da Chuva (m³/s/km²)

A princípio, os dados utilizados na parametrização do modelo foram da literatura (GERMANO *et al.*, 1998; BRUN & TUCCI, 2001; TUCCI, 2005). Para tornar os dados próximo dos resultados observados foi necessário fazer uma calibração ou ajustes através de tentativas. Na calibração os valores usados para I_0 variaram entre 6 a 15 mm.h⁻¹, para I_b foram utilizados valores entre 2 a 20 mm.h⁻¹ modificados constantemente até a resposta almejada (resultados equiparados aos observados). Posto que o parâmetro de decaimento da infiltração no solo H é muito sensível, foi determinado um valor constante baseado nos valores encontrados na literatura. Como este parâmetro é adimensional o valor adotado foi 0,5. Assim, foram trabalhados apenas os valores de infiltração I_0 e de percolação I_b . Os valores de R_{max} foram estimados entre $1,4 < R_{max} < 33$. A porcentagem da área impermeável variou 0,10 a 0,20%, pois se trata de uma área praticamente rural. Por fim, a Vazão de Base Específica no Início da Chuva (VBEIC) que é a vazão estimada para o início da chuva, é inversamente proporcional a área da sub-bacia em km². Os valores de VBEIC foram estimados na ordem de 0,002 a 0,02 m³.s⁻¹.km² para BHSF.

4.4. Análise Estatística

Análise Fatorial em componentes principais foi aplicada para determinar padrões de variabilidade temporal e espacial das precipitações na região de estudo. Foram utilizados dados mensais de precipitação coletados em estações meteorológicas/climatológicas distribuídas na BHSF. A análise das cargas fatoriais temporais e dos escores espaciais mais significativos foi utilizada na identificação de sistemas precipitantes na BHSF e sua relação com hidrogramas observados ao longo do rio São Francisco.

A utilização adequada da técnica de análise multifatorial permite eliminar informações redundantes e determinar padrões específicos de chuva através da análise das variâncias, e correlacionar com a vazão.

4.4.1. Análise Fatorial em Componentes Principais

É um método subjetivo que foi introduzido pela primeira vez em estudos meteorológicos por Lorenz (1956). Neste trabalho foi denominada como Funções Ortogonais Empíricas (FOE) para destacar sua natureza não analítica (BRAGA, 2000). Este método tem por objetivo transformar p variáveis originais correlacionadas em componentes não correlacionadas ou ortogonais, sendo estes componentes funções lineares, em que p variáveis originais são medidas em n indivíduos (BOUROCHE & SAPORTA, 1982).

A técnica também permite a redução da dimensão da matriz original de dados pela máxima variância que explica a classificação dos autovetores associados aos maiores autovalores da matriz de correlação, ou seja, os dados originais podem ser analisados a partir de um número pequeno de componentes independentes entre si (PREISENDORFER, 1988).

As informações na análise fatorial é a matriz de dados (PANDZIC, 1988), em n observações existem m variáveis, então a matriz de dados normalizada de precipitação pluvial pode ser apresentada por $Z_{(m \times n)}$, a partir da qual se obtém a matriz de correlação R dada pela Equação 11.

$$R = \frac{1}{n-1}(Z)(Z)' \quad (11)$$

em que: $(Z)'$ é a matriz transposta de Z ; $R_{(k \times k)}$ uma matriz simétrica positiva diagonalizável por uma matriz A , denominada de autovetores. A matriz diagonal D cujos elementos diagonais são os autovalores (λ) de R , é expressa pela Equação 12.

$$D = A^{-1}RA \quad (12)$$

Com base no princípio da ortogonalidade dos autovetores, a inversa de A (A^{-1}) é igual a sua transposta (A^t). Logo, as CPs Z_1, Z_2, \dots, Z_n são obtidas por combinações lineares entre a transposta dos autovetores (A^t) e a matriz de observações (Y), ou seja, dada pela Equação 13.

$$Z = A^tY \quad (13)$$

Cada linha de Z corresponde a uma CP que forma as séries temporais associadas aos autovalores. Os valores de Y do n -ésimo local podem ser calculados pela Equação 14.

$$Y_i = a_{j1}Z_1 + a_{j2}Z_2 + \dots + a_{jk}Z_k + a_{np}Z_p \quad (14)$$

A Equação 14 tem solução única e considera a variação total presente no conjunto das variáveis iniciais, onde a CP1 (primeira componente) explica o máximo possível da variância dos dados iniciais. Enquanto a CP2 explica o máximo possível da variância ainda não explicada e assim por diante, até a última CP que contribui com a menor parcela de explicação da variância total dos dados iniciais. Ou seja, cada CP tem uma parte da variância total dos dados originais e são ordenadas em ordem decrescente dos autovalores mais significativos de a_l em A , Equação (15):

$$Z_i = \sum_{j=1}^n a_{j,i} Y_j \quad (15)$$

O número escolhido de CPs é baseado no critério de truncamento de Kaiser, que considera como mais significativos os autovalores cujos valores sejam superiores a unidade “1” (BEZERRA, 2007).

A distribuição espacial dos fatores facilita a interpretação física correspondente às CP's. Quando a interpretação física é um objetivo principal de CP, muitas vezes é desejável girar um subconjunto dos autovetores inicial para um segundo conjunto de novos vetores de coordenadas. , através de uma transformação linear (WIKS, 2006). Neste estudo, foi utilizada a rotação VARIMAX, mantendo a correlação entre as componentes independentes e a máxima variância em cada componente, dada pela Equação 16:

$$Var = \frac{\sum_{j=1}^r \left(m \sum_{i=1}^m (a_{ij})^2 - \left(\sum_{i=1}^m a_{ij}^2 \right)^2 \right)}{m^2} \quad (16)$$

em que: r é o número de CP's que representa as informações físicas e m o número de variáveis.

O principal objetivo da utilização de CP's rotacionadas é obter a maior concentração dos dados originais da série temporal nas CP's pela máxima variância. Em geral, a primeira solução obtida com a aplicação da ACP não fornece fatores que tenham a interpretação física mais adequada. Para aumentar o poder explicativo dos

fatores na análise efetuou-se o procedimento de rotação de fatores através do método VARIMAX. Nas CP's não rotacionadas tem-se característica normalizada da série temporal (CORRAR *et. al.*, 2007).

Com o uso da ACP é possível realizar a análise tanto no tempo como no espaço. Neste estudo, será utilizado o Modo-T para criar agrupamentos de variáveis e classificar os campos atmosféricos espaciais (ESCOBAR, 2007). Segundo Richman (1983) o Modo-T é uma ferramenta bastante útil para sintetizar e reproduzir padrões de circulações, quantificando a frequência e mostrando os períodos de tempo dominantes, ou seja, obter a evolução dos principais modos de circulação que permitam analisar a trajetória e comportamento dos sistemas sinóticos sobre determinadas áreas.

Para a determinação das situações meteorológicas correlacionadas com as componentes principais serão utilizadas séries temporais das cargas fatoriais que representam as correlações entre cada variável original e cada componente principal (RICHMAN, 1986). A análise das cargas fatoriais permite avaliar a representatividade dos padrões como situações reais. Valores próximos a 1 representam sequências de situações meteorológicas similares às sequências dos padrões obtidos (ESCOBAR, 2007). Serão elaborados mapas das distribuições espaciais dos principais fatores comuns temporais, que representam a contribuição destes em relação à variância total do conjunto de dados pluviométricos na região.

4.4.2. Teste Estatístico KMO e de Bartlett

Os Testes Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) e de Esfericidade de Bartlett, indicam qual é o grau de suscetibilidade ou o ajuste dos dados à análise fatorial, isto é, qual é o nível de confiança que se pode esperar dos dados quando do seu tratamento pelo método multivariado de análise fatorial seja empregada com sucesso (HAIR *et al.*, 1998).

O teste KMO apresenta valores normalizados (entre 0 e 1,0) e mostra qual é a proporção da variância que as variáveis (questões do instrumento utilizado) apresentam em comum ou a proporção desta que são devidas a fatores comuns.

Para interpretação do resultado obtido, valores próximos de 1,0 indicam que o método de análise fatorial é perfeitamente adequado para o tratamento dos dados. Por outro lado, para valores menores que 0,5; os fatores encontrados na Análise Fatorial não conseguem descrever as variações dos dados originais de maneira satisfatória (Tabela 3).

Tabela 3. Grau de ajuste através do teste KMO

KMO	Grau de ajuste à Análise fatorial
1,00 - 0,90	Muito Boa
0,80 - 0,90	Boa
0,70 - 0,80	Média
0,60 - 0,70	Razoável
0,50 - 0,60	Má
<0,50	Inaceitável

O segundo teste de Esfericidade de Bartlett é baseado na distribuição estatística de “qui quadrado” e testa a hipótese nula de que a matriz de correlação é uma matriz identidade, isto é, que não há correlação entre as variáveis (PEREIRA, 2001).

Valores de significância maiores que 0,100 indicam que os dados não são adequados para o tratamento com o método em questão; que a hipótese nula não pode ser rejeitada. Já valores menores que o indicado permite rejeitar a hipótese nula (HAIR *et al.*, 1998). A Tabela 4 resume a aplicação do teste de Bartlett.

Tabela 4. Teste de Bartlett

Valor de Significância	Adequação
<0,10	Adequado
≥0,10	Não Adequado

4.4.3. Teste Estatístico de Willmott

Os valores de vazão simulados no modelo hidrológico foram comparados com os dados observados por meio de índices estatísticos, como: o índice de concordância de Willmott (Willmott *et al.*, 1985), d (Equação 18), o coeficiente de correlação de Pearson, r (Equação 19) e pelo coeficiente de confiança ou desempenho (Equação 20). O teste é aplicado para validar os resultados simulados com os modelos, usados no preenchimento de falhas nas séries de dados.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (18)$$

em que: d , é o índice de exatidão, adimensional (seus valores podem variar de 0, para nenhuma concordância, a 1, para uma concordância perfeita); E_i , o valor estimado; O_i , o valor observado; \bar{O} , a média dos valores observados; e, N , número de observações.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E}) \times (O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 \times \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (19)$$

em que: r é o coeficiente de correlação de Pearson, adimensional; E_1, E_2, \dots, E_n e O_1, O_2, \dots, O_n são os valores estimados e medidos de ambas as variáveis, respectivamente.

$$c = r \times d \quad (20)$$

em que: c é o coeficiente de confiança ou desempenho, adimensional.

O critério proposto por Camargo & Sentelhas (1997) e usados na interpretação do coeficiente c , são descritos na Tabela 5.

Tabela 5. Critérios de interpretação do índice de desempenho (c) dos métodos de estimativa da vazão

Índice de Desempenho (c)	Classificação
> 0,85	Ótimo
0,76 - 0,85	Muito Bom
0,66 - 0,75	Bom
0,61 - 0,65	Mediano
0,51 - 0,60	Sofrível
0,41 - 0,50	Mal
< = 0,40	Péssimo

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Variabilidade mensal da vazão afluyente nos reservatórios de Sobradinho e Itaparica

5.1.1. Análise observacional

Na Figura 10 é apresentada a variabilidade mensal de vazão média, mínima e máxima afluyente ao reservatório de Sobradinho no período entre 1961 a 2009, e dos anos de 2005 e 2007. Vale ressaltar que o reservatório de sobradinho entrou em operação 100% no ano de 1979, logo foram considerados dados de vazão natural para representar o regime de chuvas do mesmo período.

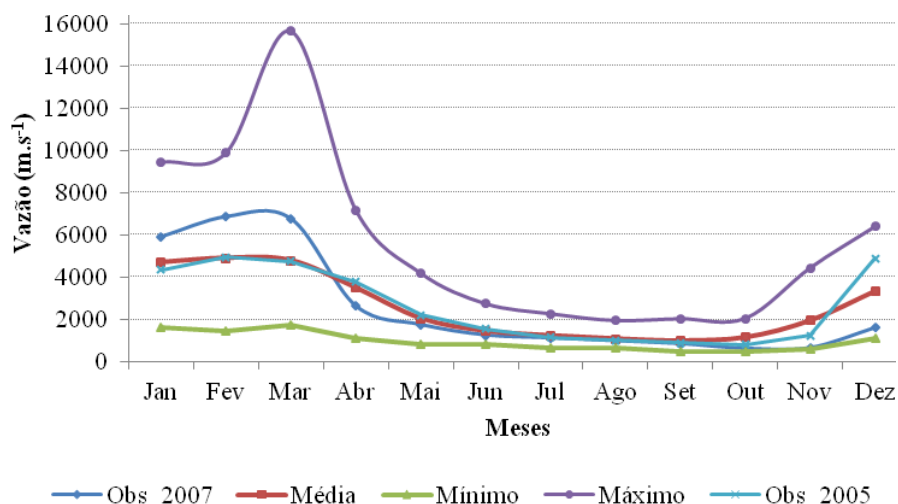


Figura 10. Variabilidade mensal da descarga líquida afluyente ao reservatório de Sobradinho

Fonte de dados: CHESF

A evolução da vazão em 2005, ano utilizado para o ajuste do modelo IPHS1, apresenta comportamento semelhante ao observado na curva construída com valores média histórica. Já o ano de 2007 (considerado atípico sob ponto de vista hidrológico) apresenta variações significativas. No primeiro trimestre de 2007 nota-se que os valores de vazão ficaram acima da média climatológica. Possivelmente, o aumento nas chuvas decorrentes atuação do fenômeno de El Niño (Região 3.4, Figura 12) entre agosto de 2006 e janeiro de 2007 (em vermelho, na Figura 11), aumentando os totais de chuva na região do Alto da BHSF, além da atuação de outros sistemas precipitantes como VCAN's e Linhas de Instabilidades (LI's) que contribuíram para que a vazão fosse

superior ao esperado. No intervalo entre os meses de abril e maio os valores de vazão foram inferiores ao esperado. Entre junho e setembro a vazão ficou em torno da média, mas de outubro a dezembro verificou-se que a vazão apresentou valores próximos aos mínimos, isso talvez esteja relacionado ao fenômeno de La Niña que foi verificado entre setembro de 2007 e maio de 2008, que contribui para a redução de chuvas no Alto da Bacia (em azul, na Figura 11). Uma discussão mais detalhada sobre os possíveis fatores físicos responsáveis por esta variabilidade é apresentada posteriormente nos resultados obtidos com a análise estatística com a aplicação da ACP.

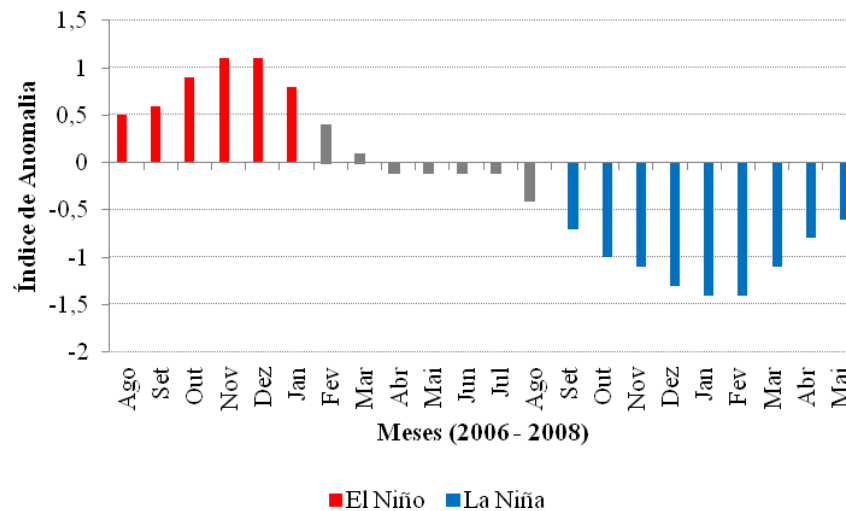


Figura 11. Índice de ENSO
Fonte: Adaptado de NOAA, 2011

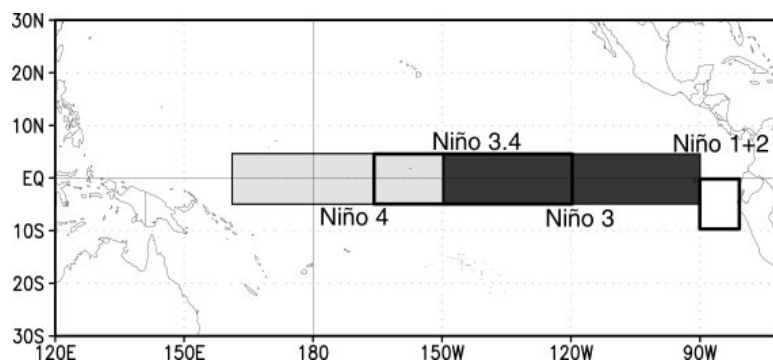


Figura 12. Área de El Niño no Oceano Pacífico

A Figura 13 mostra a variabilidade de descarga líquida afluente a Itaparica (a jusante a Sobradinho), em que se percebe que os valores médios históricos são praticamente idênticos ao de Sobradinho (Figura 10). Sabendo que o reservatório de

Itaparica foi construído na década de 80 (inaugurado em 1988), levou-se em consideração a vazão natural desde o ano de 1961. Esperava-se um aumento da vazão, visto que, há contribuições no período chuvoso dos afluentes do trecho entre os dois reservatórios mencionados (rio Pajéu, principal afluente), porém, vale ressaltar que os altos índices de evapotranspiração em torno de 3000 mm.ano^{-1} , chuvas em torno de 350 mm.ano^{-1} , e o crescimento de grandes empreendimentos agroindustriais ao longo das décadas e crescimento das cidades entre o trecho (por exemplo, Petrolina e Juazeiro) fez com que a água que incrementaria o reservatório de Itaparica fosse “desviada” para o abastecimento de água das cidades e na irrigação, muitas vezes com desperdícios (FREITAS *et al.*, 2006).

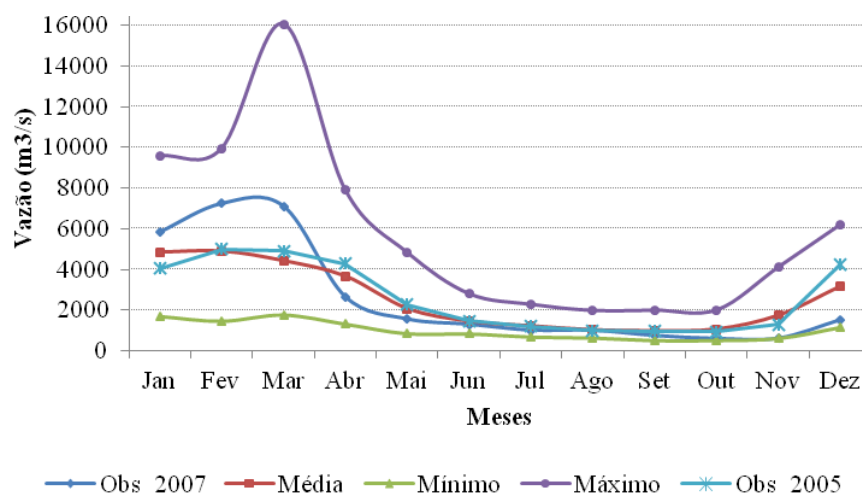


Figura 13. Variabilidade mensal da descarga líquida afluente ao reservatório de Itaparica

Fonte de dados: CHESF.

5.1.2. Simulações Numéricas

Na Figura 14 são apresentados hidrogramas observados e simulados nos 3 pontos específicos na Bacia (afluente a Sobradinho, Figura 14a), afluente a Itaparica (Fig. 14b e a montante da afluência de Sobradinho, Figura 15) para o ano de 2005. Os resultados dos modelos foram satisfatórios já que as curvas com os dados observados e simulados mostram comportamento semelhantes. Verifica-se que o modelo foi bastante eficiente em reproduzir o comportamento sazonal da vazão com valores elevados no período úmido (chuvoso) e valores mais baixos no período de estiagem. Por outro lado, observa-se também que apesar da clara reprodução na variabilidade mensal das vazões,

os valores simulados foram ligeiramente superestimados no período úmido. No caso de Itaparica observa-se uma inconsistência (valores inversos) entre resultados estimados e simulados nos meses de janeiro e maio.

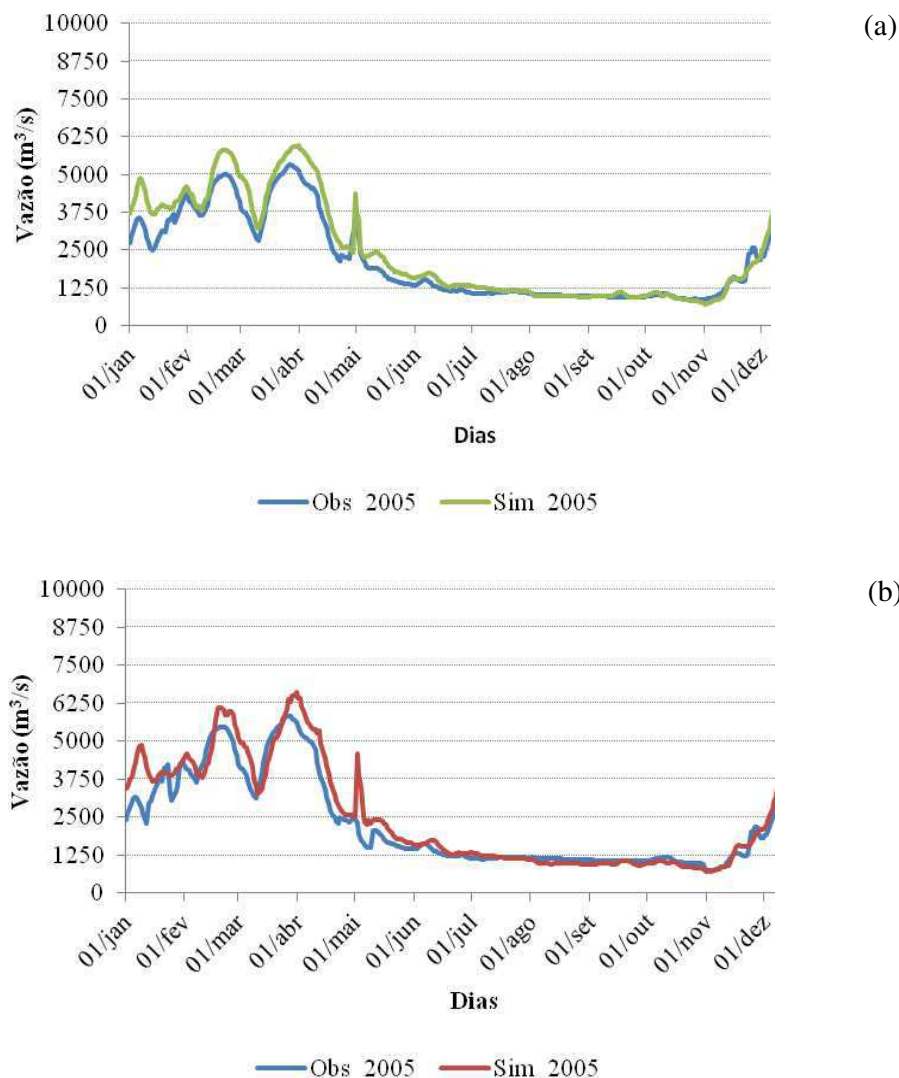


Figura 14. Resultados da simulação hidrológica: (a) hidrograma afluente ao reservatório em Sobradinho e (b) hidrograma afluente ao reservatório de Itaparica no ano de 2005

A evolução das vazões simuladas para 2005 no ponto de controle situado a montante de sobradinho e nas afluências a Sobradinho e Itaparica é apresentada na Figura 15. Foi verificado que no período úmido (1º semestre) os valores representam vazões coerentes, menores como esperado (Figura 15). Porém, no 2º semestre, os valores a montante de Sobradinho foram levemente superiores que os pontos a jusante

(afluente aos reservatórios Sobradinho e afluente ao de Itaparica), mas que pode ser explicado pelos grandes empreendimentos de irrigação, abastecimento das cidades de Petrolina e Juazeiro e altos índices de evapotranspiração.

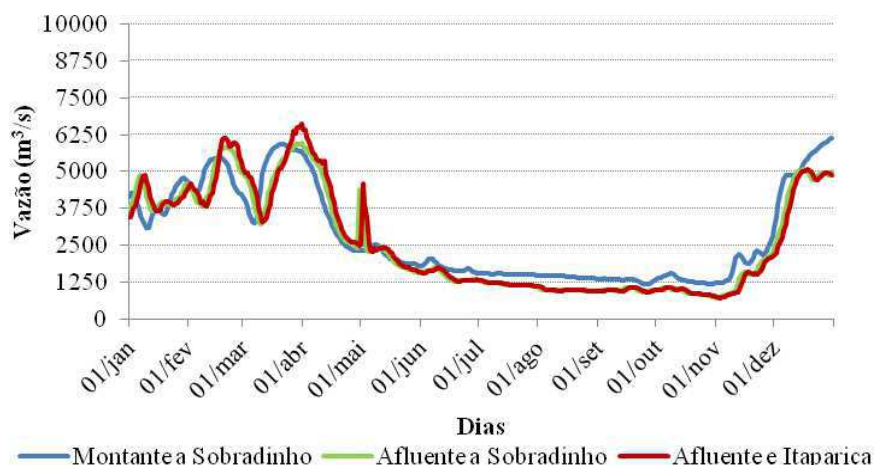


Figura 15. Variabilidade do hidrograma em três pontos da bacia no ano de 2005

Ainda na Figura 15 verifica-se que os hidrogramas apresentam variabilidades semelhantes em fases e amplitudes diferentes, mais evidentes no 1º semestre de 2005, visto que, há um retardo da onda de cheia entre os pontos, fato que corrobora com os resultados já mostrados.

5.1.3. O evento de 2007

A evolução diária da vazão observada e simulada afluente ao reservatório de Sobradinho é apresentada na Figura 16a. Verifica-se que apesar dos aspectos meteorológicos e hidrológicos atípicos (fora da média) o modelo reproduziu razoavelmente os picos de vazão registrados entre janeiro a abril de 2007.

Semelhantemente ao caso anterior (ano de 2005) é possível observar que principalmente no período úmido o modelo tende a superestimar os dados observados. Esse comportamento é justificado em função da variabilidade da precipitação decorrente de sistemas atmosféricos transientes no período. Conforme mencionado anteriormente na utilização de modelos de grandes bacias hidrográficas é necessário ajuste de parâmetros que estão associados com mecanismos de alteração na chuva e processos evapotranspiração. No entanto, é fundamental ressaltar que este resultado não

inviabiliza os objetivos do estudo. Neste trabalho especificamente a modelagem hidrológica tem como principal objetivo caracterizar a disponibilidade hídrica em condições atmosféricas específicas.

O grau de desempenho do modelo é mais nitidamente observado na curva de erro relativo diário estimado para o período, apresentado na Figura 16b. Percebe-se que os valores oscilam entre -45 a 20%, com médio em torno de -5% entre os dados simulados e observados.

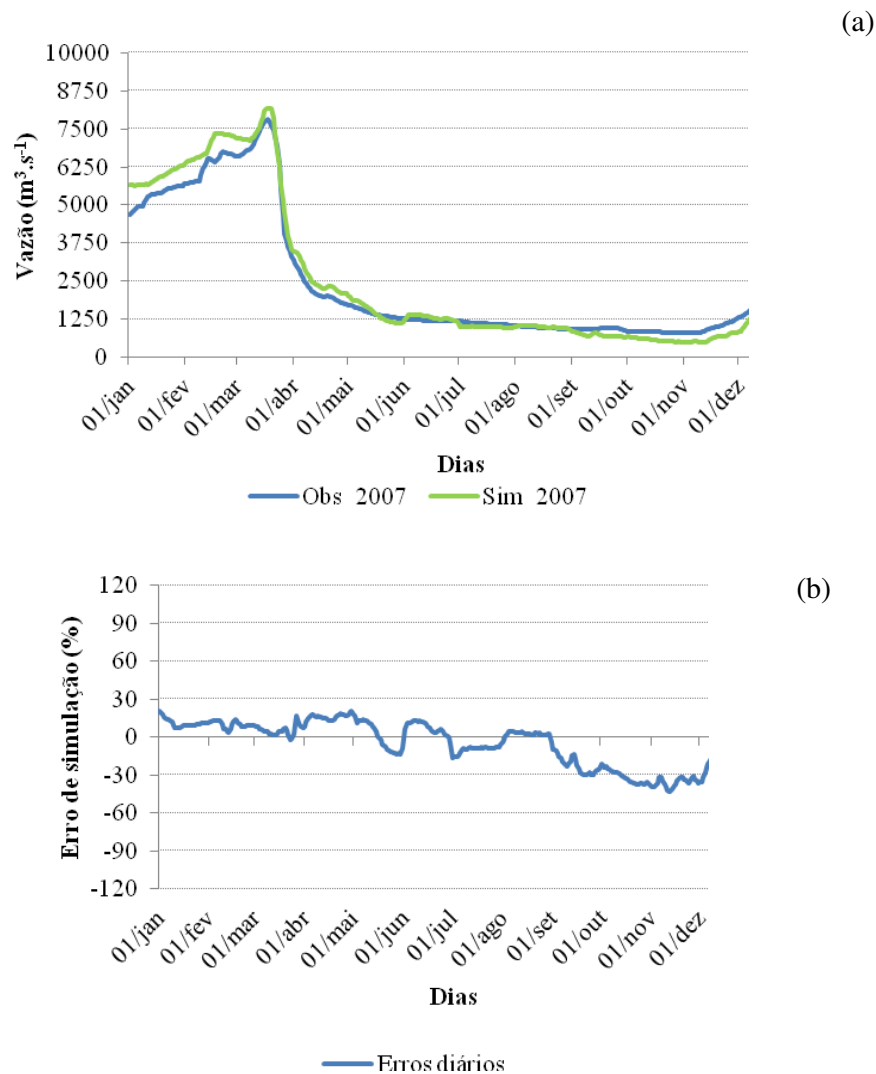


Figura 16. (a) Hidrograma afluente ao reservatório de Sobradinho e (b) diferenças percentual diária das vazões simuladas e observadas afluente ao reservatório de Sobradinho em 2007

O modelo representou com fidelidade o comportamento da vazão diária no ano de 2007 no ponto afluente ao reservatório em Itaparica (Figura 17a), subestimando o 1º trimestre, provavelmente devido às anomalias de precipitação, verificado na análise fatorial realizada para o ano de 2007 (Tópico 5.2.3). O modelo superestimou os valores de vazão em abril, entretanto no decorrer do ano os valores foram satisfatórios. Os erros percentuais diários oscilaram entre -45 a 110%, com média em torno de 15% ao longo do ano (Figura 17b). Vale ressaltar, que os resultados da simulação tanto afluente a Sobradinho quanto a Itaparica não influenciaram no objetivo da pesquisa, visto que, a idéia é identificar trechos de vulnerabilidade do ponto de vista hidrológico.

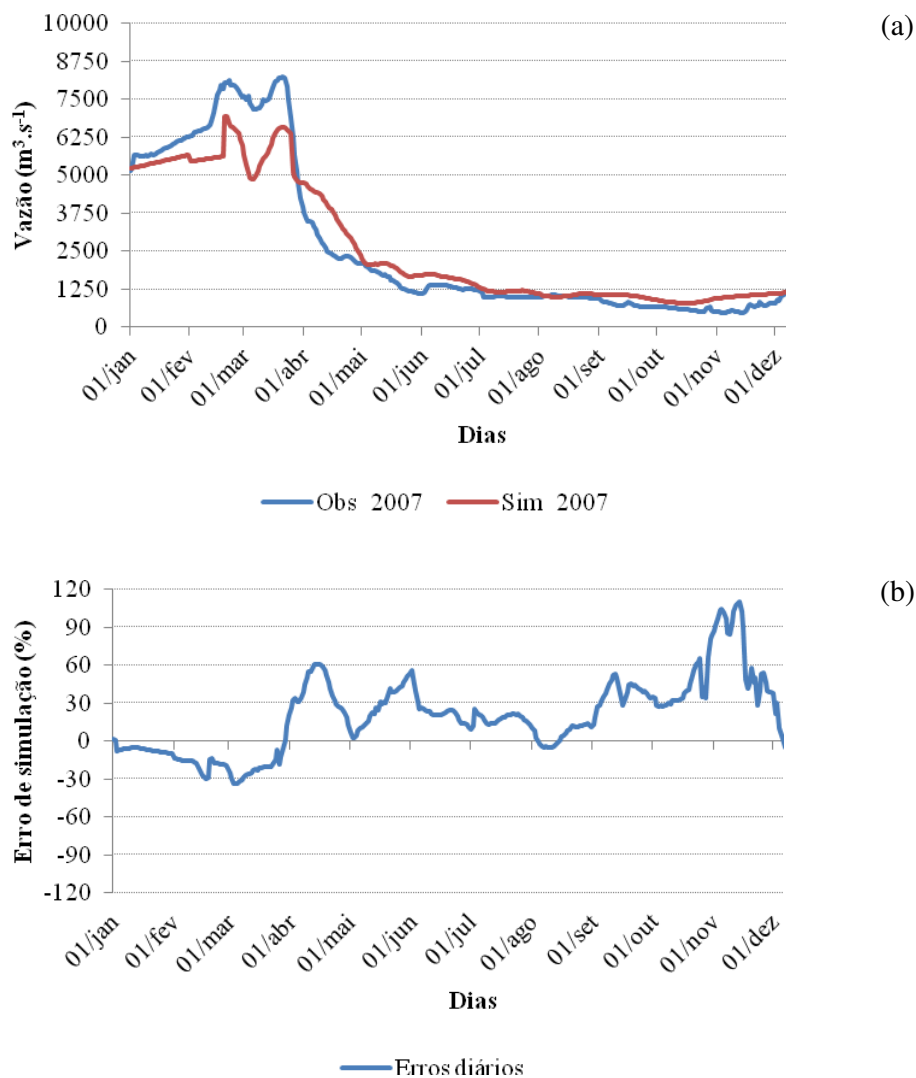


Figura 17. (a) Hidrograma afluente ao reservatório de Itaparica e (b) diferenças entre vazões simuladas e observadas afluente ao reservatório de Itaparica em 2007

Além disso, é importante salientar que os resultados foram comparados com as séries de vazões observadas, que podem conter inconsistências inerentes ao processo de cálculo, que inclui o balanço hídrico dos reservatórios. Pequenos erros na estimativa dos volumes armazenados podem causar diferenças importantes nas vazões. No caso de Itaparica, a dificuldade em realizar o balanço hídrico já é bastante conhecida e, certamente, é a principal fonte dos erros sistemáticos das previsões.

Na Figura 18 é representado o hidrograma simulado para a vazão no ponto a montante do Reservatório de Sobradinho e comparado com os demais pontos: afluente, Sobradinho e Itaparica.

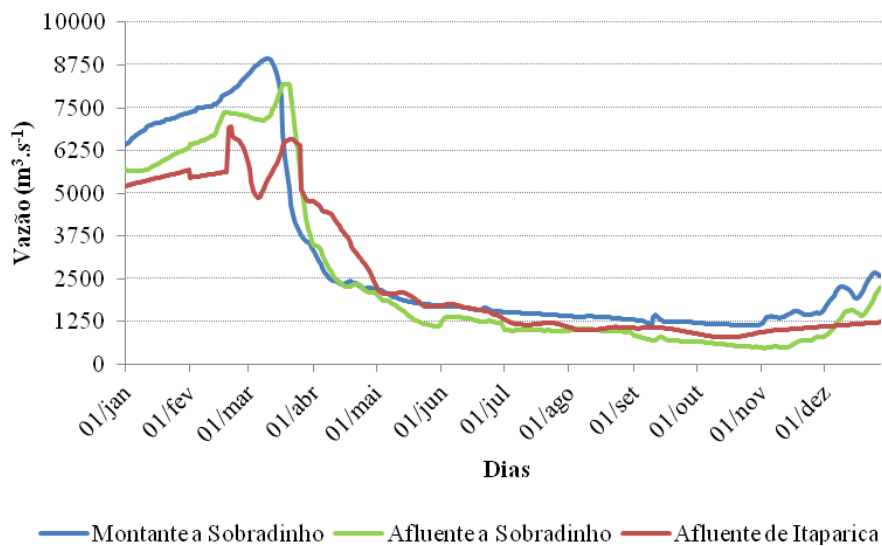


Figura 18. Variabilidade dos hidrogramas simulados para o ano de 2007 (a montante da afluência de Sobradinho, afluente a Sobradinho e afluente a Itaparica)

Percebe-se que no primeiro trimestre e a partir de julho os valores a montante ao reservatório de Sobradinho foram superiores aos demais pontos a jusante. Este fato pode ser explicado pela atuação de sistemas atmosféricos de mesoescala sobre o Médio da BHSF que causaram valores de vazão acima da média climatológica afluente a Sobradinho e Itaparica. Então, através da aplicação de análise fatorial foi possível identificar os sistemas precipitantes que atuaram na BHSF.

5.1.4. Teste de Willmott

A Tabela 6 apresenta os resultados estatísticos obtidos com o teste de Willmott cujos valores indicam o desempenho do modelo usado na pesquisa. Verifica-se que o desempenho foi considerado “Ótimo” em ambos os pontos afluentes aos reservatórios de Sobradinho e Itaparica no ano de 2005. Este resultado indica que o método usado na calibração foi adequado. No ano de 2007, o teste indica um “Muito bom” na afluência em Sobradinho e “Mediano” em Itaparica. Este resultado é esperado em função de maior irregularidade das chuvas no período úmido de 2007, o qual afetou parâmetros importantes do modelo calibrado de acordo com o ano padrão de 2005.

Tabela 6. Avaliação do desempenho do modelo hidrológico anual em 2005 e 2007

Ano	Reservatório	d	R	c	Desempenho
2005	Afluente a Sobradinho	0,98	0,99	0,97	Ótimo
	Afluente a Itaparica	0,97	0,96	0,93	Ótimo
2007	Afluente a Sobradinho	0,92	0,91	0,83	Muito Bom
	Afluente a Itaparica	0,92	0,66	0,61	Mediano

Portanto, é possível afirmar que o modelo hidrológico IPHS1 é uma ferramenta eficiente na previsão de vazão na BHSF, pois apresentou índice de exatidão “*d*” próximo de 1 (concordância quase perfeita) em todos os casos. E, apenas em Itaparica no ano de 2007 que o coeficiente correlação “*r*” não foi satisfatório estatisticamente talvez por fatores que o modelo não pôde assimilar anomalias de chuvas, rios intermitentes, áreas de irrigação, abastecimento de água, etc.

5.2. Análise Estatística

5.2.1. Distribuição espacial da precipitação pluvial

Dados climatológicos dos totais anuais de precipitação coletados em estações meteorológicas situadas na BHSF permitiram avaliar o regime predominante de chuvas na região foco deste estudo. A distribuição espacial da chuva apresentada na Figura 19 mostra nitidamente pelo menos dois regimes de precipitação com valores acima de 1500 mm no Alto São Francisco e totais anuais abaixo de 500 mm no setor mais árido denominado de Submédio da BHSF.

Mesmo abastecida pela região úmida de Minas Gerais, a BHSF apresenta um problema crônico de secas, principalmente nas sub-bacias de seu trecho semiárido.

Muitas destas sub-bacias são compostas por rios intermitentes, que têm seus vales utilizados por pequenos agricultores.

Sabe-se que o reservatório de Sobradinho depende essencialmente das chuvas do Alto São Francisco, então se elaborou a distribuição da precipitação climatológica sobre a BHSF e buscou-se identificar sistemas meteorológicos precipitantes que influenciam direto/indiretamente no padrão das chuvas na Bacia (Figura 19).

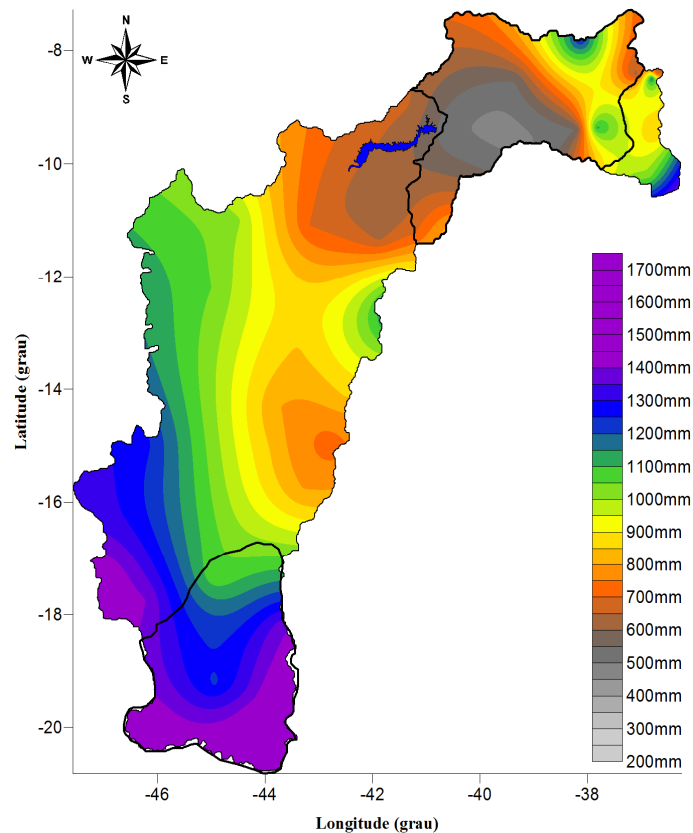


Figura 19. Espacialização dos totais médios anuais pluviométricos (mm) na BHSF entre 1961 a 2009

A variabilidade espacial das chuvas na BHSF permitiu identificar a existência de, pelo menos, dois regimes pluviométricos (Sul e Nordeste da Bacia). Observa-se que os maiores totais pluviométricos ocorreram no setor Alto da Bacia (região sul) com cerca de 1000-1600 mm.ano⁻¹.

Grandes períodos sem ocorrência de enchentes são suficientes para encorajar a ocupação das várzeas de inundação, com cultivos ou mesmo habitações, o que ocasiona prejuízos e impactos sobre seus moradores por ocasião de cheias. Apesar das chuvas no Baixo São Francisco apresentarem comportamento diferente, concentrando-se de abril a

junho, sua influência não afeta nas vazões do Submédio da BHSF. Portanto, o período de dezembro a março é o mais crítico em relação à ocorrência de enchentes na BHSF. É nesta época que se intensificam os procedimentos que visam ao controle de cheias, em particular à operação dos reservatórios e aos sistemas de alerta. Percebe-se uma faixa de transição na região do Médio da Bacia com observações de 800-900 mm.ano⁻¹. Os menores valores foram encontrados na região Submédio com precipitação pluvial inferiores a 500 mm.ano⁻¹. Esses valores corroborando com RIMA (2004). A distribuição espacial pluviométrica observada sugere que a região em estudo é afetada por diferentes sistemas precipitantes, de várias escalas, como Sistemas Frontais (Frente Fria), ZCAS, ZCIT, Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL), VCAN, além de sistemas de meso e microescala.

Além disso, na Figura 20 é apresentada a variabilidade espacial do total anual pluviométricos na Bacia no ano de 2007. Este ano apresenta uma peculiaridade muito importante em termo de demanda hídrica para Bacia, em que há influência do fenômeno do El Niño e La Niña de intensidade forte que reduziu os índices de chuvas na região do Alto São Francisco e que deveria aumentar sobre o Médio e Baixo São Francisco. Segundo Climanálise (2007), a influência sobre o Médio e Baixo não foi mais evidente devido atuação de LI's e VCAN's que ficaram com núcleos estacionários sobre as regiões inibindo a formação de nuvens convectivas conforme observado na Figura 20.

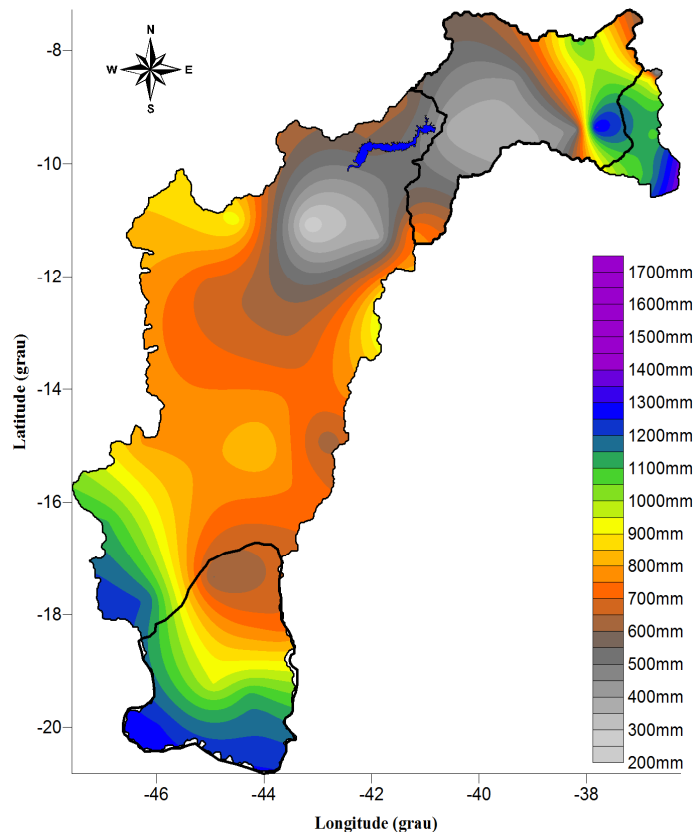


Figura 20. Espacialização do total anual pluviométrico (mm) na BHSF no ano de 2007

Percebe-se que os valores com maior pluviosidade é verificado em alguns trechos da subdivisão (Alto, Médio, Submédio e Baixo) da BHSF, em que o total anual ficou em torno de 300 e 1200 $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$. Já os menores valores concentraram-se em dois núcleos no Médio e Submédio da Bacia, em média de 250-350 $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$.

Sabe-se que a água que abastece o reservatório de Sobradinho depende basicamente da quantidade de chuvas Alto da bacia do São Francisco. Logo, percebe-se que os totais anuais de chuva no ano de 2007 (Figura 19) foram inferiores aos valores climatológicos (Figura 18). Poder-se-ia questionar porque o primeiro trimestre (janeiro, fevereiro e março) foi superior e inferior no último trimestre (outubro, novembro e dezembro) no ano de 2007 em relação aos valores médios de vazão (Figura 21).

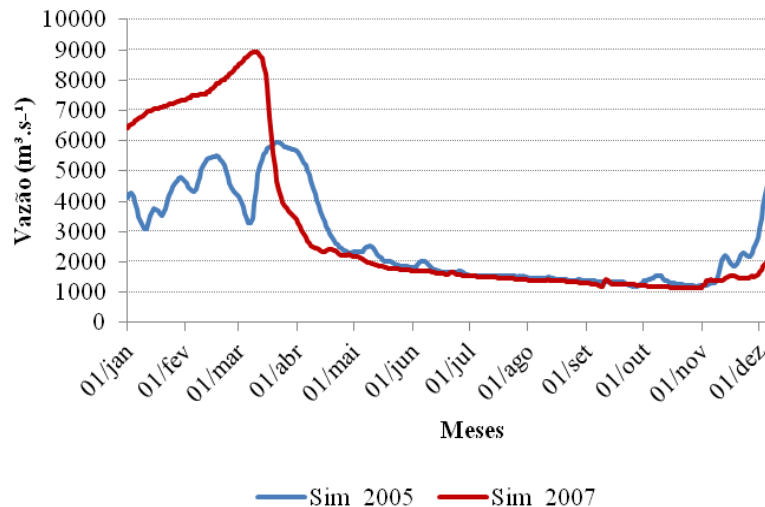


Figura 21. Variabilidade mensal da descarga líquida a montante do ponto afluente a Sobradinho

Percebe-se que a vazão simulada no ano de 2007 foi superior ao de 2005 no primeiro trimestre e inferior no último. Possivelmente, este fato ocorreu devido à atuação de sistemas precipitantes de mesoescala que causaram mudanças neste padrão de chuvas. Então, realizou-se a variabilidade espacial primeiro e último trimestre dos dados de precipitação climatológica e do ano de 2007, inclusive foi plotado a rede hidrográfica da Bacia (Figuras 22, 23, 24 e 25). Observa-se que apesar totais de chuvas terem sido superior nos dados climatológicos no Alto São Francisco, destaque na cor roxa, (Figura 23), houver chuvas em torno de 800 mm na região sudoeste do Médio da Bacia hidrográfica e um núcleo de na região central do Médio São Francisco (Figura 22). Além disso, vale lembrar que neste trimestre houver influência da fase de El Niño aumentando os totais de chuvas no Alto e Médio da BHSF que contribui de forma positiva no incremento de vazão em Sobradinho. Logo, é necessário levar em consideração sistemas precipitantes que atuam no Médio, os quais contribuíram no aumento de vazão no reservatório de Sobradinho em janeiro, fevereiro e março. E, outro detalhe, o rio São Francisco tem 168 afluentes, sendo 90 pela margem esquerda e 78 pela margem direita. Quanto ao regime, 99 são perenes e 69 intermitentes. São 36 os tributários de porte significativo, dos quais somente 19 são perenes (CODEVASF, 2012). Portanto, é justificada a vazão no ano de 2007 no primeiro trimestre apresenta-se com valores superiores aos dados climatológicos, visto que, a densidade de afluentes serem maior na parte leste da BHSF, contribuindo no escoamento superficial.

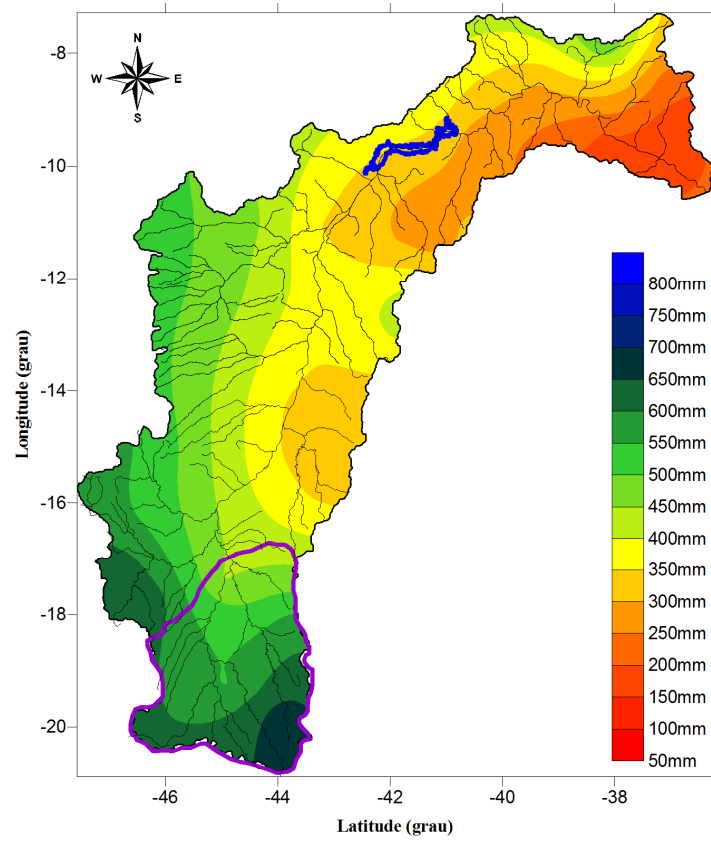


Figura 22. Espacialização da precipitação pluvial no ano de 2005 no primeiro trimestre (janeiro, fevereiro e março)

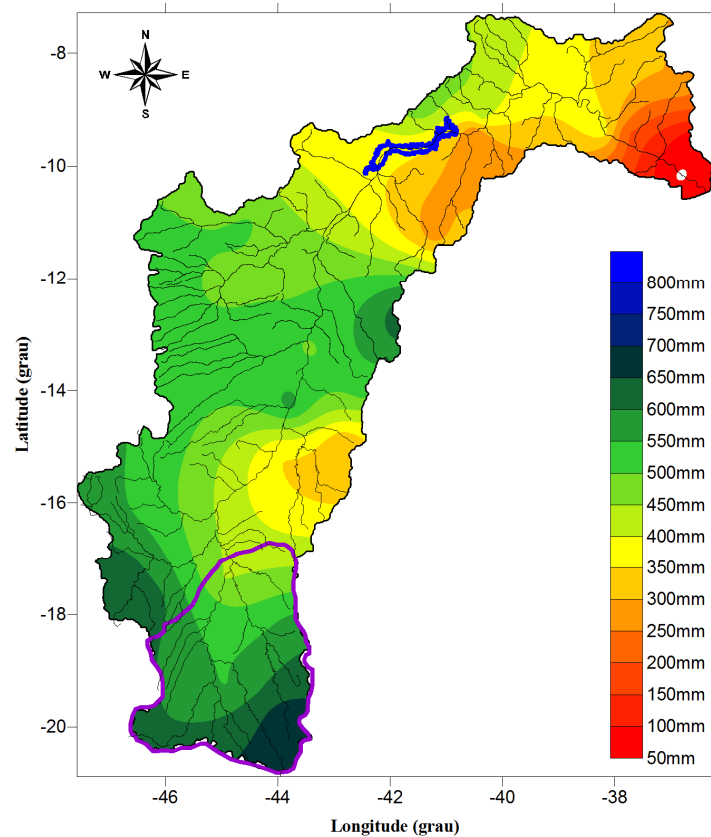


Figura 23. Espacialização da precipitação pluvial no ano de 2007 no primeiro trimestre (janeiro, fevereiro e março)

A comparação do trimestre (outubro, novembro e dezembro) mostrou que além de valores superiores no Alto da Bacia dos dados climatológicos, houve valores maiores no Médio São Francisco (Figura 24). Já no ano de 2007 verificaram-se valores abaixo da média que justifica os dados de vazão em Sobradinho apresenta-se abaixo da Média climatológica. Vale lembrar que o ano de 2007, apresentou a fase de La Niña, a qual contribuiu para valores iguais à zero no Submédio e Baixo São Francisco (Figura 25).

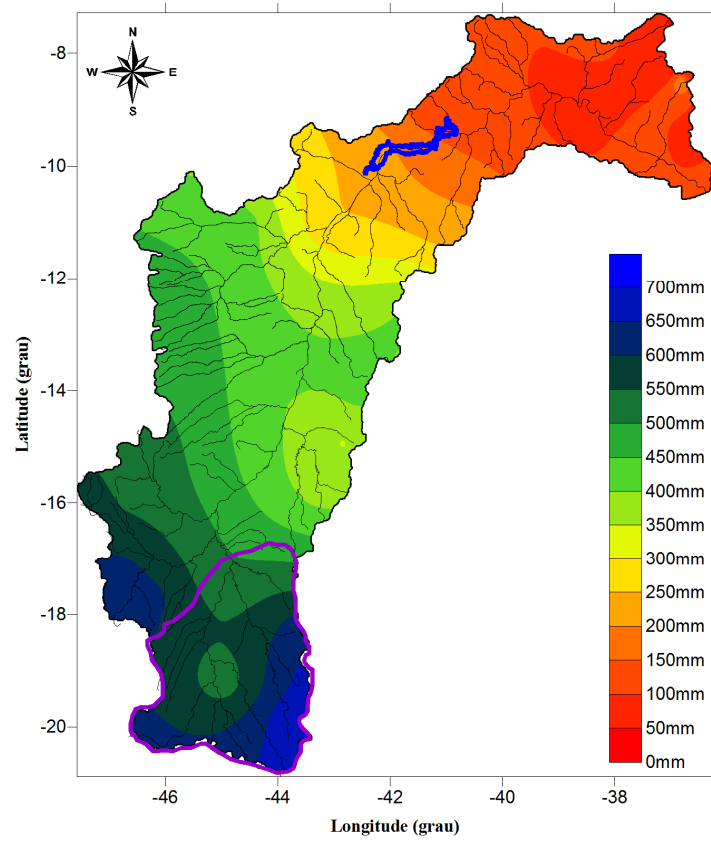


Figura 24. Espacialização da precipitação pluvial no ano de 2005 no último trimestre (outubro, novembro e dezembro)

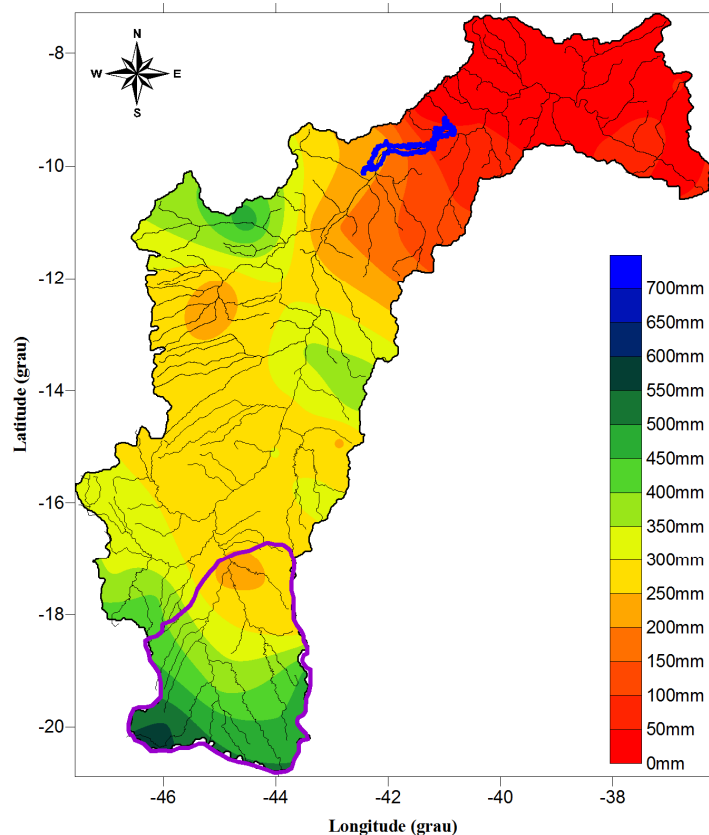


Figura 25. Espacialização da precipitação pluvial no ano de 2007 no último trimestre (outubro, novembro e dezembro)

Apesar dos modelos hidrológicos de chuva-vazão assimilarem os dados de chuvas sobre uma bacia, fica dúvidas no entendimento de interação do escoamento superficial com sistemas precipitantes que podem atuar sobre a bacia e causar eventos extremos como no ano de 2007. Então, a análise fatorial é uma ferramenta que pode ser eficiente no conhecimento de prever ondas de cheias em certo ponto da Bacia Hidrográfica dependendo do lugar que os sistemas atmosféricos podem atuar.

5.2.2. Padrões de variabilidade espaço-temporal associada à chuva na BHSF entre 1961 a 2009

A análise fatorial em componentes principais rotacionada aplicada aos dados médios mensais da precipitação na BHSF produziram padrões espaciais associados a cada fator comum (pesos). Na Tabela 7 mostra-se os autovalores e variância explicada e acumulada para os vetores não rotacionados e rotacionados dos dados médios mensais da precipitação pluvial.

Tabela 7. Valores Próprios, Variância Explicada (%) e Inércia Acumulada (%) da precipitação mensal

CP	Cargas não Rotacionadas			Cargas Rotacionadas		
	Valor	Variância	Inércia	Valor	Variância	Inércia
	Próprio	Explicada	Acumulada	Próprio	Explicada	Acumulada
1	6,50	54,13	54,13	5,68	47,86	47,86
2	4,18	34,83	88,96	4,13	34,42	82,28
3	0,92	7,63	96,59	1,70	14,32	96,59
4	0,19	1,58	98,18	0,19
...
12	0,01	0,008	100		100	100

Foram considerados os três primeiros fatores comuns rotacionados, segundo o critério de truncamento de *Scree Plot*, que considera que a diferença de explicação entre os primeiros fatores de uma Análise fatorial seja grande e que tenda a diminuir com o aumento no número de fatores (Figura 26). Por este critério, o número ótimo de fatores é obtido quando a variação da explicação entre fatores consecutivos passa a ser pequena (BARROSO, 2003).

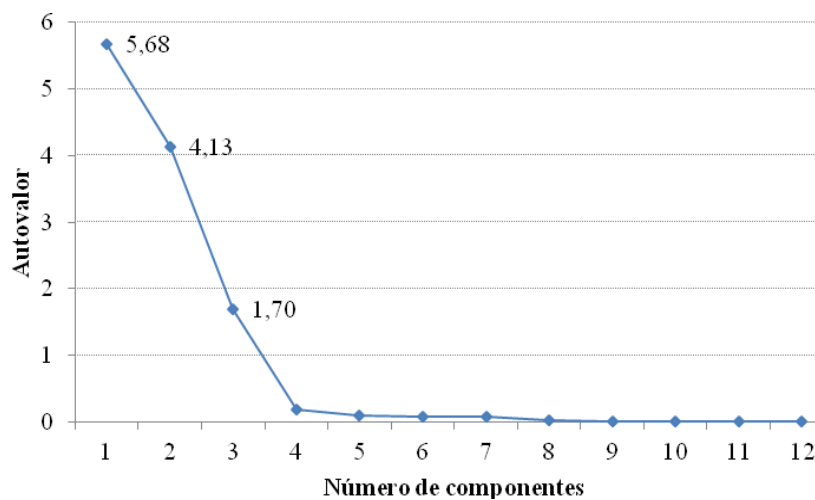


Figura 26. Scree Plot ou “Curva cotovelo” da distribuição dos autovalores versus o número de componentes

Os fatores rotacionados representam melhor a variabilidade dos dados que os não rotacionados, pois a variância explicada por cada nova variável é mais homogênea. A Inércia explicada mostrou 96,59% da variância total da série (Tabela 7).

O primeiro fator temporal rotacionado explica 47,86% da variância total dos dados de precipitação, com correlações positivas altas superiores a 0,90 nos meses de abril a setembro, mostrando ciclo anual definido predominando nos meses de abril a setembro (Figura 27). O segundo fator, que explica 34,42% da variância total dos dados de precipitação, apresenta máximas correlações positivas de outubro a janeiro (entre 0,80 a 0,95). Já o terceiro fator explica 14,32% e apresentou correlações em torno de 0,70 e 0,90 para os meses de fevereiro e março, respectivamente.

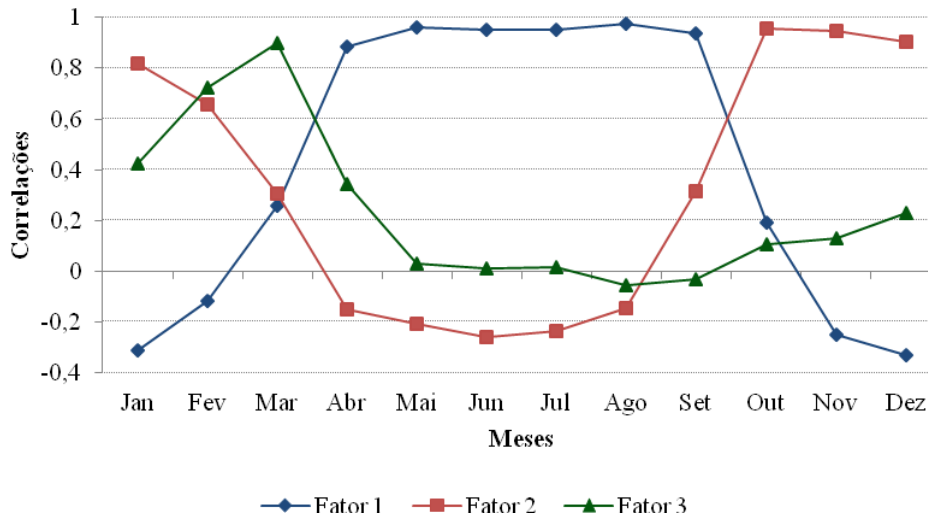


Figura 27. Cargas fatoriais rotacionadas (correlações) para os três fatores comuns que explicam 96,59% do total dos dados de precipitação na BHSF

O padrão espacial associado ao primeiro fator (Figura 28) mostra contribuições (escores) negativas, predominantemente, nas regiões do Alto, Médio e em parte Submédio da bacia, e positivas na parte Baixo da Bacia, com valores em torno da média indicados pela isolinha zero (em destaque). Possivelmente, as chuvas associadas (valores positivos) a este padrão estão relacionadas com a atuação e deslocamento ZCIT, DOL e efeito de brisa marítima que adveceta umidade para foz da Bacia propiciando formação nuvens convectivas, visto que, a Alta do Atlântico Sul está mais intensa nesta época do ano (inverno no hemisfério Sul).

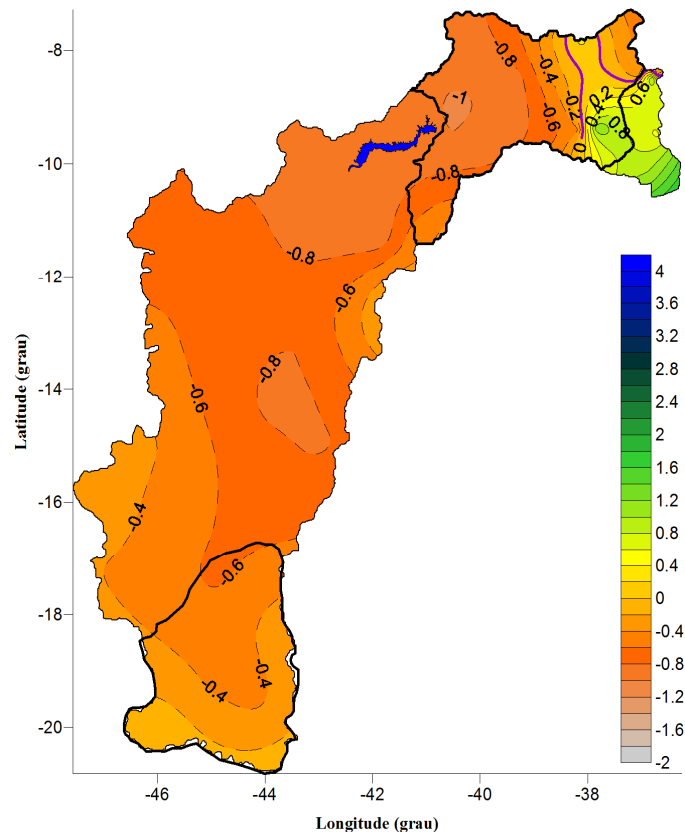


Figura 28. Padrão espacial associado ao primeiro fator comum dos totais médios mensais da precipitação pluvial (mm) na BHSF

A ZCIT encontra-se mais ao sul no mês de março e abril, sendo que seu pulso é significativo para o regime de chuvas sobre o norte e na costa leste de NEB. Entre junho e agosto há ocorrências de DOL, que causam chuvas também sobre costa do NEB. Além disso, os DOL, que atuam no Baixo da Bacia, trazem umidade proveniente do Oceano Atlântico Sul, porém menos intensa, com baixas contribuições nesta área, onde se percebe valores positivos, mas pouco significativos.

O segundo fator temporal (Figura 29) apresenta padrões espaciais com contribuições positivas significativas superiores a 1 no Alto e no sul do Médio da Bacia, e valores negativos em parte do Médio da Bacia, Submédio e Baixo São Francisco. Este fator com escores positivos pode estar associado a dois sistemas de grande escala (ZCAS e frentes frias). As chuvas de verão (dezembro a março) são provocadas, sobretudo pela ZCAS, dinamizada pela umidade proveniente da Amazônia, que neste período fica mais aquecida, conseqüentemente aumenta a convergência de umidade na superfície, sendo transportada pelos jatos de baixos níveis até o sudeste do Brasil, onde condensa e forma nuvens convectivas, como no Alto e leste do Médio da Bacia. Além

disso, a atuação de frentes frias nesse período acontece com mais frequência sobre o Alto da Bacia (verão no hemisfério Sul).

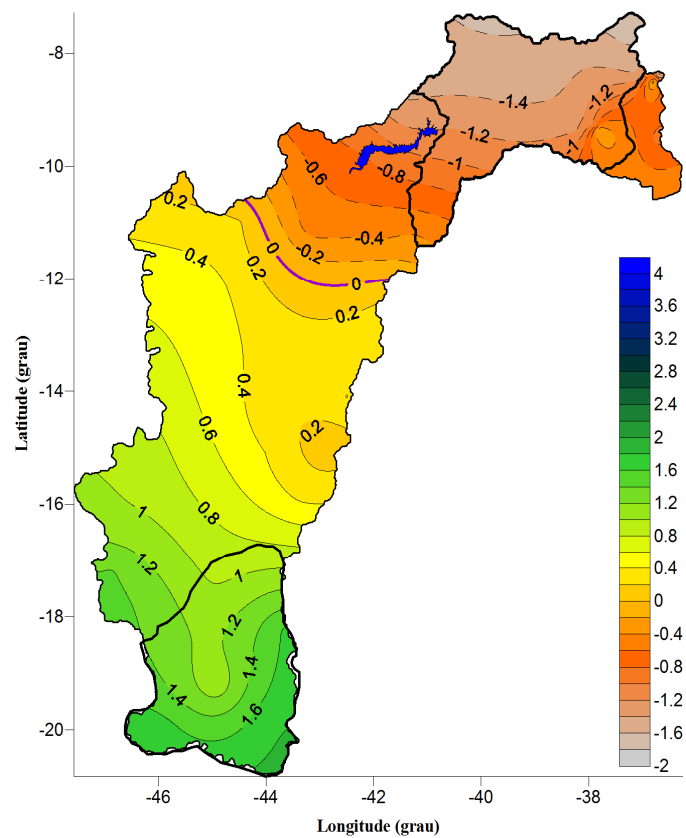


Figura 29. Padrão espacial para a segunda componente principal associada ao segundo fator comum dos totais médios mensais da precipitação pluvial (mm) na BHSF

O padrão espacial associado ao terceiro fator (Figura 30) mostra contribuições (escores) positivas no norte, na costa oeste e no Sul da Bacia, com valores em torno de 0,4 a 3. Possivelmente, as chuvas associadas (valores positivos) a este padrão estão relacionadas com a atuação da ZCITE a ZCAS que atuam nesta época do ano nesta região.

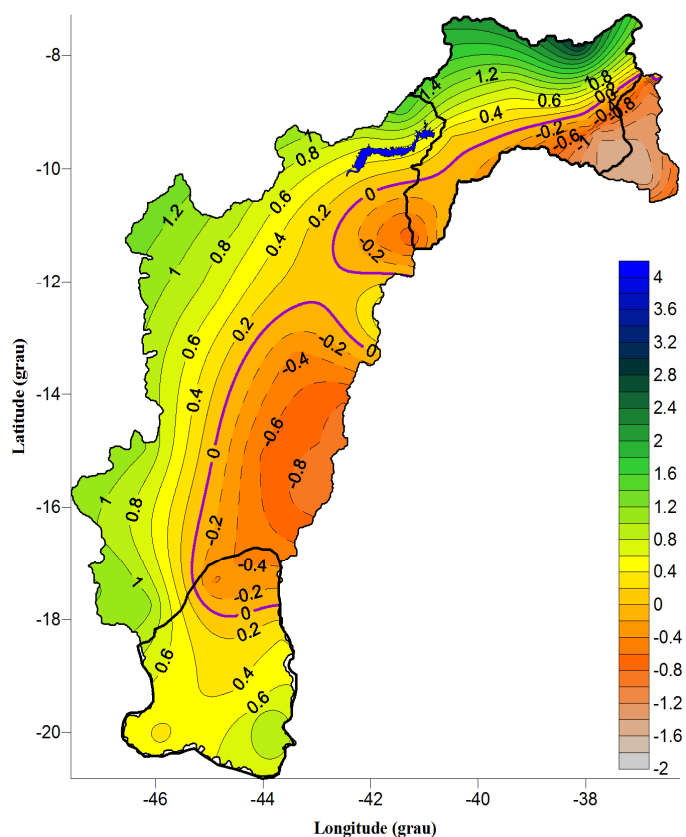


Figura 30. Padrão espacial para a terceira componente principal associada ao terceiro fator comum dos totais médios mensais da precipitação pluvial (mm) na BHSF

As contribuições negativas predominaram na costa leste e na foz da Bacia, com valores que variaram (-0,8 a -2), respectivamente. Estas regiões apresentam baixo índice pluviométrico neste período do ano, em que o peso dos escores confirmam esta afirmação. Além disso, os resultados corroboram com (NIMER, 1989; RIMA 2004).

5.2.3. Padrões de variabilidade espaço-temporal associada à chuva na bacia hidrográfica do rio São Francisco em 2007

A análise fatorial em componentes principais rotacionada aplicada aos dados de totais mensais da precipitação no ano de 2007 produziram 4 padrões que explicam cerca de 85% da variância total dos dados. A Tabela 8 mostra o peso de cada variável, representada pelos meses do ano em relação ao conjunto de dados mensais da precipitação pluvial. Foram retidos os quatro primeiros fatores comuns rotacionados, segundo o critério de truncamento do *Scree Plot* e Kaiser, que considera apenas autovalores maiores que 1 (Figura 31). A escolha de aplicar a análise fatorial no ano de 2007 foi devido a flutuação dos dados que permitiu verificar os locais com maior

variabilidade das chuvas, nas quais influenciam diretamente na vazão afluentes dos reservatórios de Sobradinho e Itaparica na BHSF.

Tabela 8. Valores Próprios, Variância Explicada (%) e Inércia Acumulada (%) da precipitação mensal

CP	Cargas não Rotacionadas			Cargas Rotacionadas		
	Valor Próprio	Variância Explicada	Inércia Acumulada	Valor Próprio	Variância Explicada	Inércia Acumulada
1	6,25	52,05	52,05	5,52	45,98	45,98
2	2,36	19,65	71,74	2,23	18,57	64,56
3	0,96	7,99	79,73	1,36	11,36	75,91
4	0,54	5,31	85,04	1,10	9,13	85,04
...
12	0,01	0,008	100	0,02	0,02	100

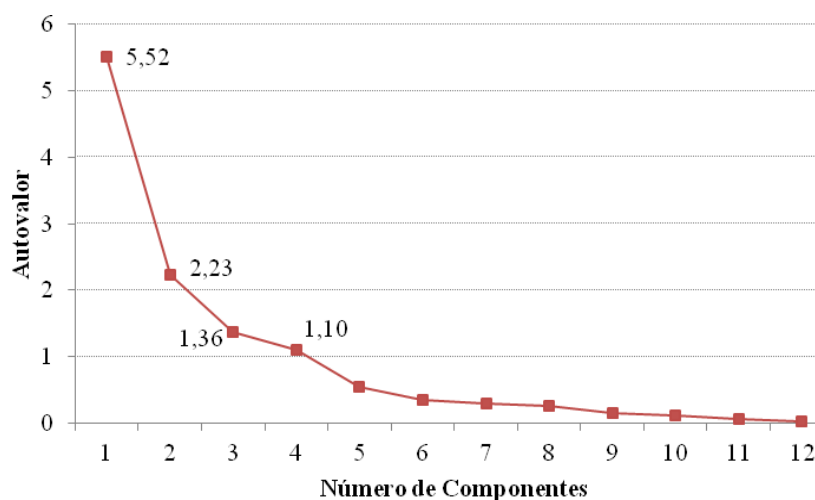


Figura 31. Scree Plot ou “Curva cotovelo” da distribuição dos autovalores de 2007

A Figura 32 a corresponde as correlações temporais dos quatro primeiros fatores retidos. Verificou-se que foram significativos os resultados positivos em torno de 0,7 a 0,9. O primeiro fator temporal rotacionado explica que 45,98% da variância total dos dados de precipitação tem correlações positivas superiores a 0,7 nos meses que o fator prevalece (março a setembro), mostrando ciclo anual definido. O segundo fator rotacionado, que explica 18,57% da variância total dos dados de precipitação, apresenta alta correlação positiva em janeiro, novembro e dezembro. O terceiro fator comum rotacionado, que explica 11,36% da variância total dos dados de precipitação, apresenta

correlação positiva em outubro (0,9). O quarto fator rotacionado, que explica 9,13% da variância total dos dados de precipitação, tem correlações positivas altas da ordem 1.

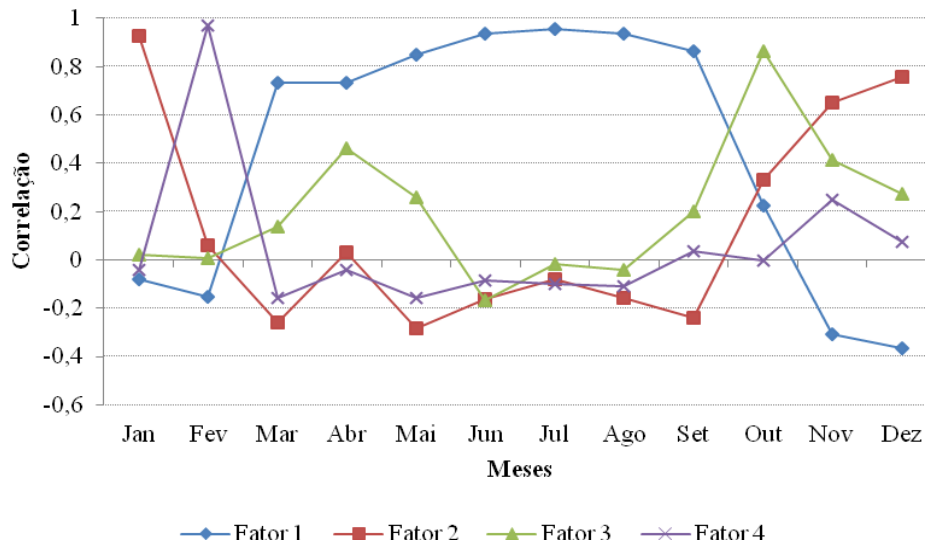


Figura 32. Cargas fatoriais rotacionadas (correlações) para os quatro fatores comuns que explicam 85,04% do total dos dados de precipitação na BHSF em 2007

O ano de 2007 apresentou algumas alterações do padrão de precipitação na BHSF, visto que, além da atuação dos sistemas atmosféricos que atuam regularmente, houver influência do fenômeno de El Niño, La Niña e outros sistemas que atuam sem periodicidade bem definida espacialmente como Massas de Ar Frio e LI's sobre a bacia. A ACP foi aplicada aos totais mensais deste ano com o propósito de observar a atuação dos sistemas que influenciam diretamente na operação dos reservatórios de Sobradinho e Itaparica.

Nas Figuras 33, 35, 38 e 39 verifica-se a espacialização dos escores espaciais das 4 CP's rotacionadas. O padrão espacial associado ao primeiro fator (Figura 33) mostra contribuições (escores) negativas, predominantemente, nas regiões do Alto e no Médio da Bacia, e positivas em parte do Submédio e Baixo da Bacia. Possivelmente, as chuvas associadas (valores positivos) a este padrão são provenientes do deslocamento ZCIT (atuante neste em março e abril).

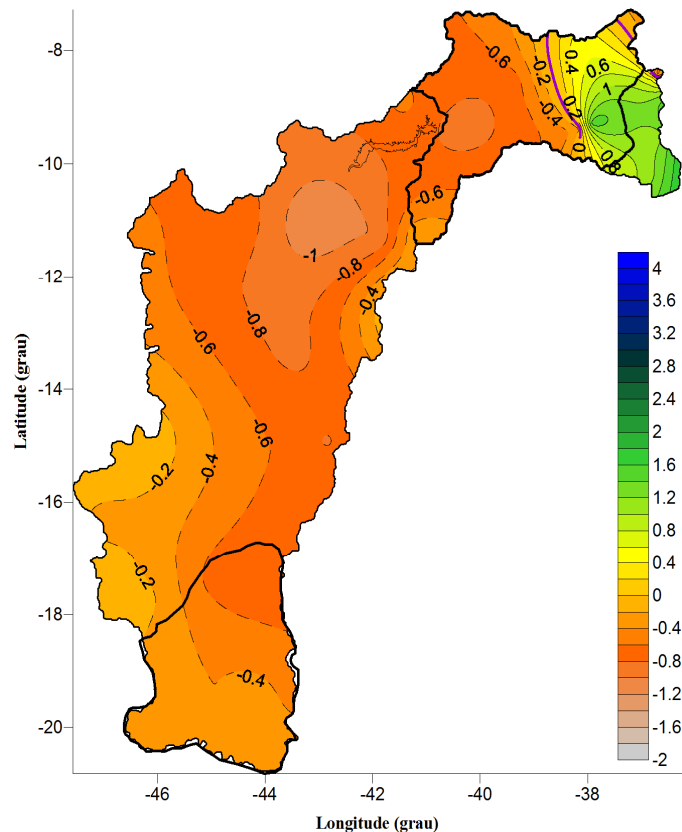


Figura 33. Padrão espacial associado ao primeiro fator comum dos totais médios mensais da precipitação pluvial (mm) na BHSF

Além disso, um escoamento anticiclônico anômalo foi observado ao longo do mês de março, em baixos níveis, e o posicionamento de cavados e vórtices ciclônicos em altos níveis contribuiu para a permanência de uma massa de ar seco e para a ocorrência de chuvas abaixo da média histórica na maior parte do Alto da Bacia, observado pelos valores negativos. Já a análise do escoamento em 200 hPa mostrou a ocorrência de treze episódios de VCAN's, durante o mês de março. De modo geral, a configuração destes sistemas foi notada sobre o leste do Brasil, o que explica as anomalias negativas de precipitação na maior parte das Regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste, reduzindo a vazão afluente do reservatório de Sobradinho em abril (CLIMANALISE, 2007). Porém, nos dias 2, 22, 23 e 24 de março, o VCAN contribuiu de forma positiva na foz da Bacia o qual incrementou nos totais mensais de precipitação no Submédio e Baixo da Bacia, onde se observa na Figura 34.

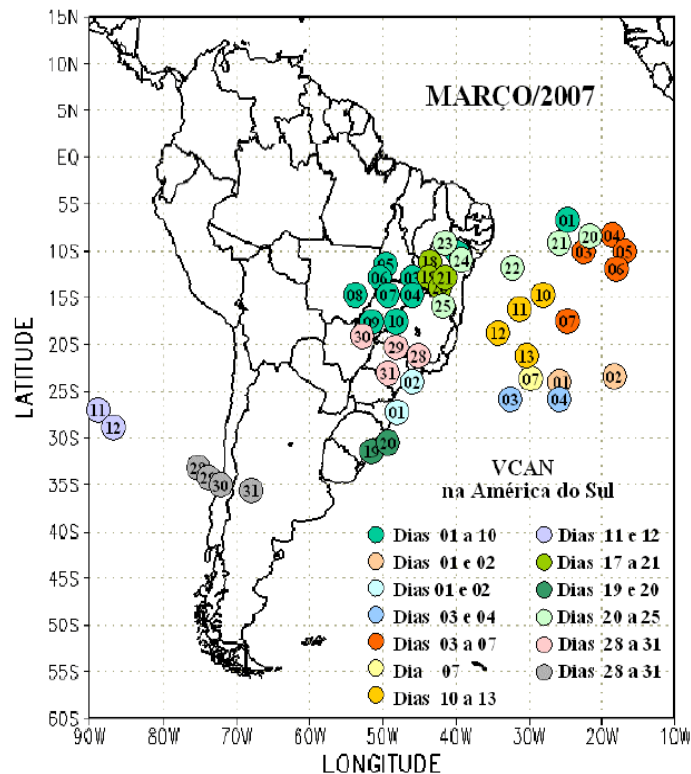


Figura 34. Posição do centro dos Vórtices em Altos Níveis (VCAN) com a indicação dos dias de atuação sobre a América do Sul em março/2007

Fonte: CLIMANALISE, 2007

Nos meses de agosto e setembro em que o primeiro fator obteve maior correlação houve influência de outros sistemas precipitantes sobre a foz da Bacia. Estas chuvas estiveram associadas principalmente ao efeito de brisa, o qual foi intensificado pelo escoamento associado ao sistema de alta pressão semi-estacionário do Atlântico Sul. Embora os sistemas frontais tenham atuado principalmente sobre o Alto da Bacia, as chuvas ocorreram predominantemente abaixo da média histórica. Todos estes sistemas contribuíram negativamente para que a vazão afluyente observada em sobradinho ficasse abaixo da média climatológica, verificado anteriormente. Isso está confirmado pela contribuição negativa do padrão espacial do primeiro fator.

O padrão espacial associado ao segundo fator (Figura 35) mostra contribuições (escores) negativas, predominantemente, nas regiões do Baixo, Submédio e em parte Médio da Bacia, e positivas na parte do Médio e Alto da Bacia. Talvez, as chuvas associadas (valores positivos) a este padrão estejam relacionadas com episódios de Sistemas Frontais e ZCAS (frequente nesta época do ano), verificados na Figura 36. As possíveis explicações para dos valores negativos na espacialização do segundo fator pode ser devido aos centros dos VCAN's ficaram estacionários na mesma região

(Submédio e Baixo da BHSF), que geram movimentos de subsidência que inibem a formação de nuvens convectivas por compressão adiabática, verificado no mês de janeiro na Figura 37.

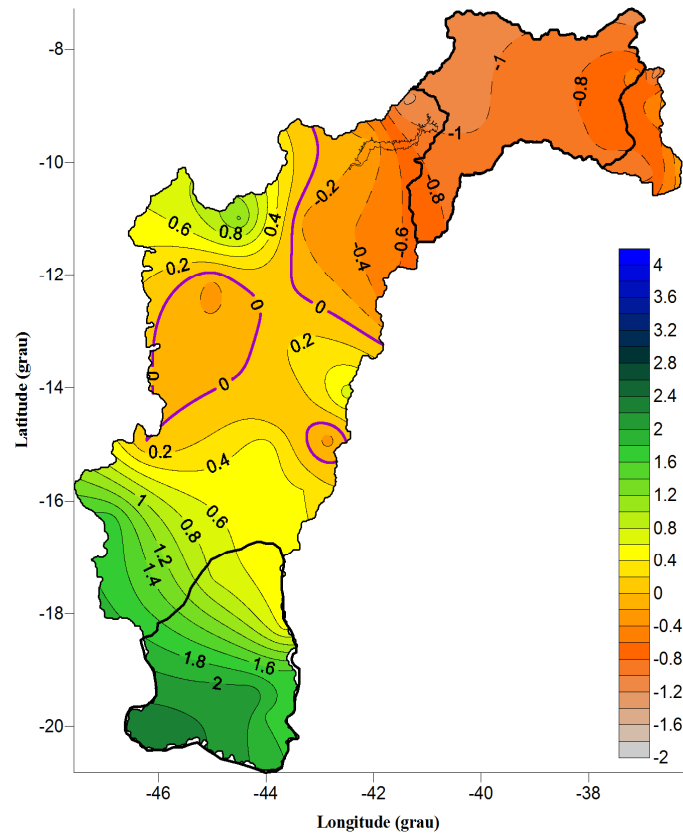


Figura 35. Padrão espacial para a segunda componente principal associada ao segundo fator comum dos totais médios mensais da precipitação pluvial (mm) na BHSF

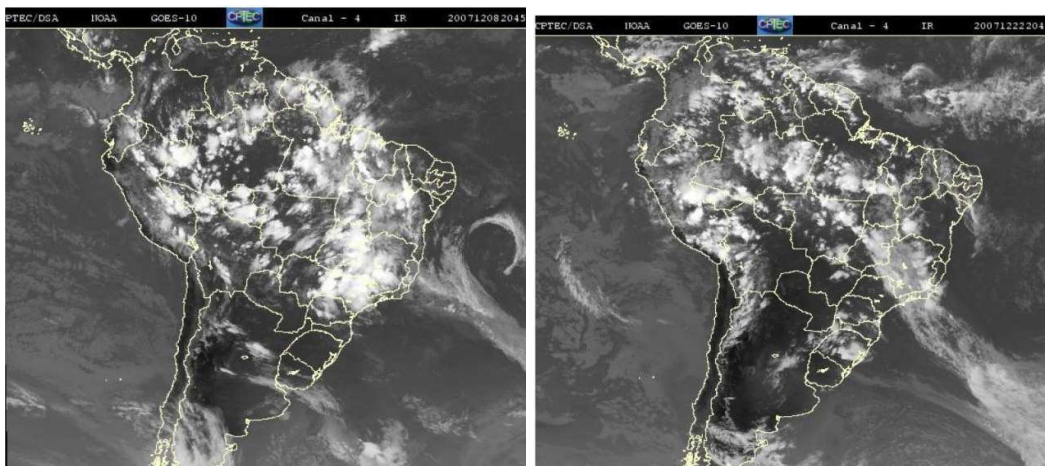


Figura 36. Sistemas Frontais e ZCAS atuando no norte de Minas Gerais (Alto da BHSF)
Fonte: CLIMANALISE, 2007

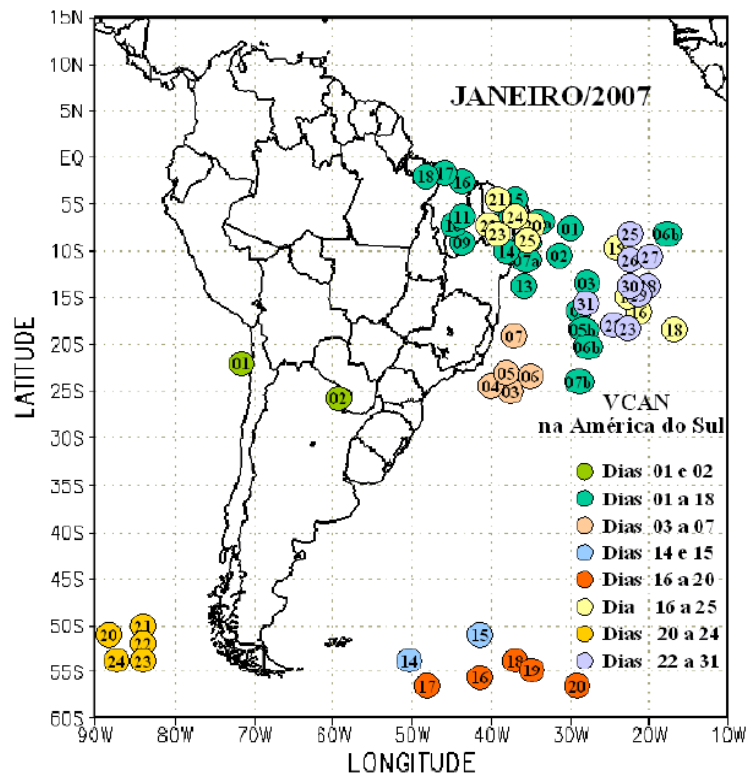


Figura 37. Posição do centro dos Vórtices em Altos Níveis (VCAN) com a indicação dos dias de atuação sobre a América do Sul em janeiro/2007

Fonte: CLIMANALISE, 2007

O padrão espacial associado ao terceiro fator (Figura 38) mostra contribuições (escores) negativas em quase toda áreas da Bacia. Já os valores positivos predominam apenas em parte do Alto da Bacia. Talvez, as chuvas associadas (valores positivos) a este padrão estão relacionadas com episódios de Frentes Frias e os valores negativos ao fenômeno de La Niña, onde atua negativamente no Médio e Baixo da Bacia. As vazões dos reservatórios de Sobradinho Itaparica foram diretamente afetadas pela redução da chuva no Alto e Médio da Bacia, em que os valores foram abaixo da média esperada, verificado anteriormente.

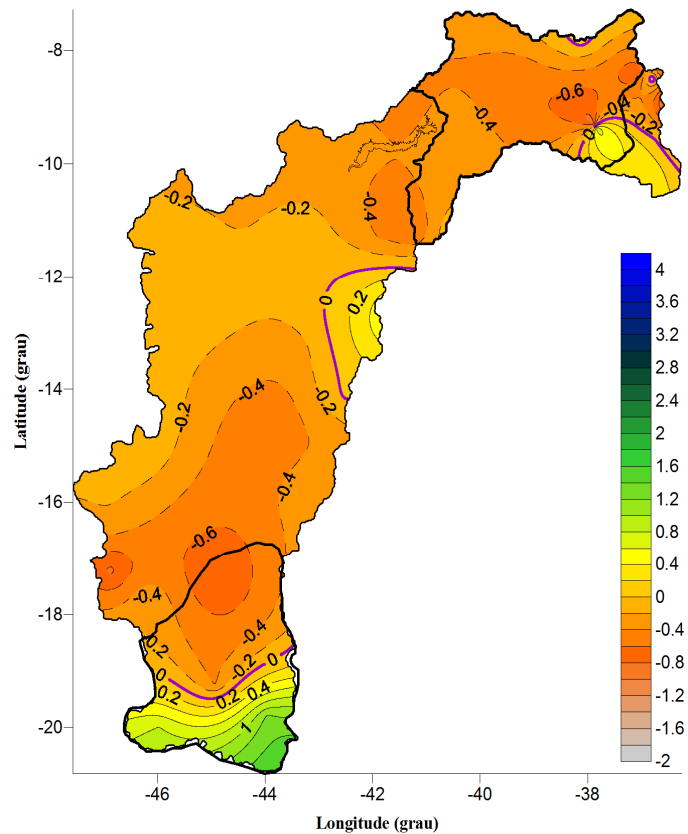


Figura 38. Padrão espacial para a terceira componente principal associada ao terceiro fator comum dos totais médios mensais da precipitação pluvial (mm) na BHSF

E por fim, observa-se na Figura 39 o padrão espacial associado ao quarto fator o qual mostra alternâncias em faixas positivas e negativas sobre toda a Bacia. Possivelmente, as chuvas associadas aos valores positivos estejam relacionados a fatores atmosféricos que atuam na bacia tais como: Linhas de Instabilidade (LI's) e VCAN's que atuam com certa frequência no mês de fevereiro (Figura 40 e 41, respectivamente). Os escores negativos podem está associado com o fenômeno de El Niño, o qual influência negativamente no regime de chuvas sobre o Médio e Baixo São Francisco. A vazão observada no reservatório de Sobradinho ficou acima da média climatológica, não somente pelas chuvas no Alto da Bacia, mas por sistemas precipitantes que atuaram de forma inesperada sobre o Médio da Bacia.

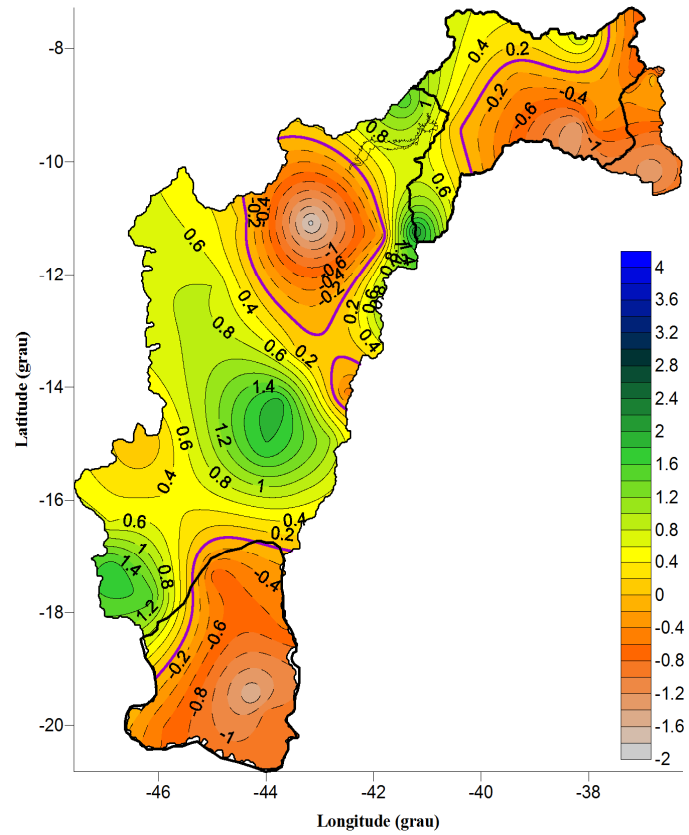


Figura 39. Padrão espacial associado ao quarto fator comum dos totais médios mensais da precipitação pluvial (mm) na BHSF

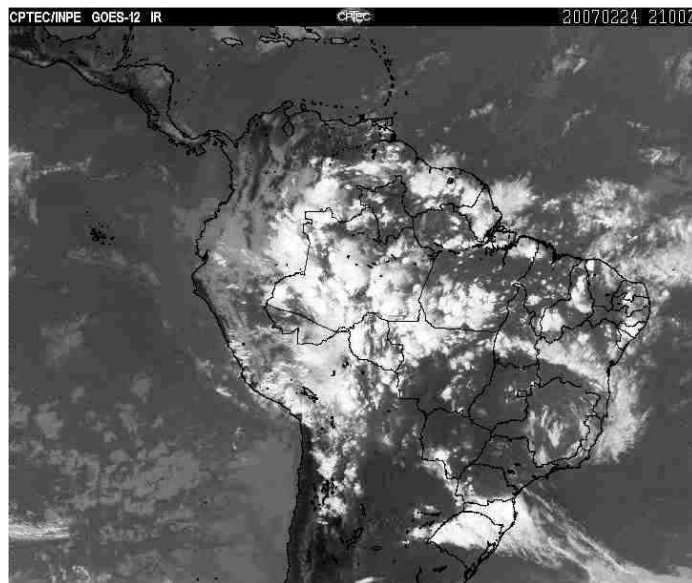


Figura 40. Recortes das imagens do satélite GOES-12, no canal infravermelho, às 21:00TMG, mostrando LI's na região central da Bahia (Médio São Francisco em FEVEREIRO/2007

Fonte: CLIMANALISE, 2007

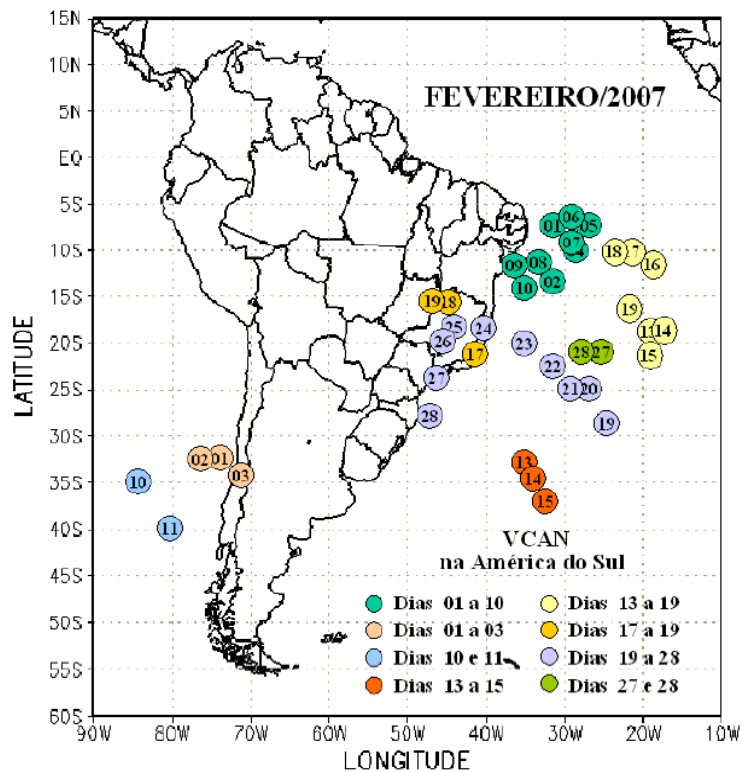


Figura 41. Posição do centro dos Vórtices em Altos Níveis (VCAN) com a indicação dos dias de atuação sobre a América do Sul em fevereiro/2007

Fonte: CLIMANALISE, 2007

Vale ressaltar que um grande percentual da água que abastece o reservatório de Sobradinho é proveniente do Alto São Francisco que “controla” esta demanda hídrica através da barragem de Três Marias. Logo, por mais que sistemas precipitantes atuem sobre o Alto da Bacia é preciso levar em consideração o fator de segurança, o qual é uma das finalidades de construção de barragens em série (regulação da vazão defluente). O mesmo se aplica para o reservatório de Itaparica a jusante de Sobradinho. Então as flutuações da vazão e Sobradinho e Itaparica é observado quase somente por sistemas que atuam entre os reservatórios de Três Marias – Sobradinho e Sobradinho – Itaparica, ao não ser por medidas de segurança que se abrem as comportas de Três Marias ou Sobradinho alterando o padrão de vazão dos reservatórios. Portanto, devido a atuação de sistemas precipitantes transientes sobre o Médio e Submédio da BHSF, as instituições que operam barragens devem ficar em alerta na propagação de ondas de cheias que podem ocorrer nestes reservatórios.

5.2.4. Validação da Análise Fatorial

O teste KMO indica a medida de adequação dos dados, que segundo a Tabela 3 foi classificado como “Média” com valor de (0,71) para os dados climatológicos (1961-2009) e “Boa” com (0,81) para os dados pluviométricos no ano de 2007. O teste de esfericidade de Bartlett, indicado para ser efetuado na análise fatorial teve o objetivo de testar a correlação entre as variáveis. O valor da significância do teste de Bartlett mostrou-se menor que 0,10; o que permite mais uma vez confirmar a possibilidade e adequação do método de análise fatorial para o tratamento dos dados (Tabela 9).

Tabela 9. Teste KMO e Bartlett

1961 - 2009	Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)		0,71
	Teste de Bartlett	Approx. Chi-Square	1510,7
		DF	66
		Sig.	0,001
2007	Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)		0,81
	Teste de Bartlett	Approx. Chi-Square	586
		DF	66
		Sig.	0,001

Verificou-se que os dados utilizados na análise fatorial apresentaram qualidade significativa “Média” e “Boa”, que denota credibilidade dos resultados apresentado no Tópico 5.2.3. Talvez, se maior à amostra de dados, fosse possível encontrar resultados ainda melhores.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O modelo IPHS1 foi ajustado para o ano de 2005, em que representou com fidelidade o comportamento do hidrograma resultante nos pontos afluentes ao reservatório de Sobradinho e Itaparica.

Caracterizaram-se as descargas líquidas em Sobradinho e Itaparica (médias, máximas e mínimas), em que se percebeu comportamento atípico do ano de 2007, devido anomalias de sistemas precipitantes sobre a Bacia.

No ano de 2007, a simulação do modelo hidrológico obteve resultados relevantes. No ponto afluente ao reservatório de Sobradinho observaram-se valores, levemente, superestimados no período de janeiro a abril e subestimados de setembro a dezembro. Já no ponto afluente ao reservatório de Itaparica verificou-se o inverso a Sobradinho.

O modelo IPHS1 apresentou coerência na vazão afluente em Itaparica quando comparado a Sobradinho. Porém verificou-se uma perda na vazão de entrada observada em Itaparica (jusante de sobradinho).

Em geral, o teste de Willmott apresentou resultados satisfatórios com exceção da variabilidade anual da vazão tanto em Sobradinho quanto em Itaparica, devido o coeficiente de exatidão “**d**” ficar abaixo do esperado.

A Análise Fatorial em Componentes Principais para precipitação permitiu extrair informações importantes sobre o padrão de chuvas na BHSF, onde foram retidos três fatores que explicaram 96,59% da variância total dos dados. Para o ano de 2007, observou-se quatro regimes de chuva no ano de 2007 com a retenção dos quatro primeiros fatores comuns espaciais que explicaram 85,04%, onde foi possível identificar anomalias devido fenômeno de El Niño, La Niña e sistemas precipitantes transientes que atuaram sobre a região.

Os testes KMO de esfericidade de Bartlett apresentaram resultados estatisticamente considerados, indicando para ser efetuado na análise fatorial teve o objetivo de testar a correlação entre as variáveis, o que permite mais uma vez confirmar a possibilidade e adequação do método de análise fatorial para o tratamento dos dados.

Enfim, o estudo alcançou os objetivos propostos, mesmo com algumas limitações do modelo do hidrológico e conhecimento de parâmetros físicos e hidráulicos da BHSF. Fica como sugestão investigar outros anos para verificar a interação

hidrometeorológica entre o escoamento superficial e os sistemas precipitantes sobre a área em estudo. Além disso, a aplicar de outros modelos hidrológicos (ABC, Tank Model, Top Model, HEC-HMS, SWAT, etc.) ou redes neurais artificiais podem investigar esta relação entre solo a atmosfera.

CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA – Agência Nacional de Águas. Disponível: <
http://hidroweb.ana.gov.br/cd5/bacias/nova_pagina_SUB_BACIAS_4.htm>. Acesso em
25 de agosto de 2011.

BARROSO, L. P. **Análise Multivariada**. 48ª Reunião da RBRAS e 10º SEGRO –
Lavras (MG). Departamento de Ciências e Exatas, Universidade Federal de Lavras,
2003.

BEZERRA, F. A. Análise Fatorial. In: CORRAR, L. J.; PAULO, E.; DIAS FILHO, J.
M (Org.). **Análise Multivariada**. 1ed. São Paulo: Atlas, 2007. 541p.

BOUROCHE, J. M.; SAPORTA, G. **Análise de Dados**. Rio de Janeiro: Zahar, 1982.
117p.

BRAGA, C. C. **Inter-relação entre padrões de índice de vegetação e de
pluviometria no Nordeste do Brasil**. 2000. 129p. Tese (Doutorado em Recursos
Naturais) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2000.

BRAVO, J. M.; ALLASIA, D. G.; COLLISCHONN, W. TASSA, R.; MELLER, A.;
TUCCI, C. E. M. Avaliação visual e numérica da calibração do modelo hidrológico IPH
II com fins educacionais. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007, São
Paulo (SP). **Anais...** In CD-ROM. Porto Alegre (RS): Associação Brasileira de
Recursos Hídricos (ABRH), 2007.

BRUN, G. W. **Previsão Contínua em Tempo Real do Volume de Afluência do
Reservatório: Ernestina, RS**. 1999. 95 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos
e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
1999.

BRUN, G. W.; TUCCI, C. M. M. Previsão em Tempo Real do Volume Afluente ao
Reservatório de Ernestina. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 2, p. 73-
79, 2001.

CLARK, C. O. Storage and the unit hydrograph: Transactions. **American Society of
Civil Engineers**, v. 110, p. 1419-1488, 1945.

CUNGE, J. A. On the subject of a flood propagation computation method (Muskingun
method). **Journal Hydraulic of Research**, v. 7, n. 2, p. 205-230, 1969.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes
métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil.
Revista Brasileira de Agrometeorologia, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CASTAÑEDA, M.; GONZÁLEZ, M. Statistical analysis of the precipitation trends in
the Patagonia region in southern South America. **Atmósfera**, v. 21, n. 3, p. 303-317,
2008.

CEBALLOS, J. C.; BRAGA, C. C. Missing data assessment in a solarimetric networks. **International Journal of Climatology**, v. 15, p. 325-340, 1995.

CLIMANÁLISE. **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**. Cachoeira Paulista: Centro de Previsão e Estudos Climáticos/INPE, v. 22, n. 3, 2007.

CODEVASF - Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco -. Caracterização da Bacia. Disponível: <<http://www.codevasf.gov.br/osvales/vale-do-sao-francisco/identificacao>>. Acesso em 29 de abril de 2011.

CODEVASF - Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco -. Caracterização da Bacia. Disponível: <<http://www.codevasf.gov.br/osvales/vale-do-sao-francisco/recursos-hidricos>>. Acesso em 15 de fevereiro de 2012.

CORRAR, L. J.; PAULO, E.; DIAS FILHO, J. M. **Análise multivariada: para os cursos de administração, ciências contábeis e economia**. São Paulo: Ed. Atlas, 2007, 541p.

CORREIA, M. F. **Impacto das Ações Antrópicas no Clima do Submédio do Rio São Francisco: Um Estudo Numérico e Observacional**. 2001. 181 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

CORREIA M. F.; SILVA DIAS, M. A. F. Variação no nível do reservatório de Sobradinho e seu impacto sobre o clima da região. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 157-168, 2003.

ESCOBAR, G. C. J. Padrões sinóticos associados a ondas de frio na cidade de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 2, p. 241-254, 2007.

FREITAS, W. S.; RAMOS, M. M.; OLIVEIRA, A. M. S. Demanda de irrigação da cultura de uva na bacia do rio São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 3, p. 563-569, 2006.

FURTUNATO, O. M. **Simulação Hidrológica na Bacia do Alto Paraíba com Efeito da Variabilidade do Clima**. 2004. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande (PB), 2004.

GALVÍNIO, J. D.; SOUSA, F. A. S. Relação entre o fenômeno El Niño e os totais mensais precipitados na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 4, p. 113-119, 2002.

GERMANO, A.; TUCCI, C. E. M.; Da SILVEIRA, A. L. L. Estimativas dos Parâmetros do Modelo IPH II para algumas Bacias Urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 4, p. 103-120, 1998.

HAIR Jr., J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK W. C. **Multivariate data analysis**. 5ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998.

- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Impacts, Adaptation and Vulnerability**. A Report of Working Group II of Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: Switzerland. 2001.
- KELLER FILHO, T.; ASSAD, E. D.; LIMA, P. R. S. R. Regiões pluviometricamente homogêneas no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 4, p. 311-322, 2005.
- LIMA, F. J. L.; AMANAJÁS, J. C.; GUEDES, R. V. S.; SILVA, E. M. Análises de Componente Principal e de Agrupamento para estudo de vento para geração de energia eólica na região do Ceará, Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte. **Revista Ambiente**, v. 5, n. 2, p. 188-201, 2010.
- LORENZ, E. N. **Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction**. Sci. Rep. nº 1, Cambridge Massachusetts (EUA), Statistical Forecasting Project Department of Meteorology, MIT, 1956. 49p.
- MARINS, A. P. **Simulação Hidrológica Do Reservatório Do Vacacaí Mirim/Santa Maria-Rs Utilizando O Sistema IPHS1**. 2004. 183f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.
- MATTEAU, M.; ASSANI, A. A.; MESFIOUI, M. Application of multivariate statistical analysis methods to the dam hydrologic impact studies. **Journal of Hydrology**, v. 371, p. 120-128, 2009.
- McCULLOCH, J. S. G.; ROBINSON, M. History of forest hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 150, p. 189-216, 1993.
- MELLER, A.; PARANHOS, R. M.; PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D. (2002). Parâmetros de Calibração do Modelo IPH II na Bacia Hidrográfica do Vacacaí Mirim In: **Reunião Final da REHIDRO**, 2002, Vitória-ES. Rede Cooperativa em Recursos Hídricos. São Paulo: FINEP, v. 1, p. 1 – 10.
- MILLER, W. A.; CUNGE, J. A. Simplified equations of the unsteady flow in open channels. In: **Unsteady Flow in Open Channels** (ed. by K. Mahmood & V. Yevjevich). Water Resources Publications. Fort Collins, Colorado, USA. 1975.
- MINE, M. R. M.; TUCCI, C. E. M. Previsão em Tempo Real de Vazões Afluentes a Reservatórios de Usinas Hidrelétricas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 73-95, 1999.
- MUÑOZ-DÍAZ, D.; RODRIGO, F. S. Spatio-temporal patterns of seasonal rainfall in Spain (1912–2000) using cluster and principal component analysis: comparison. **Annales Geophysicae**, v. 22, p. 1435-1448, 2004.
- NOAA - NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. Disponível em: <<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis>>. Acesso em 10 de outubro de 2011.

- OLIVEIRA SILVA, P. K. **Análise multivariada aplicada ao vento na área costeira do nordeste do Brasil**. 2011. 79p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande (PB), 2011.
- PANDZIC, K. Principal component analysis of precipitation in the Adriatic-Pannonian área of Yugoslavia. **Journal of Climatology**, v. 8, p. 357-370, 1988.
- PANDZIC, K.; TRNINI, D. Relationship between the Sava river basin annual precipitation, its discharge and large-scale Atmosphere. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 61, p. 69-17, 1998.
- PANDZIC, K.; TRNINI, D. Relationship between monthly precipitation, the Sava river discharge and large-scale circulation. **Geofizika**, v. 16-17, p. 53-63, 1999 – 2000.
- PEREIRA, J. C. R. **Análise de dados qualitativos: estratégias metodológicas para as ciências da saúde, humanas e sociais**. 2ed. São Paulo: Edusp, 2001.
- PREISENDORFER, R. **Principal component analysis in meteorology and oceanography**. Amsterdam, Elsevier, 1988. 425p.
- RICHMAN, M. Specification of complex modes of circulation with T-mode factor analysis. In: II International Conference on Statistics and Climate, 1983, Lisbon. **Anais...** National Institute of Meteorology and Geophysics, p. 511-518. 1983.
- RICHMAN, M. B. Review article on rotation of principal components. **Journal of Climatology**, v. 6, p. 293-335, 1986.
- RIMA. **Relatório de Impacto Ambiental: Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional**. Ministério da Integração Nacional, 2004.
- SANTOS, S. A.; CORREIA, M. F.; BRAGA, C. C.; SILVA ARAGÃO, M. R. Análise estatística de chuvas intensas e inundações no semi-árido da bacia do Rio São Francisco: a cheia de 1985. **Engenharia Ambiental** (UNIPINHAL. Impresso), v. 7, n. 3, p. 278-290, 2010.
- SILVA, B. C.; COLLISCHONN, W. ; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; CORBO, M. D. Previsão hidroclimática de Vazão de Curto Prazo na Bacia do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, p. 31-41, 2007.
- SOUZA, L. R.; CUNHA, A. C.; BRITO, D. C. Aplicação do sistema hidrológico IPHS1 no estudo de chuva-vazão em aproveitamentos hidrelétricos na bacia hidrográfica no alto e médio Araguari. In: CUNHA, A. C.; SOUZA, E. B. E.; CUNHA, H. F. A. (Org.). **Tempo, Clima e Recursos Hídricos: Resultados do Projeto REMETAP no Estado do Amapá**. Macapá, IEPA, 2010, 216p.
- SOUZA, L. R.; AMANAJÁS, J. C.; SILVA, A. P. N.; BRAGA, C. C.; CORREIA, M. F. Determinação de Padrões espaço-temporal e regiões homogêneas de precipitação pluvial no Estado de Minas Gerais. **Engenharia Ambiental** (UNIPINHAL. Impresso), v. 8, n. 2, p.265-280, 2011.

- TUCCI, C. E. M.; ZAMANILLO, E.; PASINATO, H. **Sistema de simulação precipitação-vazão iphs1**. Porto Alegre: Recursos Hídricos n. 20 IPH-UFRGS, 1989 (Publicação Aperiódica).
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 1993. 943p.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 1ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 678p.
- VIEGAS, F. J. S. **O paradigma da modelagem orientada a objetos aplicado à sistemas de apoio à decisão em sistemas de recursos hídricos**. 2000. 547p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiente) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- VIEGAS, J. S. F.; TUCCI, C. E. M.; VILLANUEVA, A. **IPHS1 para Windows - Manual do Usuário versão Beta 1.34**. Porto Alegre: IPH-UFRGS e ALM/FEA /IMF - UFPel,. 2001. 35 p.
- VIEGAS, J. S. F.; TUCCI, C. E. M.; VILLANUEVA, A.; ALLASIA, D. G.; TASSI, R.; DAMÉ, R. C. F. **Manual do Usuário versão Beta 2.11**. Porto Alegre: IPH-UFRGS e ALM/FEA /IMF - UFPel,. 2004. 46p.
- VILLAR, J. C. E.; RONCHAIL, J.; GUYOT, J. L.; COCHONNEAU, G.; NAZIANO, F.; LAVADO, W.; OLIVEIRA, E.; POMBOSA, R. VAUCHEL, P. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). **International Journal of Climatology**, v. 29, p. 1574-1594, 2009.
- WARD, J. H. Hierarchical grouping of optimize an objective function. **Journal American Statistical Association**, v. 58, p. 236-244, 1963.
- WEBSTER, P. J. The role of hydrological processes in ocean-atmosphere interactions. **Reviews of Geophysics**, v. 32 (4), p. 427-476. 1994.
- WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, J. J.; FEDDEMA, K.; KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.
- WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 2. ed. London, Academic Press, 2006. 649p.