

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

JOSÉ MARIA BRABO ALVES

**ESTUDO DO REGIME HIDROLÓGICO NO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO POR
MODELAGEM DINÂMICA ACOPLADA: APLICAÇÃO EM
GERENCIAMENTO DE RESERVATÓRIOS**

**FORTALEZA
2008**

JOSÉ MARIA BRABO ALVES

**ESTUDO DO REGIME HIDROLÓGICO NO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO POR
MODELAGEM DINÂMICA ACOPLADA: APLICAÇÃO EM
GERENCIAMENTO DE RESERVATÓRIOS**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado em Engenharia Civil – Área de Concentração em Recursos Hídricos da Universidade Federal do Ceará para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. José Nilson Beserra Campos

Fortaleza - 2008

A479e Alves, José Maria Brabo
Estudo do regime hidrológico no semi-árido brasileiro por modelagem
dinâmica acoplada: aplicação em gerenciamento de reservatórios / José
Maria Brabo Alves. 2008.
176 f. ;il.; enc.

Orientador: Prof. Dr. José Nilson Beserra Campos
Área de concentração: Recursos Hídricos
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de
Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental,
Fortaleza, 2008.

1. Recursos Hídricos. 2. Clima. 3. Variabilidade da precipitação. 4.
Vazão - Medidores. I. Campos, José Nilson Beserra. (Orient.). II.
Universidade Federal do Ceará. – Curso de Pós – Graduação em
Engenharia Civil. III. Título.

CDD 627


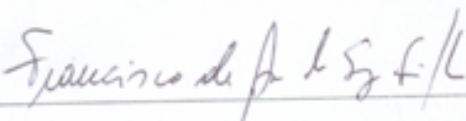
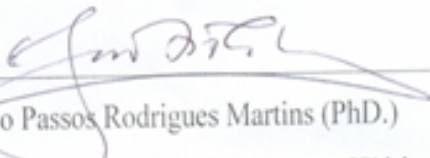

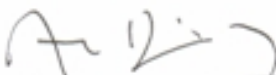
JOSÉ MARIA BRABO ALVES

**ESTUDO DO REGIME HIDROLÓGICO NO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO POR
MODELAGEM DINÂMICA ACOPLADA: APLICAÇÃO EM
GERENCIAMENTO DE RESERVATÓRIOS**

Tese submetida à Coordenação do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil - Área de Concentração em Recursos Hídricos.

Aprovada em: 02/06/2008

BANCA EXAMINADORA

 José Nilson Beserra Campos (PhD.) - Orientador Universidade Federal do Ceará
 Dr. Francisco de Assis de Souza Filho Universidade Federal do Ceará
 Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins (PhD.) Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
 Jacques Maurice René Raymond Servain (PhD.) Institut de Recherche pour le Développement (IRD) – France
 Antônio Divino Moura (PhD.) Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)

DEDICATÓRIAS

“A DEUS essa força inabalável a qual recorreremos constantemente pelo dogma chamado FÉ”.

“A meus queridos e amados Pais, Domingos de Nazaré Alves (“*in memorian*”) e Lucimar Brabo Alves; e aos meus amados irmãos (Brabo, Alda, Sérgio, Carmem, Paulo, Mauro e Maria José) fontes de amor, carinho e principalmente dedicação na árdua tarefa de educar pelos ensinamentos mais nobres que um ser humano pode ter: os de preceitos morais e de respeito ao seu semelhante”.

“As minhas queridas, Eliane, Adja e Ivna, pela compreensão, das minhas incompreensões, nos momentos difíceis, e por acreditarem da minha importância em suas vidas. Esta conquista é muito mais de vocês”.

AGRADECIMENTOS

Em especial, ao Prof. Dr. Nilson Beserra Campos, meu Orientador, pelos ensinamentos, amizade e, sobretudo pela confiança em apostar no meu potencial de trabalho.

Aos Drs. Antônio Divino Moura, Jacques Maurice René Raymond Servain, Eduardo Sávio Passos Rodrigues, Francisco de Assis Souza Filho integrantes da banca de avaliação pelas críticas e sugestões para o aperfeiçoamento do estudo.

Aos Drs. Eduardo Sávio R. P. Martins (Presidente da FUNCEME) e ao Francisco de Assis de Souza Filho (Ex-Presidente da FUNCEME) pelo incentivo sem restrições aos seus funcionários para cursarem programas de Mestrado e Doutorado.

A Profa. Teresinha de Maria Bezerra Sampaio Xavier pelo constante incentivo na busca de completar meus estudos de Pós-Graduação, em um período no qual já estava desmotivado para tal propósito.

Ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, na pessoa de todos os seus Professores e colegas pela transmissão de conhecimentos e a oportunidade para cursar este Programa de Doutorado.

A todos os colegas do Departamento de Meteorologia da FUNCEME pelas discussões profícuas, e ao grupo de Hidrologia de Superfície pela imensurável ajuda (em especial aos colegas Luís Sérgio, Vinicius e Alan).

A família Gonçalves Montenegro em especial ao Sr. Soares (*in memorian*), pela confiança e amizade, a D. Josefá (a qual denomino como minha segunda Mãe), a Jucileide, Euricléia, Eucia e Suelde pelo incentivo e acolhimento nos momentos difíceis a minha gratidão.

A FUNCEME e FUNCAP pelo apoio, e a todos que de alguma forma contribuíram para que este estudo se completasse.

EPÍGRAFE

“O processo de adquirir conhecimento e saber são intrínsecos à evolução do ser humano. O primeiro, está ligado, principalmente, ao seu instinto investigativo, o segundo as suas experiências vividas. Porém, se estes não se mesclarem pelo menos na mesma proporção, e não forem usados no sentido de tentar melhorar e compreender a vida de seu semelhante, com certeza não terão sentido prático”.

J. M. B. A. (08/09/07)

RESUMO

A premissa pelo uso racional da água tem demandado informações em escalas de espaço e tempo cada vez menores. Neste estudo investiga-se a sensibilidade da simulação climática de um *downscaling* dinâmico de precipitação (1971-2000) acoplado a um modelo chuva-vazão e sua aplicação na operação de um reservatório hídrico na região semi-árida do Estado do Ceará. Foi dada uma ênfase a escala intrasazonal (abaixo de um mês) em anos de contrastes climáticos classificados como de La Niña, El Niño e Normais ocorridos no Oceano Pacífico Tropical. Foram usados o modelo de circulação geral da atmosfera *ECHAM4.5*, e o modelo regional, denominado de Modelo Regional Espectral (MRE), versão 97, do *National Centers for Atmospheric Prediction-NCEP*. O MRE foi aninhado aos dados simulados pelo *ECHAM4.5* tendo como condição de contorno a Temperatura da Superfície do Mar observada no período de janeiro a junho de 1971-2000. Para a estimativa de vazão foi usado o modelo SMAP. Entre os principais resultados citam-se: após a correção pela técnica das *Probability Density Functions* (PDFs), os dados simulados pelo MRE, conseguiram capturar melhor a variabilidade diária da precipitação no posto fluviométrico de Iguatu, média entre 01 de janeiro e 30 de junho. A explicação da variância antes da correção foi de menos de 5%, passando a em torno de 40% após as correções pelas PDFs. As simulações de vazão, analisadas pela explicação da variância, coeficiente de correlação ao quadrado, mostraram que há um ganho de explicação desta variância de duas ou mais vezes, quando se compara esta explicação em relação à precipitação. Este ganho foi observado tanto para períodos diários, pentadais e quinzenais e para todo o período (1971-2000). Mais de 70% do sinal das anomalias pentadais de vazão foram bem simulados. Simulações de volume de um reservatório hipotético (com as características do Açude Orós), com volume inicial $V_0=0,25k$ (capacidade máxima - 1940 hm^3), $0,50k$ e $0,75k$, mostraram que há potencial do uso dessa informação de precipitação em cascata com o modelo chuva-vazão, em particular para os anos classificados como Normais. A explicação da variância entre os volumes simulados e observados diários, para os meses de janeiro a junho, para estes anos Normais tiveram resultados mais expressivos. Esta ficou torno ou mais de 80%. Em síntese, os resultados evidenciaram o potencial de uso da simulação acoplada da modelagem dinâmica atmosférica com a modelagem hidrológica associada à operação do reservatório.

Palavras-chave: intrasazonal, modelagem hidrológica, acoplamento dinâmico.

ABSTRACT

The premiss for the rational use of water has demanded information on smaller space and time scales. This study investigates the sensitivity of climate simulation of a dynamic downscaling of precipitation (1971-2000) coupled to a rain-flow model and its application to the operation of a water reservoir in the semi-arid region of Ceará State. Emphasis was given to intra seasonal scale (smaller than a month) in years of climatic contrasts classified with La Niña, El Niño and Normals (averaged) in the Tropical Pacific Ocean. We used atmospheric general circulation model ECHAM4.5, and the Regional Spectral Model (RMS), version 97 of National Center for Atmospheric Prediction-NCEP. The RSM was nested with data simulated by ECHAM4.5, taking as boundary condition the sea surface temperature observed in the period January to June 1971-2000. For estimating streamflow we rate used the SMAP model. Results show that after the technique of Probability Density Functions (PDFs) correction, the simulation by RSM, best captured daily variability of precipitation at fluviometric post of Iguatu, average, from 01 January to 30 June. The explained variance before the correction was less than 5%, rising to around 40% after the correction by PDFs. The simulations of streamflow, analyzed by the explained variance, square of correlation coefficient, shows that there is a two or more gain of explained this variance, as compared with explanation to streamflow in relation to rainfall. This gain is observed for all periods (daily and accumulated five and fifteen days), and for the entire period (1971-2000). More than 70% pentads anomalies of stramflow were well simulated. Simulations of volume of a hypothetical reservoir (with the characteristics of the Orós Dam) with initial volum $V_0 = 0.25k$ (maxim capacity - 1940 hm^3), $0.50k$ and $0.75k$, showed that there is the potential use of that cascade information of precipitation with rain-flow model, in particular for averaged years classified. The explanation of the variance between simulated and observed daily volumes for the months of January to June, for these years Normal results was more expressive. This was about 80%. In summary, the results showed the potential for use of coupled simulation model between atmospheric modeling water associated with the reservoir operation.

Keywords: intra seasonal, hydrologic modeling, dynamic coupling.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<p>FIGURA 1 - Distribuição espacial (mm) e contribuição (%) em relação ao total anual das estações do ano para o Estado do Ceará. 1a) precipitação de verão; 1b) precipitação de outono, 1c) precipitação de inverno; 1d) precipitação de primavera; 1e) (%) contribuição de verão; 1f) (%) contribuição de outono; 1g) (%) contribuição de inverno e 1h) (%) contribuição de primavera</p>	37
<p>FIGURA 2 - Imagens do Satélite Meteosat VI, canal infravermelho, com realce de cores, sobre a Região Nordeste do Brasil. 2a) para dia 10/01/98, às 15:00hs, mostrando uma frente fria sobre a Região Sudeste associada a um VCAS sobre a Região Nordeste, causando intensa nebulosidade na parte norte da Região e céu claro no setor central e sul da mesma. 2b) Mesma situação da figura 2a, para o dia 29/01/98 às 23:00 hs, porém a frente posicionada um pouco mais ao norte ocasionando a formação de áreas de instabilidade em grande parte do NEB e Oceano Atlântico adjacente. O gradiente de cores nas imagens do cinza ao verde indica uma menor a maior intensidade de nuvens, associadas às nuvens estratificadas (preto-cinza e vermelho) a convecção profunda (verde-azul).....</p>	39
<p>FIGURA 3 - Localização da bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu.....</p>	42
<p>FIGURA 4 - Municípios que compõe a bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu.....</p>	42
<p>FIGURA 5 - Altimetria (m) da bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu.....</p>	43

FIGURA 6 – Vegetação e rede de drenagem da bacia hidrográfica do posto pluviométrico de Iguatu	43
FIGURA 7 - Uso do solo na bacia hidrográfica do posto pluviométrico de Iguatu	44
FIGURA 8 - Valores médios (1971-2000) da vazão (eixo da esquerda) e precipitação (eixo da direita) da bacia hidrográfica do posto pluviométrico de Iguatu	45
FIGURA 9 - Coeficiente de correlação entre a precipitação observada e simulada (1971-2000) para o setor norte do NEB. a) Observado x <i>ECHAM4.5</i> e b) observado x MR. As áreas hachuradas indicam significância estatística de 95% segundo teste t Student. Fonte: Alves <i>et al.</i> , 2005.....	53
FIGURA 10 - Chance de acerto (%) em 3 categorias (Seco-S, Normal-N e Chuvoso-C) ou 5 categorias (Muito Seco-MS, Seco-S, Normal-N, Chuvoso-C e Muito Chuvoso-MC) de percentis de precipitação para o setor norte do NEB. a) Para 3 categorias <i>ECHAM4.5</i> , b) Para 3 categorias MR, c) para 5 categorias <i>ECHAM4.5</i> e d) para 5 categorias MR. Fonte: Alves <i>et al.</i> , 2005.	54
FIGURA 11 - Número de postos pluviométricos usados sobre a bacia do posto pluviométrico de Iguatu usados no estudo diariamente entre 01 de janeiro de 1971 a 31 de dezembro de 2000.....	63
FIGURA 12 - Exemplo de um polígono de Thiessen com os postos pluviométricos usados no cálculo da precipitação, média, diária sobre a bacia do posto pluviométrico de Iguatu	64

FIGURA 13 - Domínio dos modelos MCGA (<i>ECHAM4.5</i>) utilizado nas simulações do <i>ECHAM4.5</i> e do MRE/97 (área A1 da figura).	
Fonte: Alves <i>et al.</i> , 2003.....	70
FIGURA 14 - Topografia sobre a Região Nordeste (m). a) MCGA (<i>ECHAM4.5</i>), b) MRE. O espaçamento entre as isolinhas da figura 14a é de 50 m, e da 14b) é de 100 m.	
Fonte: Alves <i>et al.</i> , 2003.....	71
FIGURA 15 - Diagrama esquemático de operação do modelo SMAP.....	73
FIGURA 16 - Diagrama esquemático de uma fase de operação do reservatório associado a um período de excesso (denominada de Fase de Excesso).	
Fonte: Sólon (2005).....	80
FIGURA 17 - Diagrama esquemático de uma fase de operação do reservatório associado a um período de déficit (denominada de Fase de Déficit).	
Fonte: Sólon (2005).....	80
FIGURA 18 - Diagrama esquemático da ADIP tipo I.	
Fonte: Sólon (2005).....	81
FIGURA 19 - Diagrama esquemático da ADIP tipo II	
Fonte: Sólon (2005).....	82
FIGURA 20 - Esquema representativo do acoplamento entre a modelagem dinâmica da atmosfera e a modelagem hidrológica com aplicação final na operação de um reservatório hídrico.....	86

FIGURA 21 - Precipitação, média diária (mm) para o período de 1971-2000 na bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu.....	91
FIGURA 22 - Percentual de dias entre os meses de janeiro a junho (1971-2000) inserido nas referidas classes de percentuais (diferença quantitativa entre o observado e o simulado). a) período (1971-200), b) anos Normais, c) anos de La Niña e d) anos de El Niño	93
FIGURA 23 - Variabilidade interanual na primeira quinzena da precipitação (mm) observada (obs) e simulada pelo modelo regional espectral (MRE) com correção pela técnica com base nas PDFs. a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio e f) junho.....	97
FIGURA 24 - Variabilidade interanual na segunda quinzena da precipitação (mm) observada (obs) e simulada pelo modelo regional espectral (MRE) e sua correção pela técnica com base nas PDFs. a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio e f) junho.....	101
FIGURA 25 - Variabilidade interanual mensal da precipitação (mm) observada (obs) e simulada pelo modelo regional espectral (MRE) e sua correção pela técnica com base nas PDFs. a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio e f) junho.....	103
FIGURA 26 - Histogramas de precipitação diária observada e a média dos dez membros do MRE corrigido pelas PDFs a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio e f) junho.	106
FIGURA 27 - Funções densidade de probabilidade (Fdps) para precipitação observada e simulada pelo MRE corrigida pelas PDFs. a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio e f) junho	109

- FIGURA 28** - Frequência de ocorrência de acerto no sinal da anomalia pentadal da precipitação observada e a simulada pelo MRE corrigida pelas PDFs para todos os anos (1971-2000), para anos de La Niña, El Niño e Normais. 110
- FIGURA 29** - Hidrogramas observados e simulados e seus diagramas de dispersão e precipitação observada no período de calibração do modelo SMAP (1950-1960), a) e b) diário, c) e d) pentadal e e) e f) quinzenal. O eixo dos x nas figuras 29a , 29c, 29e para escala diária está marcado de 10 em 10 dias. 114
- FIGURA 30** - Hidrogramas observados e simulados e seus diagramas de dispersão e precipitação observada no período de validação do modelo SMAP (1961-1970), a) e b) diário, c) e d) pentadal e e) e f) quinzenal. O eixo dos x nas figuras 30a, 30c, 30e para escala diária está marcado de 10 em 10 dias. 117
- FIGURA 31** - Vazão (média quinzenal - 1971-2000) observada e simulada na bacia do posto fluviométrico de Iguatu no período de 01 de janeiro a 30 de junho. 120
- FIGURA 32** - Hidrograma pentadal interanual das vazões observadas e simuladas e diagrama de dispersão observados e simulados pelo modelo SMAP tendo como dados de entrada a precipitação simulada pelo MRE corrigida pelas PDFs no período de 1971-2000, a precipitação observada e corrigida pela PDF. a) Hidrograma pentadal interanual e b) diagrama de dispersão. No gráfico do hidrograma estão marcados nos eixos dos x apenas a pênstada inicial e final de cada ano entre os meses de janeiro a junho. 122
- FIGURA 33** - Hidrograma quinzenal interanual das vazões observadas e simuladas e diagrama de dispersão observados e simulados pelo modelo SMAP tendo como dados de entrada a precipitação simulada pelo MRE corrigida pelas PDFs no período de 1971-2000, a precipitação observada

e corrigida pela PDF. a) Hidrograma pentadal interanual e b) diagrama de dispersão. No gráfico do hidrograma estão marcados nos eixos dos x apenas a quinzena inicial e final de cada ano entre os meses de janeiro a junho.	123
FIGURA 34 - Histogramas de vazão diária observada e simulada pelo modelo SMAP tendo como variável de entrada a precipitação, média dos 10 membros, simulada pelo MRE corrigida pela técnica das PDFs. a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio e f) junho.	130
FIGURA 35 – Funções densidade de probabilidade (Fdps) para vazão observada e simulada pelo SMAP tendo como dados de entrada a precipitação simulada pelo MRE corrigida pelas PDFs. a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio e f) junho	132
FIGURA 36 - Freqüência de ocorrência de acerto no sinal da anomalia pentadal da vazão observada e a simulada pelo modelo SMAP tendo como variável de entrada a precipitação MRE corrigida pelas PDFs para todos os anos (1971-2000), para os anos de El Niña, El Niño e Normais..	133
FIGURA 37 - Volumes diários simulados no reservatório com $V_0=0,25k$ em anos de La Niña a) 1971, b) 1972, c) 1975, d) 1976 e, e) 1999.	138
FIGURA 38 - Volumes diários simulados no reservatório com $V_0=0,25k$ em anos Normais a) 1978 e b) 1979.	138
FIGURA 39 - Volumes diários simulados no reservatório com $V_0=0,25k$ em ano de El Niño (1977).	139
FIGURA 40 - Diagrama esquemático mostrando uma síntese (avaliação em função do coeficiente de correlação) dos resultados em cascata (precipitação e vazão) na bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu. Todos na legenda significam (1971-2000).	144

LISTA DE TABELAS

	Pág.
<p>Tabela 1 - Experimentos de simulação executados para o mês de abril de 2001 para se definir o experimento de controle que serviu de base para as simulações do MRE para o trimestre (fevereiro a maio - 1971 a 2000). Fonte: Alves <i>et al.</i>, 2003.....</p>	70
<p>Tabela 2 - Diagrama esquemático mostrando como se calcula uma tabela de contingência entre dados simulados/previstos e observados</p>	90
<p>Tabela 3 - Índices estatísticos usados na avaliação de desempenho da precipitação para períodos diários (janeiro a junho) para todo o período de estudo (1871-2000) em anos de La Niña, de El Niño, Normais. ttab e tcal indicam os valores da estatística de prova e sig a sua significância. Um asterisco na tabela indica correlação não significativa a 95%</p>	111
<p>Tabela 4 - Estatísticas entre a vazão observada no posto fluviométrico de Iguatu e a calculada pelo modelo SMAP tendo como base os dados de precipitação média observada na área de captação de sua bacia, período de calibração (1950-1960). Mobs. (média observada em m³/s), Msimul. (média simulada em m³/s), EAM (erro absoluto médio em m³/s), N.S (coeficiente Nash-Sutcliffe adimensional).</p>	119
<p>Tabela 5 - Estatísticas entre a vazão observada no posto fluviométrico de Iguatu e a calculada pelo modelo SMAP tendo como base os dados de precipitação média observada na área de captação de sua bacia, período de validação (1961-1970). Mobs. (média observada em m³/s), Msimul. (média simulada em m³/s), EAM (erro absoluto médio em m³/s), N.S (coeficiente Nash-Sutcliffe adimensional).</p>	119

Tabela 6 - Estatísticas entre a vazão observada no posto fluviométrico de Iguatu e a calculada pelo modelo SMAP tendo como base os dados de precipitação média observada e simulada pelo MRE e seus valores corrigidos, período (1971-2000). Mobs, (média observada em m ³ /s), Msimul, (média simulada em m ³ /s), EAM (erro absoluto médio em m ³ /s), N.S (coeficiente Nash-Sutcliffe adimensional).	125
Tabela 7 - Coeficiente de determinação (r^2), em percentual entre os dados médios diários, pentadais (Pent.) e quinzenais (Quinz.) de vazão observada e simulada pelo SMAP quando foram usados os dados de precipitação do MRE corrigidos pelas PDFs para o período de janeiro a junho em anos de La Niña (La.), Normais (No.) e de El Niño (Ni.).	126
Tabela 8 - Índices estatísticos usados na avaliação de desempenho da vazão para períodos diários, pentadais e quinzenais (janeiro a junho) para todo o período de estudo (1971-2000) em anos de La Niña, de El Niño, Normais. ttab e tcal indicam os valores da estatística de prova e sig a sua significância. As outras siglas estão definidas na seção de metodologia. Um asterisco na tabela indica correlação não significativa a 95%.	134
Tabela 9 - Índices estatísticos usados na avaliação de desempenho do volume do reservatório para períodos diários (janeiro a junho) para as simulações com V0=0,52k para todo o período de estudo (1971-2000) em anos de La Niña, e Normais. ttab e tcal indicam os valores da estatística de prova e sig. a sua significância. As outras siglas estão definidas na seção de metodologia. O asterisco na tabela indica correlação não significativa a 95%.....	140
Tabela 10 - Índices estatísticos usados na avaliação de desempenho do volume do reservatório para períodos diários (janeiro a junho) para as simulações com V0=0,50k para todo o período de estudo (1971-2000) em anos de La Niña e Normais. ttab e tcal indicam os valores da estatística de prova e sig a sua significância. As outras siglas estão	

definidas na seção de metodologia. O asterisco na tabela indica correlação não significativa a 95%.....	141
Tabela 11 - Índices estatísticos usados na avaliação de desempenho do volume do reservatório para períodos diários (janeiro a junho) para as simulações com $V_0=0,25k$ para todo o período de estudo (1971-2000) em anos de La Niña, e Normais. t_{tab} e t_{cal} indicam os valores da estatística de prova e sig a sua significância. As outras siglas estão definidas na seção de metodologia. O asterisco na tabela indica correlação não significativa a 95%.....	141
Tabela 12 - Tabela de contingência de avaliação entre o volume diário observado e o simulado no reservatório (janeiro a junho) com $V_0=0,25k$ para todo o período de estudo (1971-2000). ..	142
Tabela 13 - Tabela de contingência de avaliação entre o volume diário observado e o simulado no reservatório (janeiro a junho) com $V_0=0,50k$ para todo o período de estudo (1971-2000). ..	142
Tabela 14 - Tabela de contingência de avaliação entre o volume diário observado e o simulado no reservatório (janeiro a junho) com $V_0=0,75k$ para todo o período de estudo (1971-2000). ..	143

ANEXOS

	Pág.
FIGURA 1 - Volumes diários simulados no reservatório com $V_0=0,50k$ em anos de La Niña a) 1971, b) 1972, c) 1975, d) 1976 e, e) 1999.	170
FIGURA 2 - Volumes diários simulados no reservatório com $V_0=0,50k$ em anos Normais a) 1978 e b) 1979.	171
FIGURA 3 - Volumes diários simulados no reservatório com $V_0=0,50k$ em ano de El Niño (1977).	172
FIGURA 4 - Volumes diários simulados no reservatório com $V_0=0,75k$ em anos de La Niña a) 1971, b) 1972, c) 1975, d) 1976 e, e) 1999.	172
FIGURA 5 - Volumes diários simulados no reservatório com $V_0=0,75k$ em anos Normais a) 1978 e b) 1979.	173
FIGURA 6 - Volumes diários simulados no reservatório com $V_0=0,75k$ em ano de El Niño (1977).	173
FIGURA 7 - Postos pluviométricos usados no estudo.	174
Tabela 1 – Códigos e coordenadas geográficas dos postos pluviométricos usados no estudo	175

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- ADIP** - Anticipated Decision Influence Period
- ANA** - Agência Nacional de Águas
- AN** - Anomalias
- ATS** - Atlântico Norte
- ATN** - Atlântico Sul
- BRAMS** - *Brasilian Regional Atmospheric Modeling System*
- COADS** - *Comprehensive Atmospheric-Ocean Data Set*
- CPRM** - Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais
- DAEE** - Departamento de Águas e Energia Elétrica
- DKRZ** - *German Climate Computing Centre*
- DP** - Desvio Padrão
- E** - Energia Cinética Turbulenta
- ECHAM** - *European Community-Hamburg Model*
- ECMWF** - *European Centre for Medium Range Weather Forecasts*
- ENOS** - El Niño - Oscilação Sul
- FUNCEME** - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
- FUNCAP** - Fundação Cearense Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico
- Fdps** - Funções densidade de probabilidade
- IPCC** - Intergovernmental Panel Climate Change
- INPE** - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- IRI** - *International Research Institute for Climate and Society*
- JAN-MAI** - Janeiro a Maio
- LA** - Anos de La Niña
- k** - Capacidade máxima do reservatório
- MCGA** - Modelo de Circulação Geral da Atmosfera
- MEG** - Modelo Espectral Global
- MFM** - Modelos Físicos-Matemáticos
- MLT** - Média de Longo Tempo
- MOM** - Momentos
- MM5** - *Meso-scale Model*
- MR** - Modelo Regional

MRE - Modelo Regional Espectral
NCAR - *National Center for Atmospheric Research*
NCEP - *National Center for Atmospheric Prediction*
NEB - Nordeste do Brasil
NI - Anos de El Niño
NO - Anos Normais
Obs - Observado
ONS - Operador Nacional do Sistema
r - Coeficiente de Correlação
r² - Coeficiente de Determinação
ROL - Radiação de Onda Longa
PC - Período Crítico
PNO - Períodos Não Opcionais
POP - Padrões de Oscilações Principais
PDF - *Probability Density Function*
Sig. - Significância estatística
SHB - Sistema Hidrelétrico Brasileiro
SMAP - *Soil Moisture Accounting Procedure*
SUDENE - Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste
TOGA-TAO - *Tropical Ocean Global Atmospheric – Tropical Atmospheric Ocean*
Boys
ttab - Estatística de prova tabelada
tcal - Estatística de prova calculada
TSM - Temperatura da Superfície do Mar
VCAS - Vórtice Ciclônico de Ar Superior
V0 - Volume inicial do reservatório
ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

DEDICATÓRIAS	v
AGRADECIMENTOS	vi
EPÍGRAFE	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xvi
ANEXOS	xix
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xx
1 INTRODUÇÃO	24
1.1 Objetivos do estudo	26
1.2 Geral	26
1.3 Específicos.....	26
2 JUSTIFICATIVAS DO ESTUDO	27
3 REVISÃO DA LITERATURA	30
3.1 Relações entre variabilidade climática e variabilidade hidrológica	30
4 CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS DAS CHUVAS NO CEARÁ E DOS PRINCIPAIS SISTEMAS ATMOSFÉRICOS	35
5 A BACIA HIDROGRÁFICA DO POSTO FLUVIOMÉTRICO DE IGUATU ..	40
6 PRINCIPAIS CONCEITOS ABORDADOS NO ESTUDO	46
6.1 A modelagem oceânica da TSM.....	46
6.2 Modelagem dinâmica da atmosfera e a técnica de <i>downscaling</i> na previsão de precipitação.....	48
6.3 Técnicas estatístico-estocásticas usadas na previsão de vazão.....	54
6.4 Aspectos da modelagem hidrológica	56
6.5 Modelagem hidrológica utilizada na previsão de vazão.....	58
6.6 A experiência da FUNCEME em modelagem climática e hidrológica.....	60
7 DADOS UTILIZADOS E METODOLOGIA	62
7.1 Dados usados no estudo.....	62
7.1.1 Dados de TSM	62
7.1.2 Dados de precipitação.....	62
7.1.3 Dados de vazão e evaporação	63
7.3 Modelo dinâmico de grande escala e regional.....	66
7.3.1 Modelo dinâmico de grande escala <i>ECHAM4.5</i>	66
7.3.2 Modelo regional espectral 97 (MRE/97).....	67
7.4 Sobre os experimentos de modelagem numérica de grande escala e regional	68
7.5 O Modelo de transformação chuva - vazão	71
7.6 Calibração de modelos de transformação chuva-vazão.....	74
7.7 Parâmetros de calibração do modelo	75
7.8 Fonte de erros nos sistemas de modelagem.....	76
7.9 Técnicas usadas na correção dos dados de modelagem	76
7.10 Técnicas sobre teoria da decisão abordadas no estudo.....	77
7.10.1 Fases da curva de um período de excesso	79
7.11 - Simulação do reservatório	82
7.12 Critérios de avaliação estatística do regime hídrico observado e simulado	87
8 RESULTADOS E DISCUSSÃO	91
8.1 Variabilidade intrasazonal da precipitação.....	92
8.2 Variabilidade intrasazonal para os anos de contrastes climáticos	106
8.3 Calibração e validação do modelo SMAP	112

8.4 Simulação de vazões como o modelo SMAP usando modelagem dinâmica	120
8.5 Simulação do reservatório	135
9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	144
REFERÊNCIAS	148
ANEXO - Volumes diários simulados no reservatório com $V_0=0,25k$, $0,50k$ e $0,75k$ em anos de contrastes climáticos de La Niña, Normais e de El Niño. Postos pluviométricos usados no estudo. Códigos e coordenadas geográficas dos postos pluviométricos usados no estudo.....	168

1 INTRODUÇÃO

No final da década dos anos 90, devido à crise de energia que o Brasil atravessou, provocada pela baixa afluência de água nas bacias hidrográficas do País e ao crescimento da sua demanda para múltiplos usos, uma ênfase maior foi dada à questão do uso das informações hidro-meteorológicas. Estas, advindas de estudos diagnósticos, previsões numéricas ou estatístico-estocásticas, podem ser usadas para aperfeiçoar e melhorar o planejamento das atividades hidrológicas e energéticas nas diversas regiões do território nacional. Hoje há consenso científico que os anos de contrastes climáticos no oceano Pacífico e Atlântico Tropical (fenômenos El Niño, La Niña e dipolos de Temperatura da Superfície do Mar -TSM) causam grande variabilidade na distribuição temporal e espacial da chuva e nas vazões nas diversas regiões do Nordeste do Brasil (NEB).

Em regiões semi-áridas, como é o caso do Estado do Ceará, a integração entre as ciências meteorológica e hidrológica é essencial para o planejamento de oferta e demanda hídrica, nas escalas de tempo de dias ou meses. A previsão de ondas de cheias nas bacias hidrográficas do Estado possibilita um melhor manejo dos estoques de água dos recursos hídricos do Estado, por exemplo, o de abertura e fechamento de comportas em reservatórios hídricos que permitam esse tipo de operação.

Esse manejo integrado entre previsões meteorológicas nas escalas de dias ou até meses e seus usos em simulações hidrológicas, associadas às regras de decisão que possibilitem uma melhor operação de um reservatório hídrico, podem trazer imensos benefícios sociais e econômicos. Estas ações podem evitar transtornos ocasionados por picos de cheias inesperadas, ou devido à falta de água para suprir a demanda de uma série de atividades humanas na área de influência da bacia hidrográfica ou reservatório hídrico estudado.

Outras características fisiográficas do Estado do Ceará também contribuem para que possam ser aprimorados estudos que possibilitem um melhor monitoramento e previsão dos processos hidrológicos no Estado. Ressalta-se sua configuração geológica, que tem mais de 80% de seu território assentado em uma estrutura cristalina, apresentando quase nenhuma retenção de água e elevado escoamento superficial. Soma-se a isso, o seu regime de chuvas concentrado em quatro meses do ano, associado a uma grande irregularidade temporal e espacial das chuvas de ano para ano. Nesse contexto é

imprescindível o estudo diagnóstico do regime de hídrico em bacias hidrográficas do NEB e de técnicas que permitam aprimorar e testar o potencial da previsão de vazão afluente em reservatórios hídricos e otimizar suas operacionalizações na região NEB.

Neste estudo pretende-se abordar um paradigma, avaliar o desempenho da modelagem climática dinâmica de precipitação na escala intrasazonal e seus efeitos em cascata acoplados na modelagem de vazão e operação de reservatório. Isto se deve ao fato de que eventos de precipitação que ocorrem nas escalas intrasazonais tendem a ser mais bem simulados e previstos com modelagem dinâmica de tempo (períodos de horas a dias, no máximo 10 a 15 dias), que ao longo de sua simulação/previsão assimilam dados das condições atmosféricas ou de superfície. Na previsão climática isso não ocorre, e o processo de simulação/previsão é dependente direto da chamada condição de contorno à superfície (TSM). Alguns estudos mais recentes na literatura têm rodado simulação climática fazendo a assimilação de dados ao longo do tempo de simulação, mostrando resultados promissores na avaliação de estatísticas de precipitação de alta frequência. É importante mencionar também que neste estudo não foram feitas investigações mais específicas em cada passo do processo de cascata (acoplagem simulação de precipitação/vazão operação do reservatório), a exemplo de: i) modificações de parametrizações na modelagem regional de convecção e outros processos físicos que sugerem melhor desempenho na simulação de precipitação. ii) testes de sensibilidade de quais parâmetros calibrados no modelo de estimativa de chuva-vazão tem maior influência na sua simulação, que podem melhorar a estimativa final de operação do reservatório comparado às observações e sua utilização pelo operador do sistema hídrico.

Em síntese, estuda-se o ciclo de modelagem e tomada de decisões na operação de um reservatório. O ciclo inicia com os dados de entrada temperatura dos oceanos nos modelos atmosféricos; passa para o modelo de transformação chuva - vazão; acumula as vazões no reservatório e termina em impactos nas regras de operação do reservatório. Ressalte-se que o reservatório ao acumular as vazões executa um papel de filtro na variabilidade de alta frequência do sistema.

1.1 Objetivos do estudo

1.2 Geral

Estudar o ciclo de modelagem da atmosfera, em grande escala e regional, acoplada a molo chuva - vazão e a tomada de decisão na operação de um reservatório.

1.3 Específicos

- Diagnosticar a sensibilidade da modelagem dinâmica de precipitação, especificamente o *downscaling* dinâmico, acoplado à modelagem de vazão na escala intrasazonal e testar sua aplicação na operação de um reservatório hídrico. Identificar quais curvas (variação intrasazonal do volume do reservatório), possivelmente associadas à tomada de decisões, pode ajudar a otimizar a sua operação são comuns em anos de contrastes climáticos e se estas têm algum potencial de serem simuladas/previstas. Investigar a variabilidade intrasazonal do regime hídrico na bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu (Ceará) nesses anos de contrastes climáticos observados nos oceanos Pacífico e Atlântico Tropicais.
- Identificar as principais características intrasazonais do regime de precipitação e vazão no posto fluviométrico de Iguatu em anos definidos como de La Niña, El Niño e Normais no Pacífico Tropical associados a dipolos positivo e negativo de TSM e anos Normais no Atlântico Tropical;
- Testar o potencial de simulação de vazão, nas escalas diária, pentadal, quinzenal e mensal no posto fluviométrico de Iguatu, oriundas do acoplamento do resultado de modelos de circulação geral da atmosfera (MCGA) e de um modelo regional gestado no MCGAs, servindo como entrada para um modelo hidrológico de simulação de vazão;
- Identificar que curvas (variação intrasazonal do volume de um reservatório hipotético na bacia do posto fluviométrico de Iguatu) podem estar associadas a possíveis tomadas de decisão na sua operação nos chamados anos de contrastes climáticos definidos como de El Niño, La Niña, Normais e com dipolos positivo e negativo de TSM no Atlântico Tropical.

2 JUSTIFICATIVAS DO ESTUDO

O estado do Ceará, marcado por recorrentes secas e cheias apresenta grande irregularidade na distribuição espacial e temporal da precipitação. Climatologicamente tem um período úmido curto e rios intermitentes, com elevada perda de água por evaporação. Nesse aspecto, um melhor conhecimento e entendimento de como a precipitação pluviométrica e as condições climáticas se relacionam com o aporte de água nos seus mananciais hídricos, tornam-se indispensáveis a um melhor convívio do homem e suas atividades dependentes de água.

A irregularidade climática e a falta de condições hídricas adequadas se constituem nos principais obstáculos à implementação de uma agricultura eficiente. A essa deficiência natural de falta de água, provocada por adversidades climáticas, soma-se também a agricultura rudimentar associada à falta de tecnologia. Ressalta-se, também, que poucas áreas do Estado se beneficiam de oferta de água através da irrigação.

Quem mais se ressentir dessa falta de condições hídricas no solo para que o cultivo agrícola se desenvolva e culmine com níveis de produção e produtividade desejada são as comunidades que têm na agricultura de subsistência. Além disso, os governos Estadual e Federal no aspecto financeiro, geralmente, têm que socorrer tais contingentes populacionais nos anos de perda excessiva de safra, dispendendo elevadas cifras financeiras.

Nesse aspecto, a construção e operacionalização otimizada de reservatórios hídricos no Estado do Ceará é uma questão que favorece a fixação do homem no meio rural, facilita sua sobrevivência, e incentiva o desenvolvimento econômico de várias regiões do interior do Estado.

O Governo Brasileiro tem uma preocupação ímpar com a variabilidade do regime hidro-meteorológico das diversas bacias hidrográficas do País. A inerente variabilidade natural das vazões afluentes com seus períodos de seca recorrentes, a baixa previsibilidade, na escala de tempo acima da escala mensal, se constitui um problema-chave em sistemas de geração de energia baseados em hidroelétricas, como é o caso do interconectado sistema brasileiro (MACEIRA e DAMÁZIO, 2005). Além disso, essas vazões afluentes, como no caso das barragens da NEB, são fontes de água para serem usadas em uma vasta gama de atividades (agricultura irrigada, lazer, abastecimento humano e animal, indústria, etc.) no período de estiagem da região,

últimos seis meses do ano (ALVES *et al.*, 1992). Exemplos de períodos de secas que afetaram substancialmente a geração de energia no Brasil foram 1949-1954 e 1979-1983, e por último o colapso ocorrido no final da década de 1990, que levou um racionamento em quase todas as regiões do país (TOMASELLA e NOBRE, 2002).

Por essas razões, principalmente o problema de geração de energia, o Operador Nacional do Sistema (ONS) vem incentivando estudos que investiguem a possibilidade de agregar a previsão meteorológica à hidrológica com objetivo de antever o aporte de vazões afluentes nas mais diversas regiões do País. Outro fato é a quase inexistência de estudos que tem abordado essa questão.

Tucci *et al.* 2003 mostraram a potencialidade do uso de resultados de previsões de chuva vindas de um modelo de circulação geral da atmosfera (MCGA) e de um Modelo Regional (MR), aninhado ao MCGA, para serem usados nas previsões de vazões em vários postos de fluviométricos da bacia hidrográfica do rio Uruguai. Seus resultados foram comparados aos resultados de métodos estatístico-estocásticos que usam variáveis climáticas com influência direta nas vazões e métodos auto-regressivos tradicionais de estimativas de vazões. Ficou comprovado um ganho de desempenho quando se usam os resultados advindos do MR.

Para bacias hidrográficas no NEB, Silva Filho (2005) apresentou um sistema de previsão interanual de vazão afluente para uma pequena bacia localizada na Região Semi-Árida do Estado do Ceará (Açude Cajazeiras). Nesse sistema foi feita uma comparação de métodos estatístico-estocásticos que prevêm direto a vazão afluente via regressão múltipla linear, com o uso de anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) observada meses antes do período de previsão nos oceanos Pacífico e Atlântico Tropicais com o uso da chuva como entrada a modelos hidrológicos vinda dos resultados de MCGA (*ECHAM4.5*), e de um modelo regional (Modelo Regional Espectral/97 – MRE/97), aninhado no *ECHAM4.5*. Souza Filho e Lall (2003) mostraram que o uso de índices climáticos (de El Niño e dipolo de TSM no Atlântico Tropical) podem ser usados como preditores de vazões afluentes em reservatórios do estado do Ceará com até 6 meses de antecedência. Cardoso *et al.* 2005, mostrou que há potencial de previsão mensal de vazão afluente na barragem de Sobradinho com o uso de anomalias de TSM nos oceanos Atlântico e Pacífico Tropicais.

Galvão *et al.*, 2005, mostraram que a previsibilidade climática da chuva com o uso da técnica de *downscaling*, usando dados de MCGA (*ECHAM4.5*) para alimentar um modelo regional de mais alta resolução (MRE/97), foi capaz de melhorar a

estatística de vazões afluentes em dois reservatórios hídricos do NEB, conseguindo reproduzir as suas variabilidades diárias.

É importante ressaltar, que esses poucos estudos, particularmente os executados para reservatórios do NEB, não detalharam a variabilidade do regime hídrico em anos de contrastes climáticos. Além disso, a identificação de regras que possam auxiliar a tomada de decisão, com objetivo de um melhor uso racional da água, na operação de um reservatório hídrico nesses anos de contrastes climáticos, e seu potencial prognóstico é fator essencial para um melhor gerenciamento da água em reservatórios hídricos do NEB.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Relações entre variabilidade climática e variabilidade hidrológica

Nesse aporte de subsídios para o planejamento racional entre a oferta e a demanda dos recursos hídricos também são importantes os estudos de análises diagnósticas de tendências de variáveis hidroclimáticas (por exemplo, precipitação pluvial e vazões afluentes a reservatórios). Além disso, incluem-se também estudos prognósticos de médio longo prazos baseados somente na própria variabilidade cíclica das séries observadas dessas variáveis hidroclimáticas (ROBERTSON e MECHOSO, 2001).

A possibilidade dessas previsões de vazões mensais de rios, com vários meses antecipados, é de suma importância para economias regionais que dependem diretamente da energia hidrelétrica e da irrigação para cultivo agrícola, cujas variabilidades estão ligadas com sinais climáticos, que ocorrem na área tropical do globo. Esse fato tem motivado o desenvolvimento de estudos diagnósticos e métodos para a previsão de vazões afluentes sazonais com até seis meses de antecedência, em rios de várias áreas do globo, que usam informações climáticas tais como o fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e dipolo de TSM no Atlântico Tropical (DEPRETIS *et al.*, 1996; VALDÉS *et al.*, 1999; DETTINGER *et al.*, 2000; ROBERTSON e MECHOSO, 1998, 2000 e 2001; ENFIELD *et al.*, 2001, SOUZA FILHO e LALL, 2003).

No Pacífico Tropical a presença de eventos quentes (frios) denominados de El Niño (La Niña) com anomalias positivas (negativas) de TSM causa fenômenos climáticos diferenciados em várias áreas do globo. Vários estudos têm abordado este tema entre os quais cita-se: Bjerknes, 1969; Rasmusson e Carpenter, 1982; Ropelewski e Halpert, 1996 e 1997 e Philander, 1991. Em anos de La Niña, ou com características com TSMs em torno da média no Pacífico Tropical, chuvas intensas concentram-se sobre o norte da Austrália de região da Indonésia, e redução de chuvas com estiagens predomina sobre o setor centro-leste da bacia. Em anos de El Niño, essa configuração de chuva é contrária (ROPELEWSKI e HALPERT, 1996 e 1997; PHILANDER, 1991).

Nos últimos anos, em várias áreas do globo, apareceram inúmeros os estudos que relatam os impactos do clima no regime hídrico de bacias hidrográficas (BERBERY e BARROS, 2003). O regime hídrico de uma bacia hidrográfica é complexo e se define pela influência de muitos fatores. Garcia (2000), por exemplo, argüiu que diferentes sub-bacias da Bacia da Prata (sul da América do Sul) tem sido

afetadas por trocas antropogênicas, tais como: desmatamento, uso do solo com substituição de plantação de café por culturas de grãos sazonais.

Na escala interanual, muitos estudos têm mostrado que o fenômeno ENOS é um dos principais fatores influenciadores no regime hídrico de rios da América do Sul. Poveda e Mesa (1997) investigaram a ligação do ENOS em vazões de rios da Colômbia e reportaram que essa relação se dá no sentido leste para oeste ao longo do ano. Esses autores também mostraram que o impacto da fase negativa do ENOS (episódios de La Niña) é mais pronunciado que os observados na fase positiva do ENOS (El Niños). Poveda *et al.* (2001) mostrou que os efeitos do ENOS são maiores nas vazões afluentes de rios da Colômbia do que na precipitação. Hasteranth (1990) encontrou altas vazões anômalas em rios no setor norte da América do Sul, exceção à bacia do Rio Orinoco, durante a fase positiva do ENOS.

Mechoso e Perez Iribarren (1992) demonstraram que vazões afluentes em Salto Grande no Rio Uruguai, tendem a apresentar valores acima da média durante os anos de El Niño, entre os meses de novembro a fevereiro. Marengo (1995) mostrou que a hidrologia de vários rios da América do Sul apresenta forte ligação com o ciclo ENOS. Bischoff *et al.* (2000) investigaram a relação entre diferentes fases do ciclo ENOS e o tempo de fortes cheias na bacia do Rio Uruguai. Em seus resultados ficou evidente que durante as fases positiva e negativa do ciclo ENOS as vazões afluentes nessa bacia são diferentes. Berry *et al.* (2002), confirmaram que vazões na Bacia da Prata em anos de El Niño são sempre maiores do que nos anos de La Niña.

Os métodos prognósticos estatísticos baseados em periodicidades, até o momento testados, para prever a chuva sazonal ou anual com meses a anos de antecedência, para a região Semi-Árida do NEB não explicaram mais de 25% da variabilidade interanual da chuva nessa região, e, possivelmente, para suas variáveis derivadas como as vazões afluentes em reservatórios os resultados sejam semelhantes. Entretanto, os resultados dessas técnicas podem ser utilizados com mais confiança para prognósticos do número de anos classificados em determinada categoria de percentis de chuva ou vazão (por exemplo, de vir a ser um ano Seco, Normal ou Chuvoso), para períodos decadais ou superiores, em que a variabilidade natural do clima seja marcadamente mais explícita.

Alguns esforços recentes de identificação dos mecanismos e causas climáticas do regime de chuva no NEB e também o regime de vazões em alguns rios são discutidos em Uvo *et al.* (2000), Uvo e Graham (1998), Uvo *et al.* (1998), Marengo et

al. (1998). A chuva na região é altamente variável no espaço, dentro da estação chuvosa e durante os anos (KOUSKY, 1979). A sazonalidade da chuva regional, e consequentemente das vazões, são governadas em grande parte pela migração norte/sul da ZCIT.

Uvo *et al.* (1998) sintetiza uma descrição da conexão entre chuva no NEB e a ZCIT baseada em estudos anteriores. Eles explicam que a estação chuvosa principal é iniciada entre fevereiro e março, quando a ZCIT sobre o Oceano Atlântico Tropical alcança sua posição mais ao sul. A migração da ZCIT para o norte sinaliza o fim da estação chuvosa. O início e o fim deste processo têm datas com alta variabilidade, e este fato afeta significativamente o total de chuva sazonal (MOURA e SHUKLA, 1981).

A chuva de janeiro-fevereiro sobre o NEB é afetada por frentes frias ou por mecanismos a elas associados (KOUSKY, 1979). Conexão entre o Pacífico oriental e o comportamento de ZCIT no Atlântico Tropical foi estudada por Nobre e Shukla (1996), Saravanan e Chang (2000), e Chiang *et al.* (2000) com duas hipóteses contrastantes. Nobre e Shukla (1996) explicam a conexão entre um episódio ENOS maduro no inverno boreal e um incremento das anomalias positivas de TSM no Atlântico Tropical Norte no inverno e primavera, os quais definiram como uma influência remota chamada de "ponte atmosférica". Saravanan e Chang (2000) apontam ao papel de Circulação de Walker nesta conexão. Chiang *et al.* (2000) mostraram observacionalmente suporte para este mecanismo de ponte atmosférica e analisaram suas variações interdecadais relacionando-o diretamente à frequência variável de episódios El Niño e La Niña com as variações das células de Hadley no Atlântico Tropical.

O estudo de Uvo *et al.* (1998), considerando uma abordagem estatística multivariada mais detalhada espacialmente (105 estações) e temporalmente (mensal e sazonal) analisaram a precipitação no NEB e sua relação com as anomalias de TSMs. Os resultados indicam que as anomalias positivas de TSM no Atlântico Equatorial Meridional são associadas com uma migração mais cedo da ZCIT para posições abaixo do Equador, que favorece o aumento de chuva em partes do NEB inclusive no Ceará.

O ciclo ENOS tem importância menor, estando, mas associado com a variabilidade pluviométrica em janeiro e fevereiro e de abril-maio. ENOS intensos tendem a causar seca no Semi-Árido nordestino. Um contexto para estas observações foi analisado por Chiang *et al.* (2000), que também enfocaram a dependência das chuvas no Ceará com os índices ENOS e o gradiente de TSM entre o Atlântico Equatorial Norte e Sul. Chiang e seus colaboradores observaram que o aumento na TSM

da região Niño3 está associado a um decréscimo das chuvas sobre o Ceará. A interpretação sugerida por esses autores é: quando a convecção é fraca no Oceano Pacífico equatorial leste (La Niña), a ZCIT do Atlântico Tropical é influenciada por outros fatores, principalmente o gradiente de TSM entre o Atlântico Tropical Norte e Sul. Com aumento da convecção sobre o Pacífico equatorial oriental, subsidência anômala passa a ocorrer sobre o Atlântico Tropical reduzindo a chuva no NEB. A relação não linear entre as TSMs do Pacífico e a convecção e sua influência na TSM do Atlântico Tropical e as chuvas no Ceará é identificada como um fator nas aparentes mudanças na TSM na região de Niño3 e suas teleconexões (influências remotas) sobre o Atlântico.

Para o NEB, anos de El Niño (La Niña) estão associados, em geral, com escassez (chuvas mais abundantes), enquanto condições contrárias são observadas no sul e sudeste do Brasil. Em geral, estas condições também estão relacionadas a ocorrências de dipolos de TSM no Atlântico Tropical. Anomalias positivas (negativas) de TSM nos setores norte (sul) dessa bacia, na maior parte das vezes, também ocorreram em anos de El Niño, características contrárias foram observadas em anos de La Niña (ALVES, 2002).

A previsão de vazões com antecedência de uma ou duas estações de para a região Amazônica foi realizada por Uvo *et al.* (2000), com o uso de técnicas de regressão, através de redes Neurais, utilizando as TSMs no Pacífico equatorial o Atlântico Tropical para o período de 1946-1992 como variáveis preditoras. Os resultados mostraram correlações de 0,35 e 0,76 entre observado e previsto das vazões em nove localidades. Estes resultados foram melhorados com a utilização de um modelo de regressão linear canônico implantado por Uvo e Graham (1998). Galvão *et al.* (1999) e Souza Filho e Lall (2003) mostraram resultados promissores para a previsão de vazões anuais para reservatórios hídricos no Estado do Ceará, utilizando informações climáticas.

Cardoso (2003) mostrou que as variáveis climáticas que tem influência nas chuvas do Ceará podem ser utilizadas para prever a afluência de água em reservatórios hídricos do Estado. Conseqüentemente, essa informação pode melhorar a operacionalização da oferta e demanda hídrica associada a esses mananciais.

No estado atual da arte, entre a conexão das previsões meteorológica e hidrológica, além desses estudos prognósticos estatísticos de médio e longo prazo, têm-se a oportunidade, com o acelerado avanço computacional, de se integrar os resultados

de modelagem numérica de escala global para a precipitação pluvial usando a técnica de redução de escala. Essa técnica consiste no chamado *downscaling* – aninhamento de um modelo numérico regional em um modelo numérico global, cujos resultados prognosticam a chuva na escala de uma bacia hidrológica e pode ser utilizada por um modelo hidrológico do tipo chuva-vazão (LEUNG *et al.*, 1999) e ou relacionar diretamente a chuva prognosticada na bacia com a vazão afluente a um determinado reservatório.

Com esse mesmo avanço computacional, tem-se hoje a possibilidade de se investigar o clima futuro de várias regiões do globo e seus impactos nos recursos hídricos. Resultados de simulação, numérica para os próximos 50, encontram-se disponíveis em alguns centros mundiais de Meteorologia inferindo-se o possível aumento dos gases do efeito estufa, cujas parametrizações são colocada nas rotinas do balanço de radiação dos modelos globais (resolução superior a 250 quilômetros).

Estudos, como o realizado por Dibike e Coulibaly (2005) abordaram a cerca de trocas climáticas associadas a mudanças climáticas globais e seus impactos em bacias hidrográficas. Nesse estudo, os autores comparam os resultados de vários cenários associados a mudanças climáticas globais (IPCC, 2001) e seus impactos na bacia hidrográfica de *Saguenay* no Canadá, comparando vários métodos de *downscaling* e diferentes modelos hidrológicos. Para a América do Sul e o Brasil, especificamente, vários estudos têm sido executados sobre essa questão de possíveis impactos de mudanças climáticas globais no clima, recursos hídricos, agricultura, têm sido executados (QUERNER *et al.*, 2005; SEOANE, 2005; ARAÚJO *et al.*, 2005).

4 CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS DAS CHUVAS NO CEARÁ E DOS PRINCIPAIS SISTEMAS ATMOSFÉRICOS

O Estado do Ceará está localizado no setor norte do Nordeste, aproximadamente entre as coordenadas de 2,5°S e 10°S e 34°W e 42°W e tem como característica pluviométrica dois períodos distintos ao longo do ano. Um chuvoso, não levando em consideração as variabilidades interanuais, que se estende de fevereiro a maio, e um período seco compreendendo os meses de junho a outubro. Um outro período intermediário, chamado de pré-estação chuvosa, começa em média em novembro e estendendo-se até janeiro.

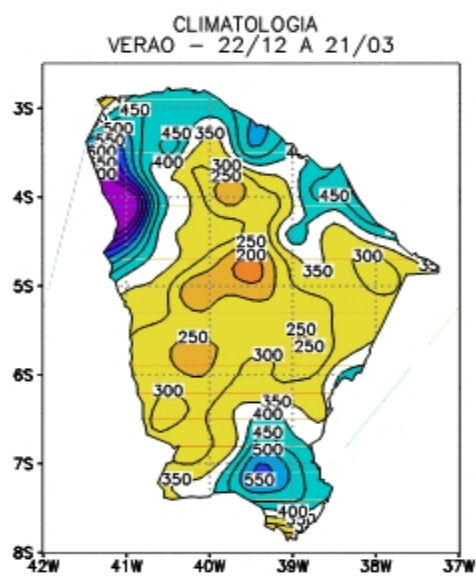
A figura 1 apresenta a distribuição espacial da precipitação nas estações do ano (verão, inverno, outono e primavera) e as suas contribuições, em termos de desvios, para o total anual de chuvas. Pode-se observar que os maiores totais de chuvas concentram-se nas estações de verão e outono austrais, enquanto os menores são observados durante as estações de inverno e primavera. Ao longo de todo o Estado as maiores contribuições, em relação ao total anual, também se concentram nestas duas estações, principalmente na estação de outono (> 95% do total anual).

A evolução da ocorrência de chuvas ao longo do Estado se dá de forma gradativa devido à ação dos diferentes sistemas atmosféricos atuantes nas diversas áreas do mesmo.

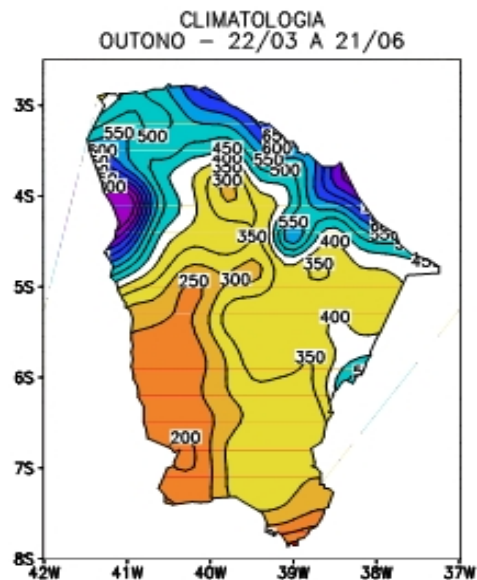
Na pré-estação (período de novembro a janeiro), as chuvas preferencialmente banham a região centro sul do Estado, principalmente o Cariri, e a Região da Serra da Ibiapaba. Estas chuvas são provocadas pela instabilidade atmosférica gerada pela presença de frentes frias localizadas no setor centro sul do NEB que favorece a formação da atividade convectiva. A figura 2b ilustra a atuação e atividade convectiva associada a uma Frente Fria em atuação sobre as proximidades do NEB. Entretanto, em outras áreas do Estado pode haver chuvas abundantes devido à atuação de Vórtices Ciclônicos de Ar Superior (VCAS), que induzem a formação de nuvens causando chuvas fortes até nas áreas mais áridas do Estado (Sertão Central e Região dos Inhamuns – área de localização do posto fluviométrico de Iguatu).

Um exemplo típico da forte atuação destes sistemas foi o mês de janeiro/98 (Figura 2), com chuvas abundantes em todo o Estado sendo geradas pela presença de VCAS que foram bastante frequentes ao longo deste mês sobre o NEB. Em alguns casos, em janeiro esses sistemas se associam a incursão para posições próximas à costa

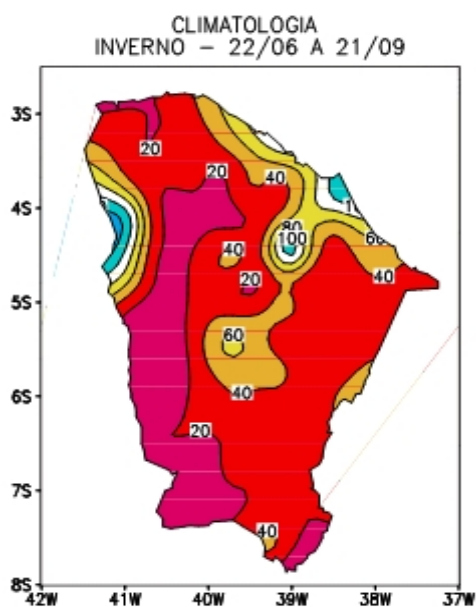
do Estado do Ceará da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), principal sistema causador de chuvas sobre o setor norte do NEB no período de fevereiro a maio, causando chuvas abundantes, como a observada em janeiro de 2004 (ALVES *et al.*, 2006).



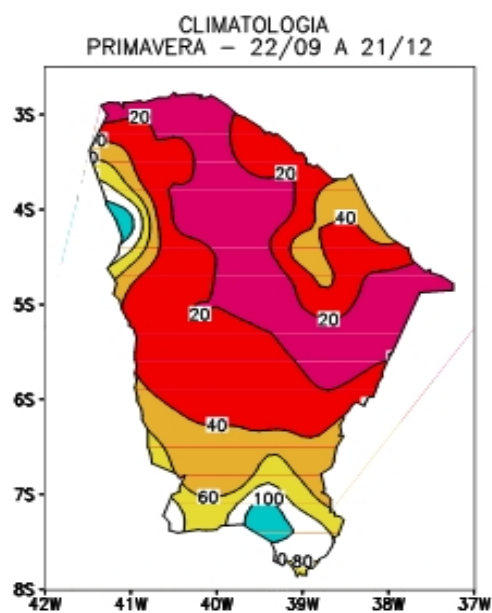
1a)



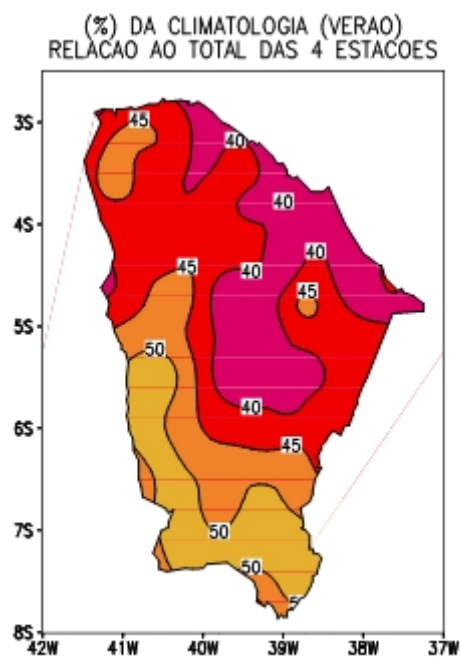
1b)



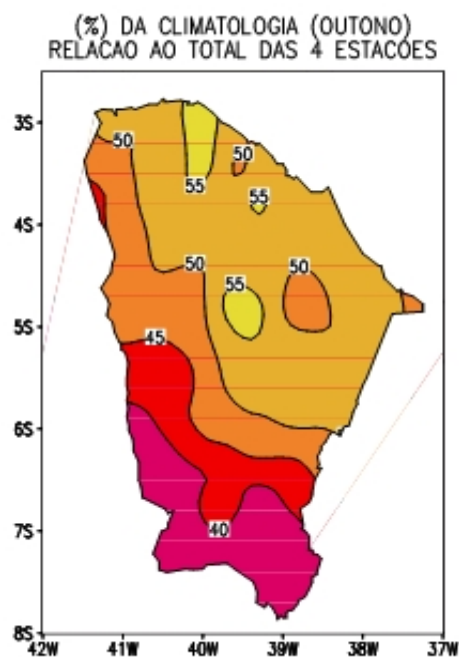
1c)



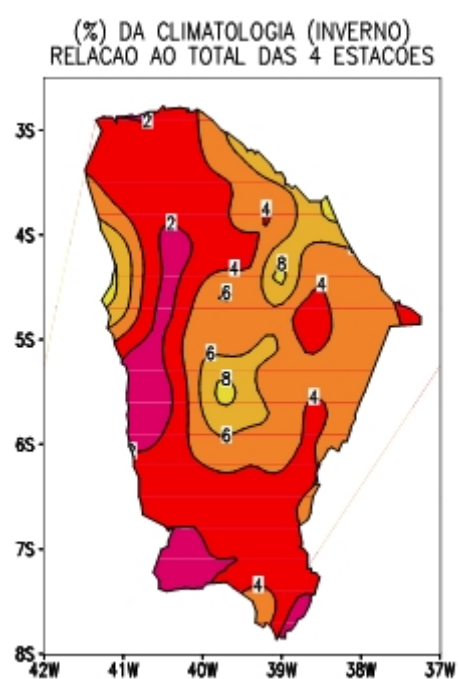
1d)



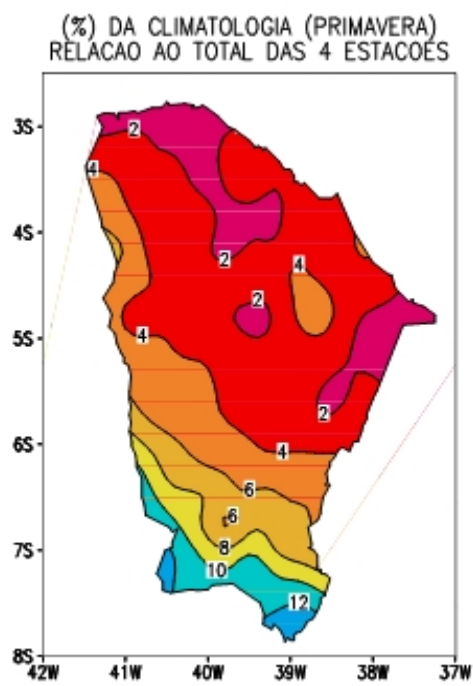
1e)



1f)



1g)

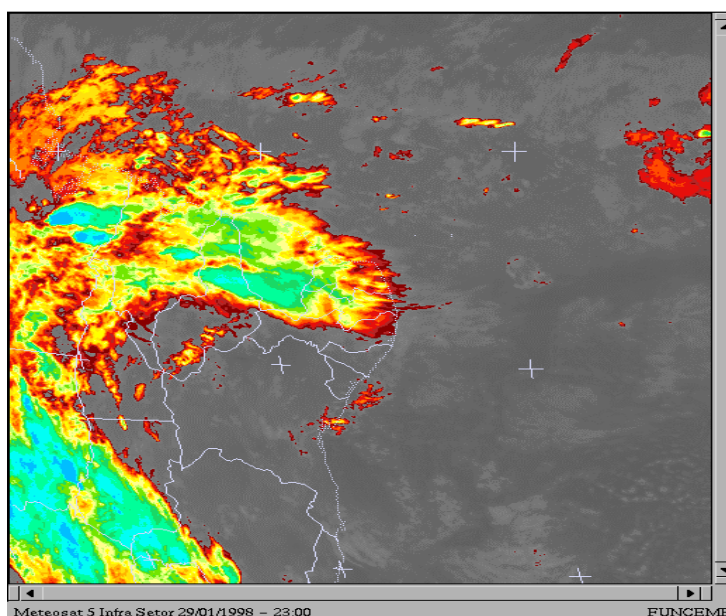


1h)

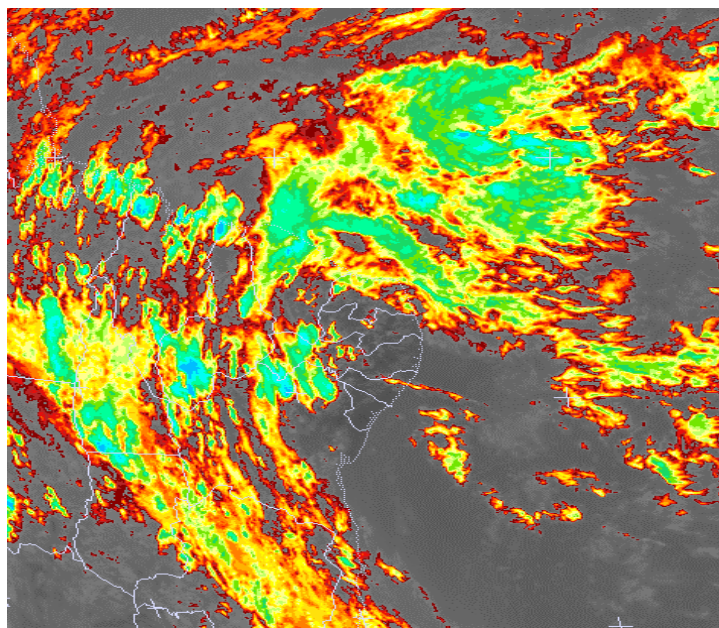
FIGURA 1 - Distribuição espacial (mm) e contribuição (%) em relação ao total anual das estações do ano para o Estado do Ceará. 1a) precipitação de verão; 1b) precipitação de outono, 1c) precipitação de inverno; 1d) precipitação de primavera; 1e) (%) contribuição de verão; 1f) (%) contribuição de outono; 1g) (%) contribuição de inverno e 1h) (%) contribuição de primavera.

A partir de fevereiro, considerando-se a influência de grande escala da atmosfera e dos oceanos que modulam a intensidade das chuvas no setor do NEB, a distribuição da precipitação ao longo do Estado ocorre de forma mais homogênea. A partir deste mês e principalmente nos meses de março e abril, a ZCIT passa atuar de forma mais freqüente sobre/nas proximidades do setor norte do NEB. Relacionado às diferenças na intensidade de precipitação nas diversas áreas do Estado, alguns aspectos fisiográficos e de localização de suas regiões se constituem os principais fatores responsáveis. No litoral e regiões adjacentes a precipitação é incrementada pela presença da circulação de brisa (tanto terrestre como marítima) e pela grande quantidade de umidade disponível na atmosfera advectada do oceano.

A topografia é outro aspecto físico que contribui significativamente para um aumento da quantidade de chuva em determinada região. Observa-se na figura 1, mostrada anteriormente, em particular nas estações mais chuvosas (verão e outono), que as áreas mais elevadas no Estado do Ceará recebem mais chuvas. Dentre essas áreas cita-se a Serra da Ibiapaba, setor noroeste divisa com o Estado do Piauí, Chapada do Araripe, setor sul do Estado na Região do Cariri, e Maciço de Baturité ao sul de Fortaleza. Estas áreas que apresentam índices de chuvas mais elevados ao longo do Estado, tendo seus totais bem superiores às áreas do Sertão, onde a topografia é mais plana.



2a)



2b)

FIGURA 2 - Imagens do Satélite Meteosat VI, canal infravermelho, com realce de cores, sobre a Região Nordeste do Brasil. 2a) para dia 10/01/98, às 15:00hs, mostrando uma frente fria sobre a Região Sudeste associada a um VCAS sobre a Região Nordeste, causando intensa nebulosidade na parte norte da Região e céu claro no setor central e sul da mesma. 2b) Mesma situação da figura 2a, para o dia 29/01/98 às 23:00 hs, porém a frente posicionada um pouco mais ao norte ocasionando a formação de áreas de instabilidade em grande parte do NEB e Oceano Atlântico adjacente. O gradiente de cores nas imagens do cinza ao verde indica uma menor a maior intensidade de nuvens, associadas as nuvens estratificadas (preto-cinza e vermelho) a convecção profunda (verde-azul).

Um outro sistema atmosférico importante na causa da variabilidade de chuva no NEB e no estado do Ceará é a chamada Oscilação Trinta a Sessenta Dias ou Oscilação Madden-Julian. Esta oscilação é responsável por variações nas condições da atmosfera ao longo do globo terrestre, oscilando em condições favoráveis a desfavoráveis à ocorrência de precipitação em uma escala temporal em torno de trinta a sessenta dias uma determinada região. A atuação desta oscilação no NEB é mais ativa no período de primavera verão (setembro a março) do hemisfério sul.

5 A BACIA HIDROGRÁFICA DO POSTO FLUVIOMÉTRICO DE IGUATU

A bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu localiza-se no setor sudeste do Estado do Ceará (figura 3) apresentando as características abaixo.

Vazão Média Anual (m^3/s): 24,45

Declividade (m/km): 1,73

Precipitação Média Anual (mm): 694,12

Comprimento do Talvegue - Comprimento total do rio que drena maior área no interior da bacia (km): 264,00

Área de Contribuição (km^2): 20608,89

Comprimento Total de Drenagem - Soma total da malha hidrográfica da bacia (km): 14.309,12

Densidade de Drenagem - Razão entre o comprimento total da drenagem e a área de contribuição do posto fluviométrico (km^{-1}): 0,69

Capacidade de Armazenamento do Solo (mm): 69,88

Curve Number Médio: 69,70 (valor associado ao escoamento superficial da bacia).

Índice de Compacidade da Bacia (1,58): Razão entre o perímetro da bacia e a raiz quadrada da área da bacia, onde o resultado é multiplicado pelo fator teórico igual a 0,282.

Direção dominante do rio principal: 4,00 (noroeste para sudeste). Segue uma numeração de 1 a 8, com sentido sul-norte igual a 1, modificando a numeração a cada 45°.

Parcela da Bacia no Cristalino (%): 81,58

Área de Lagos/Área da Bacia (m^2/km^2): 1.436,62

Detalhes de como foram calculados esses parâmetros acima podem ser encontrado no estudo de Alexandre (2005).

As figuras 4, 5, 6 e 7 mostram, com detalhes, os municípios que compõem a bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu, a altimetria, as características da vegetação e rede de drenagem da bacia e o uso do solo na mesma. A figura 4 mostra que 30 municípios fazem parte da bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu, estes se localizam no setor centro-sul do Estado. Na figura 5 é apresentado a vegetação na bacia e sua rede de drenagem. Pode-se observar nesta figura em grande parte da bacia uma vegetação classificada como floresta caducifólia espinhosa (caatinga espinhosa),

seguidas de espécies de caatingas arbustivas abertas, mais a norte, e arbustivas densas no extremo sudeste da bacia. Pequenas áreas classificadas como florestas caducifólias, Cerradões e Carrascos aparecem em áreas mais restritas, principalmente no sul e oeste da bacia. A rede de drenagem é bastante densa ao longo da bacia, concentrando-se em particular no sudoeste e centro-norte da bacia.

Na figura 6 é a altimetria é apresentada ao longo da bacia. São notáveis, baixas altitudes no setor sudeste da mesma, cotas inferiores a 250 m, onde localiza-se o seu exutório havendo um aumento desta cota nas direções central a oeste, norte/noroeste e sul da bacia cujos valores chegam a ultrapassar 800 m.

O uso do solo é mostrado na figura 7. A característica da bacia é bem rural, predominando áreas de cultivo agrícolas anuais (temporários e permanentes). No centro-norte vale destacar uma extensa área com vegetação de pasto, com reduzida vegetação, com o substrato cristalino estando bastante exposto. Área de vegetação natural quase já não existe ao longo da bacia.

Climatologicamente, a parte alta da bacia, setor sul do Estado recebe chuvas no mês de janeiro, principalmente proveniente da influência da incursão de frentes frias que se localizam no setor centro-norte do Nordeste. A partir de fevereiro as chuvas são provenientes da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), com maior intensidade nos meses de março e abril. A bacia sofre um longo período de estiagem com pouco aporte de água de julho a novembro.

A escolha desta bacia para o estudo em questão deveu-se ao fato de na mesma existirem séries longas de observações de precipitação (postos pluviométricos) e de vazão no posto fluviométrico de Iguatu. Em geral, estas séries começaram a ser observadas desde o início do século passado até o presente.

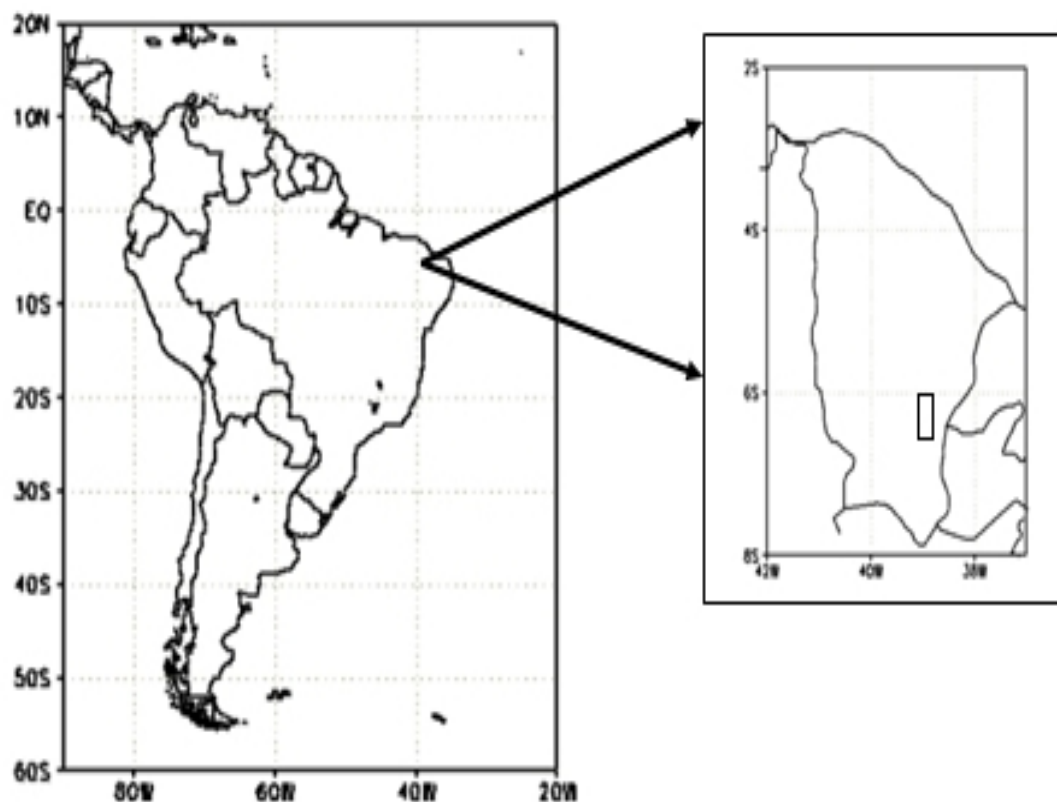


FIGURA 3 - Localização aproximada da bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu (retângulo no mapa do Ceará em detalhe).

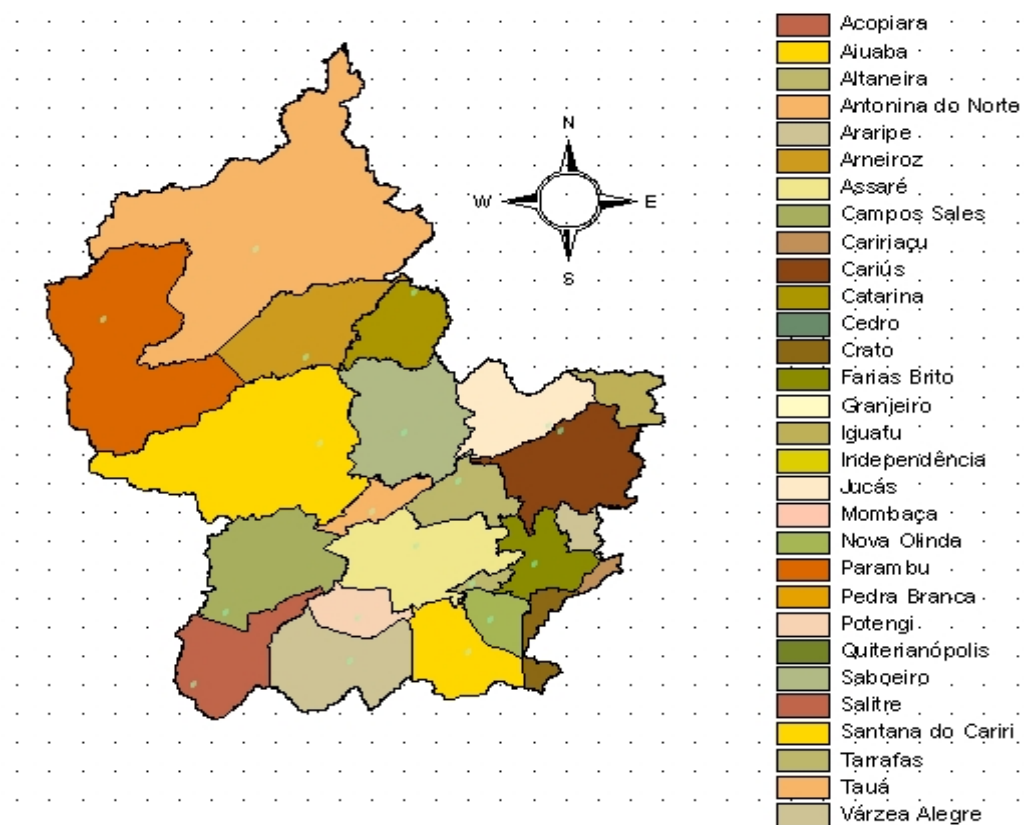


FIGURA 4 - Municípios de compõe a bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu.

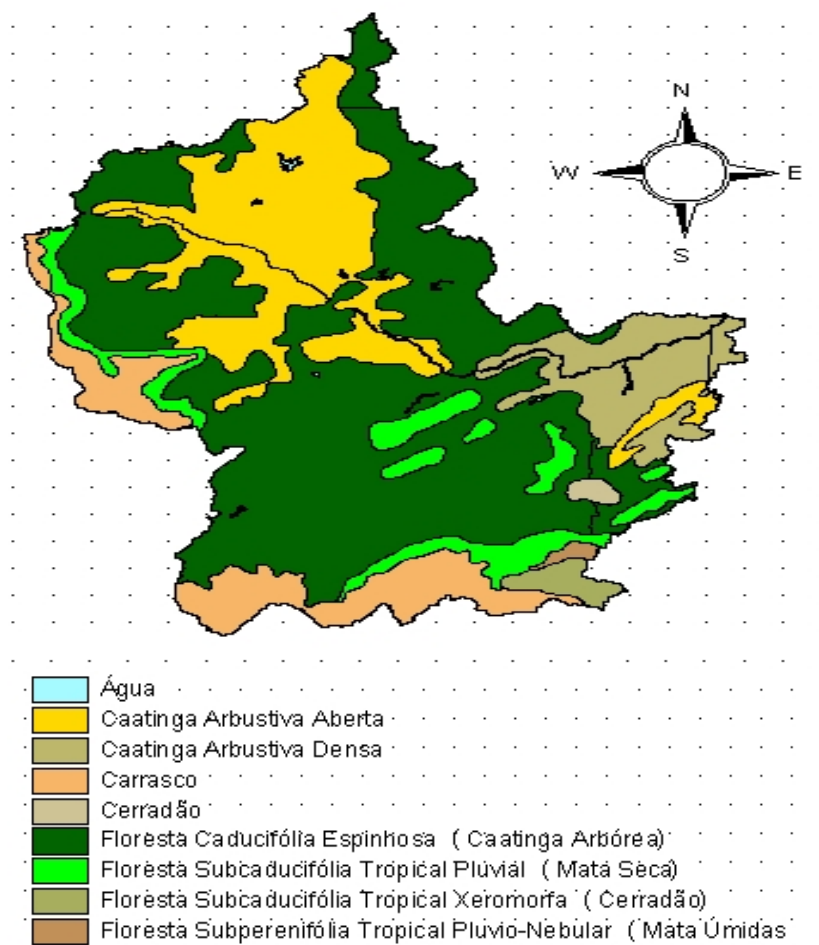


FIGURA 5 - Vegetação e rede de drenagem da bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu.

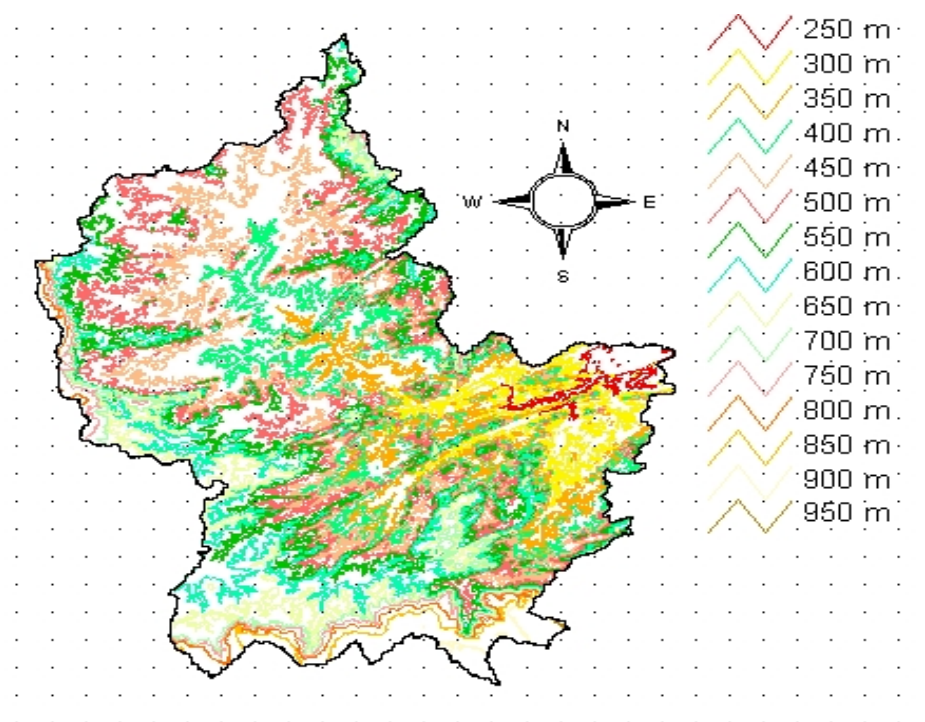


FIGURA 6 - Altimetria (m) da bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu.

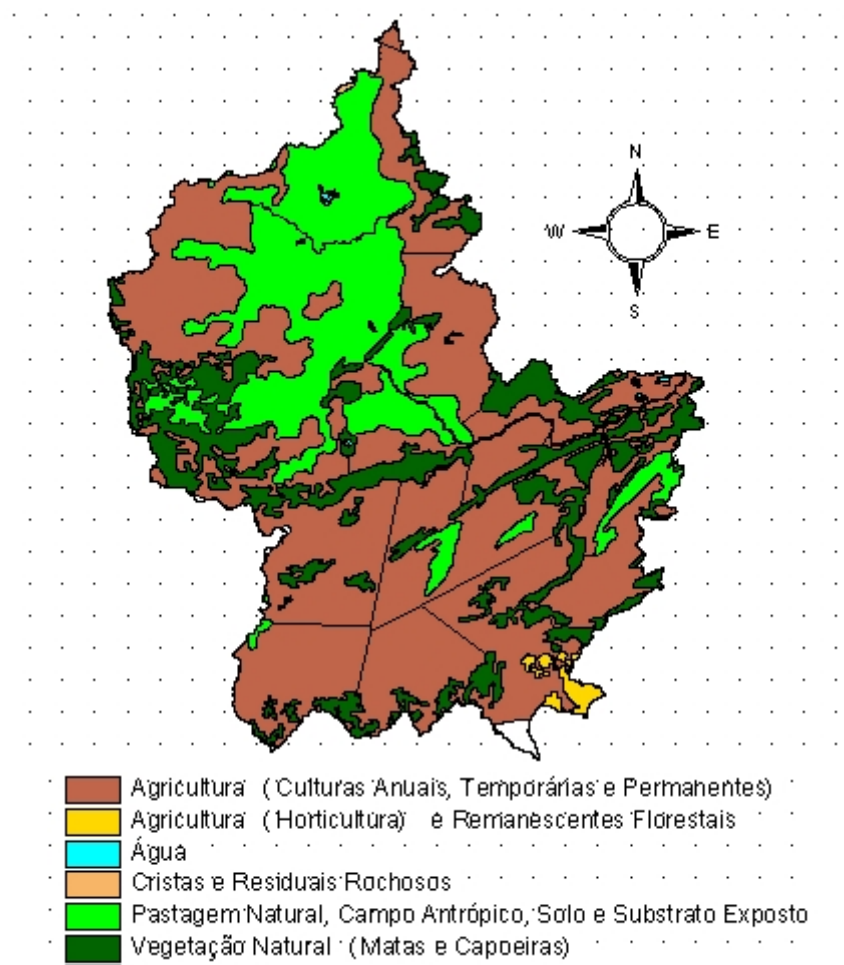


FIGURA 7 - Uso do solo na bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu.

A figura 8 mostra os valores médios (1971-2000) da precipitação pluviométrica e da vazão sobre a bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu. São apresentados apenas os seis primeiros meses do ano, pois no segundo semestre os valores dessas variáveis são muito baixos. Observa-se que as precipitações oscilam com valores em torno de 2 mm/dia em janeiro e junho a 4 mm/dia em abril.

As vazões afluentes são da ordem de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ a $20 \text{ m}^3/\text{s}$ em janeiro, fevereiro e março, passando para valores acima de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ a $120 \text{ m}^3/\text{s}$ em abril, maio e junho. Pode-se notar uma clara defasagem entre o pico das chuvas e o de vazões, o que pode ser explicado pelos efeitos da influência da pequena açudagem, umidade do solo e contribuição frática na bacia e outros fatores específicos da bacia. Esta defasagem entre os picos máximos é em torno de um mês.

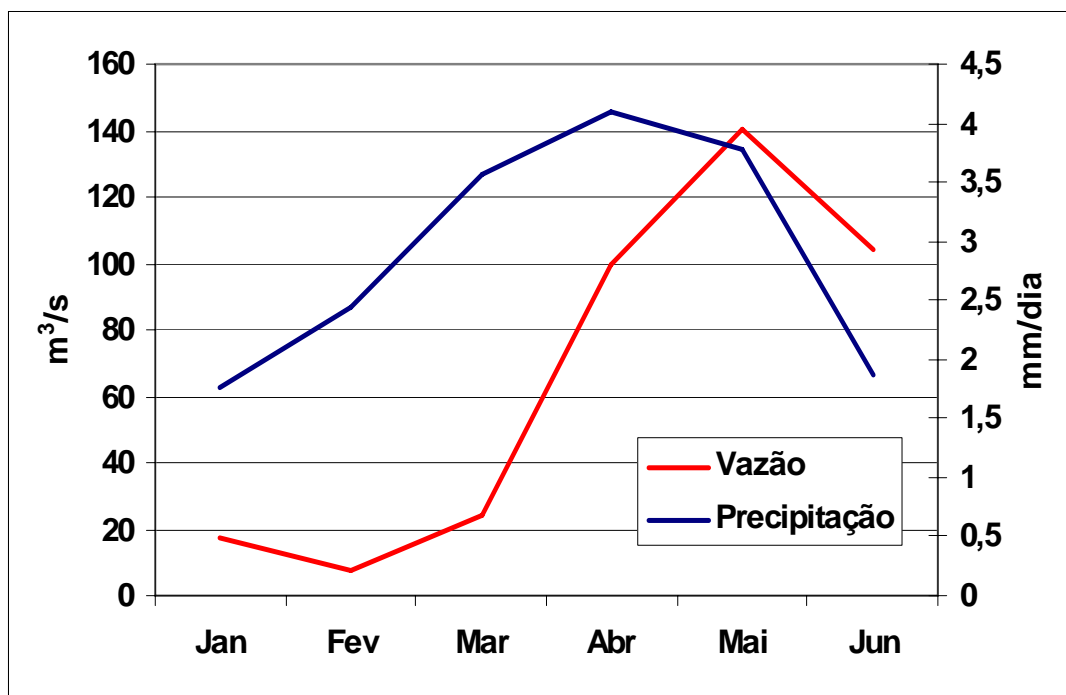


FIGURA 8 - Valores médios (1971-2000) da vazão (eixo da esquerda) e precipitação (eixo da direita) da bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu.

6 PRINCIPAIS CONCEITOS ABORDADOS NO ESTUDO

6.1 A modelagem oceânica da TSM

Os oceanos tropicais, devido à capacidade da água de armazenar calor, se constituem na grande fonte de energia e vapor d'água para a atmosfera. As suas variações térmicas, principalmente na região tropical são responsáveis por anomalias climáticas em grande parte do globo terrestre, sendo o NEB uma das mais afetadas por essas anomalias, sejam elas ocorrente nos oceanos Pacífico ou Atlântico Tropical.

Devido a características térmicas dos oceanos e sua pequena variabilidade sazonal, a TSM se constituiu na principal variável influenciadora do clima nas escalas sazonal (estações do ano), interanual e decadal (PHILANDER, 1991). Por isso, o seu uso como variável de contorno em modelagem climática é imprescindível para obtenção de um melhor desempenho dos resultados dessa modelagem.

No Pacífico, o monitoramento e a previsão de TSM são feitos desde meados dos anos 80 (Projeto *TOGA-TAO – Tropical Ocean Global Atmospheric – Tropical Atmospheric Ocean Buoys*). O forte evento climático de El Niño (TSMs anormalmente quentes no Pacífico Tropical leste junto a costa da América do Sul) observado entre os anos de 1982 e 1983, causou grandes prejuízos econômicos e sociais em várias áreas regiões da Ásia, Oceania, Américas e outras (PHILANDER, 1991). Essa variabilidade climática e seus impactos levaram os Estados Unidos, Japão, França e Austrália a implantarem um sistema de monitoramento das variáveis atmosféricas e oceânicas na região do Pacífico equatorial desde a região da Austrália e Indonésia até a costa oeste da América do Sul. Esse monitoramento impulsionou os estudos da variabilidade termodinâmica ocorrente no Pacífico Tropical e de suas influências remotas em várias áreas do globo.

Um dos importantes avanços, tendo como base o monitoramento no Pacífico Tropical, foi o surgimento dos primeiros Modelos Físico-Matemáticos (MFM) para prever a TSM. Em particular, grande ênfase foi dada à previsão dos eventos de El Niño. A primeira tentativa de previsão deste fenômeno foi feita para o evento de 1987 por Cane e Zebiak, 1985. Hoje vários centros mundiais de Meteorologia, Oceanografia e áreas afins rodam modelos MFM para prognosticar as características termodinâmicas no Pacífico Tropical com um alto grau de confiabilidade (CANE e ZEBIAK, 1985; BARNSTON e ROPELEWSKI, 1992).

Para a bacia do Oceano Atlântico Tropical, esses MFM para prever a característica termodinâmica, em particular a TSM, estão em fase de desenvolvimento com os dados coletados do Projeto PIRATA (SERVAIN *et al.*, 1998). Entretanto, principalmente nos últimos anos, modelagem numérica oceânica e estatístico-estocástica tem sido testada, porém os resultados não têm apresentado grande confiabilidade de previsão como ocorre no Pacífico Tropical (ZEBIAK, 1993; REPELLI e NOBRE, 2004; PENLAND e MATROSOVA, 1998; ANDREOLI e KAYANO, 2002, 2005).

Em função dessa baixa previsibilidade da TSM no Atlântico Tropical, e devido os MFM exigirem uma grande quantidade de dados e elevada capacidade computacional, uma outra tentativa de prever a TSM nesse oceano tem sido feita usando técnicas estatísticas. Repelli e Nobre (2004) desenvolveram um sistema de modelagem usando estatística multivariada denominada de Correlações Canônicas, tendo como campos preditores a própria variação de TSM no Atlântico e Pacífico Tropicais. Seus resultados mostraram melhor potencial de previsão para o setor norte do Atlântico Tropical. Para o setor sul dessa bacia, suas análises mostraram que a persistência da anomalia de TSM apresentou resultado equivalente àqueles obtidos em seus experimentos.

Penland e Matrosova (1998), usando uma outra técnica estatística denominada de Padrões de Oscilação Principal (POP), fizeram um estudo para prever TSM em algumas áreas do Atlântico Tropical. Seus resultados mostraram que a previsibilidade de TSM no Atlântico Tropical Norte, para períodos de alguns meses a um ano, aumenta quando os preditores são as anomalias de TSM da região tropical global, em vez de anomalias de TSM somente da Bacia do Atlântico. Como os resultados de Repelli e Nobre (2004), essa previsibilidade não foi observada sobre as regiões equatoriais e do Atlântico Tropical Sul.

Atualmente, vários centros internacionais de meteorologia se valem de prognósticos de anomalias de TSM e sua persistência nos oceanos (manter o seu valor para um determinado período a frente, em geral para o trimestre), como condição de contorno para rodar MCGAs que prognosticam, inúmeras variáveis hidrometeorológicas para todo o globo, com maior ênfase a precipitação pluviométrica e temperatura do ar (GODDARD *et al.*, 2003). Vale mencionar, que com o Projeto PIRATA em desenvolvimento no Atlântico Tropical (SERVAIN *et al.*, 1998), vários estudos de modelagem oceânica para o Atlântico Tropical, relacionado seus impactos

sobre o clima do NEB, tem sido desenvolvidos (BARREIRO *et al.*, 2004; GIANNINI *et al.*, 2004).

Os MCGAs em suas previsões globais fazem dois tipos de previsão trimestrais. Em um tipo usam TSMs previstas para o Oceano Pacífico, via modelos acoplados oceano-atmosfera e prognosticadas via métodos estatísticos para o Atlântico e demais oceanos a persistência, enquanto no segundo tipo esses modelos utilizam a persistência das TSMs em todos os oceanos para o referido período de previsão. Na FUNCEME não é executada nenhuma técnica de previsão de TSM operacionalmente, porém estas são usadas na previsão do *downscaling* e no monitoramento operacional.

6.2 Modelagem dinâmica da atmosfera e a técnica de *downscaling* na previsão de precipitação

A previsão das características futuras da atmosfera e seus possíveis efeitos sempre intrigaram a mente humana. *As ciências da terra, com é o caso do estudo da atmosfera terrestre, uma área da Meteorologia; está entre as ciências de Aristóteles* (LEMES e MOURA, 2002). *Vinte e três séculos depois de Aristóteles, a Meteorologia tem uma importância cada vez maior. Com base atual em conceitos complexos físico-matemáticos, ela engloba cada vez mais elementos sofisticados da computação. Esse profundo aparato serve para explicar o belo, às vezes destruidor, no ar nos mares, em uma escala global e local* (LEMES e MOURA, 2002).

Historicamente, segundo Silva Filho (2005), a primeira tentativa de se fazer uma previsão de tempo por física numérica foi feita por L. F. Richardson (Holton, 1979). Seu modelo tridimensional de duas camadas, em pontos discretos, tentou fazer previsão de tempo (para seis horas) usando diferenças finitas para resolver as equações que regem os movimentos atmosféricos. Em sua tentativa, os cálculos não usaram nenhuma ferramenta computacional. Sua experiência ficou registrada no seu livro *Weather Prediction by Numerical Process*, publicado em 1922. Naquela ocasião, Richardson estimou a necessidade de 64.000 pessoas, cada uma usando uma máquina de calcular mecânica antiga, para acompanhar o comportamento da atmosfera global, com propagação no tempo e espaço da variabilidade de suas variáveis. É claro que devido a relação causa-efeito dos fenômenos atmosféricos, em relação à escala de tempo, quando sua previsão terminasse já não teria nenhuma utilidade.

Entretanto, o seu pioneirismo resultou mais tarde, com o avanço tecnológico, que a estimativa futura do estado atmosférico se tornasse uma realidade. N.

A. Philips (1956) fez a primeira previsão da circulação geral da atmosfera, após algumas inclusões sugeridas por J. G. Charney em 1948 ao modelo de Richardson. Entretanto, Charney *et al.* (1950) fez o primeiro modelo numérico de integração da equação da vorticidade barotrópica.

Hoje, a modelagem numérica da atmosfera avança a passos largos, com a fabricação de computadores mais velozes, implementando em seus códigos cada vez mais processos físicos e dados para tentar melhorar o seu desempenho, tanto na previsão de tempo (escala de tempo de horas até 15 dias), quanto de clima (acima de um mês). O uso dessas previsões, tanto de tempo, como de clima, tem interessado consideravelmente os cientistas e usuários em geral, e com a melhoria da previsão nos últimos anos, muitas das calamidades, perdas de vidas e financeiras, provocadas por anomalias climáticas e eventos extremos de tempo (tempestades, furacões, etc), tem sido amenizadas (SHUKLA *et al.*, 2000).

Basicamente, são utilizados dois tipos de modelos na modelagem atmosférica. Os MCGAs, que são modelos globais (resolução espacial igual ou acima de 250 quilômetros), e os modelos regionais (MRs) que são modelos de área limitada, com resolução variável da ordem de dezenas de quilômetros). Esses MRs, por serem de área limitada, também incorporam, características mais refinadas da região de interesse como topografia, vegetação, solo, etc. Além da resolução de processos físicos, por exemplo balanço de radiação em nuvens, micro física de nuvens, etc., que nos MCGAs são parametrizados. No que se refere ao desempenho, é esperado que os MRs tenham melhor desempenho para uma dada região do que os MCGAs.

Os modelos dinâmicos (MCGAs ou os MRs) tem como suporte um conjunto de equações que governam o movimento atmosférico de massa e energia que e tem como base as seguintes equações:

Conservação de massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left[\frac{\partial}{\partial x} \rho u + \frac{\partial}{\partial y} \rho v + \frac{\partial}{\partial z} \rho w \right] \quad (1)$$

Conservação de calor:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left[u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + S_{\theta} \quad (2)$$

Conservação de movimento:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -V \cdot \nabla V - \frac{1}{\rho} \nabla p - gk - 2\Omega \times V \quad (3)$$

Conservação de água:

$$\frac{\partial q_n}{\partial t} = -V \cdot \nabla q_n + S_{q_n}, \quad n = 1, 2, 3 \quad (4)$$

Conservação de outros materiais gasosos e aerossóis:

$$\frac{\partial \chi_m}{\partial t} = -V \cdot \nabla \chi_m + S_{\chi_m} \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

Equação dos gases:

$$P = \rho R^* T \quad (6)$$

Onde:

ρ – Densidade do ar (kg/m³);

θ – Temperatura potencial (°K);

u, v, w – Componentes da velocidade (zonal, meridional e vertical em m/s);

g – Constante gravitacional (m/s²);

P – Pressão (hPa);

q – Umidade específica (k/kg);

χ – Outros gases ou aerossóis;

R^* – Constante específica dos gases.

Os demais símbolos são mais comuns e usualmente entendidos e conhecidos. A demonstração de como chegar às equações acima não foi mostrada, por que não se faz necessário na abordagem do estudo, mas pode ser encontrada em Holton (1979).

Tanto os MCGAs como os MRs são alimentados, o que se chama de condição de contorno inferior, com a TSM dos oceanos. Inúmeros artigos na literatura especializada têm mostrado que a variabilidade climática no NEB, principalmente a distribuição de chuva, é primariamente controlada pelas anomalias de TSM dos oceanos Pacífico e Atlântico Tropicais (MOURA e SHUKLA, 1981; NOBRE e SHUKLA, 1996; BARREIRO *et al.* 2004, entre outros).

Nos últimos anos, uma nova técnica tem sido testada com resultados promissores para reduzir a escala da informação climática. Essa técnica, chamada de *downscaling* dinâmico, tem como base o aninhamento dos resultados de uma modelagem de grande escala servindo de entrada para alimentar um modelo regional de

área limitada, com uma resolução da ordem de dezenas de quilômetros (DICKINSON E ERRICO, 1989; GIORGI e BATES, 1989). Este conceito é também de economicidade computacional, pois o ideal seria rodar MCGAs com as características dos MRs, porém ainda não é viável.

Exemplos de estudo dessa técnica foram feitos para algumas regiões do globo, para a África (SUN e GRAHAM, 2001), Região de Monções Asiáticas (JI e VERNEKAR, 1997) e Nordeste do Brasil, região semi-árida, (NOBRE *et al.*, 2001, SUN *et al.*, 2005, 2006) e para América do Sul (CHOU *et al.*, 2000). Áreas, em geral, onde a modelagem numérica de grande escala apresentou uma melhor capacidade de previsão sazonal. Os resultados desses estudos revelaram que a técnica de *downscaling*, nessas áreas, foi capaz de capturar a assinatura da distribuição espacial e temporal da precipitação e o padrão de circulação atmosférica observados, cita-se caso das Monções Asiática (JI e VERNEKAR, 1997). Uma das vantagens do uso de modelos regionais é que suas grades incorporam uma alta resolução de topografia, não implícita na modelagem de grande escala, e representar melhor os efeitos da orografia na distribuição de chuva intra-regional da área modelada (GIORGI, 1990).

Para a América do Sul, ainda há poucos estudos usando essa técnica. Mais especificamente para a Região Nordeste do Brasil, Nobre *et al.* (2001) fizeram um estudo para a previsão sazonal de precipitação pluvial com um Modelo Regional Espectral (MRE), desenvolvido no *National Centers for Environmental Prediction-National Centers Atmospheric Research - NCEP/NCAR*, aninhado a um MCGA (*ECHAM3.6*), com três diferentes condições iniciais para o período de fevereiro a maio de 1999. As previsões foram feitas utilizando-se duas grades para o MRE, uma de oitenta quilômetros e outra menor de vinte quilômetros, sendo que os resultados prognosticados na grade de oitenta foram usados como dados de entrada a cada seis horas para a grade de vinte quilômetros. Em seus resultados o modelo regional com oitenta quilômetros de resolução obteve melhor desempenho do que o modelo de grande escala reduzindo seus erros sazonais para uma área sobre o NEB.

Essa característica também foi observada quando se comparou o resultado obtido com oitenta quilômetros em relação ao de vinte quilômetros. Com a resolução de vinte quilômetros, o MR mostrou um incremento da chuva nas áreas de topografia mais elevadas, não consistentes com a realidade, indicando possíveis problemas na parametrização da convecção utilizada. Outro resultado interessante foi uma melhor

previsão da posição e largura da ZCIT sobre o Atlântico Tropical feita pelo MRE de oitenta quilômetros em relação ao MCGA.

Nobre *et al.* (2001) mostraram também que os resultados do MRE com oitenta quilômetros apresentam a possibilidade da previsão da frequência de distribuição de dias secos (veranicos) e chuvosos dentro da quadra chuvosa do setor norte do Nordeste (período de fevereiro a maio). Outro estudo sobre estimativa de balanço de água no solo para a região semi-árida do Nordeste usando um MRE foi executado por Böhm *et al.* (1998). Druyan *et al.* (2002) também realizaram um estudo de *downscaling* para março, abril e maio de previsão de clima sazonal com ênfase a área do território brasileiro.

Os resultados têm mostrado que tanto os MCGAs, como os MRs, apresentam viés (*bias*), climatologias com valores diferentes dos observados. Várias técnicas podem ser usadas para corrigir esses resultados e serão explicadas na seção de metodologia (WILKS, 1995 e TUCCI *et al.*, 2002). Alves *et al.* (2003, 2005) também analisaram o desempenho da técnica de *downscaling* dinâmico para o setor norte do NEB.

As figuras 9, 10 mostram como a técnica de *downscaling* pode melhorar os resultados do MCGA. A figura 9 mostra uma comparação entre a simulação feita pelo modelo global *ECHAM4.5* e o MR (aninhado no *ECHAM4.5* via *downscaling* dinâmico (resolução espacial de sessenta quilômetros para precipitação no setor norte do NEB) dado pelo coeficiente correlação entre a precipitação simulada e a observada para o período de fevereiro a maio (1971-2000). Nota-se que em grande parte do setor norte do NEB a correlação entre os valores simulados de precipitação pelos modelos *ECHAM4.5* e o MR e a precipitação observada são similares, exceto sobre o Ceará e parte dos estados da Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte, onde os valores de r para o MR são superiores a 0,7 e mesmo, em algumas áreas isoladas, superiores a 0,8 (figura 9).

A figura 10 mostra a chance de acerto da simulação do *ECHAM4.5* e do MR para 3 categorias, Seco, Normal e Chuvoso e cinco categorias (Muito Seco, Seco, Normal, Chuvoso e Muito Chuvoso). Esta chance de acerto foi definida pelas categorias de tercis tanto observada como modeladas nas três categorias seguindo os limites definidos em Xavier *et al.* (2000), sendo considerado um acerto quando o valor dos totais de precipitação observada e simulada para o período de fevereiro a maio esteve inserido em uma das categorias. Pode-se observar por essas figuras que o MR conseguiu

simular tanto nas 3 como nas 5 categorias um maior número de anos no período entre 1971-2000. Ressalta-se que essa chance foi comparada a climatologia de 30 anos de ambos os modelos e não com a climatologia dos dados observados. Nota-se para três categorias que o MR conseguiu simular a categoria em mais de 50% e em algumas áreas acima de 60% dos anos, enquanto para 5 categorias a chance de acertar é menor da ordem de 30% a 40%, porém ainda maior do que a simulação do *ECHAM4.5*.

Complementando os MCGAs e os MRs, ainda se usa extensivamente os modelos estatísticos que tentam prever os estados de uma ou mais variáveis atmosféricas, tendo como base relações amostrais entre essas variáveis, que guardam algum sinal físico entre as mesmas. Pelo baixo custo computacional que esses modelos estatísticos exigem, e a qualidade dos resultados obtidos pelos modelos dinâmicos, no aspecto operacional o uso destes ainda tem sido uma alternativa viável para previsão de precipitação e vazão (GALVÃO, 1999).

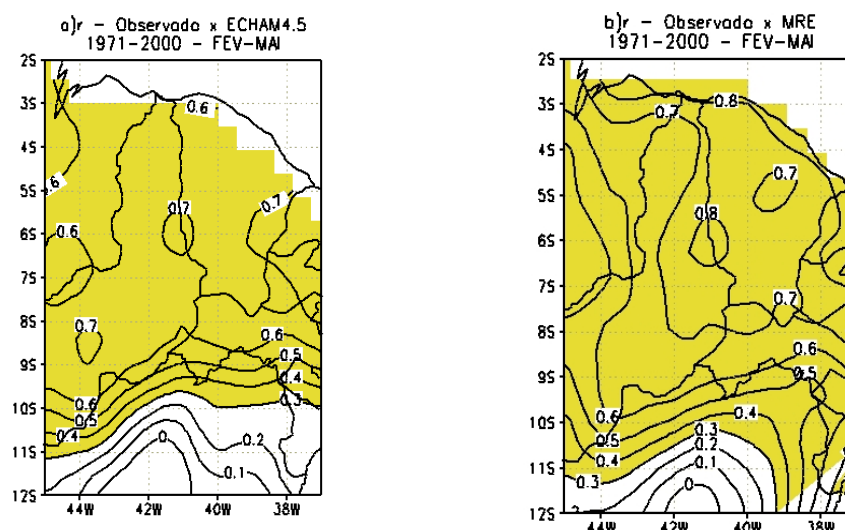


FIGURA 9 - Coeficiente de correlação entre a precipitação observada e simulada (1971-2000) para o setor norte do NEB. a) Observado x *ECHAM4.5* e b) observado x MR. As áreas hachuradas indicam significância estatística de 95% segundo teste t Student.

Fonte: Alves *et al.* 2005.

Como esse estudo trata do uso de resultados de estimativa de precipitação de MRs e *downscaling* com objetivo de estimativa de vazões, ressalta-se que mesmo no caso dos MRs e do *downscaling*, onde a escala espacial é mais refinada, ainda há uma diferença de várias ordens de grandeza entre as escalas usadas para resolver os processos físicos atmosféricos e a usada para resolver os processos hidrológicos (SILVA FILHO, 2005). A tentativa de se reduzir esse problema é com o uso do

downscaling estatístico, que objetiva trazer as informações dos MCGAs e MRs para a escala dos modelos hidrológicos. Vários estudos têm mostrado os conceitos, as vantagens e desvantagens das inúmeras técnicas de *downscaling* estatístico, entre estes cita-se: von Storch, 1995; Hewitson e Crane, 1996; Wilby e Wigley, 1997. Vale lembrar o uso de métodos estatístico-estocásticos usados na redução de escala em previsão sazonal de precipitação no NEB mostrados em Hastenrath e Greischar, 2003; Ward e Folland, 1991; Repelli *et al.*, 1996; Azevedo *et al.* 1998; Sansigolo, 1999 e Xavier *et al.* 2000.

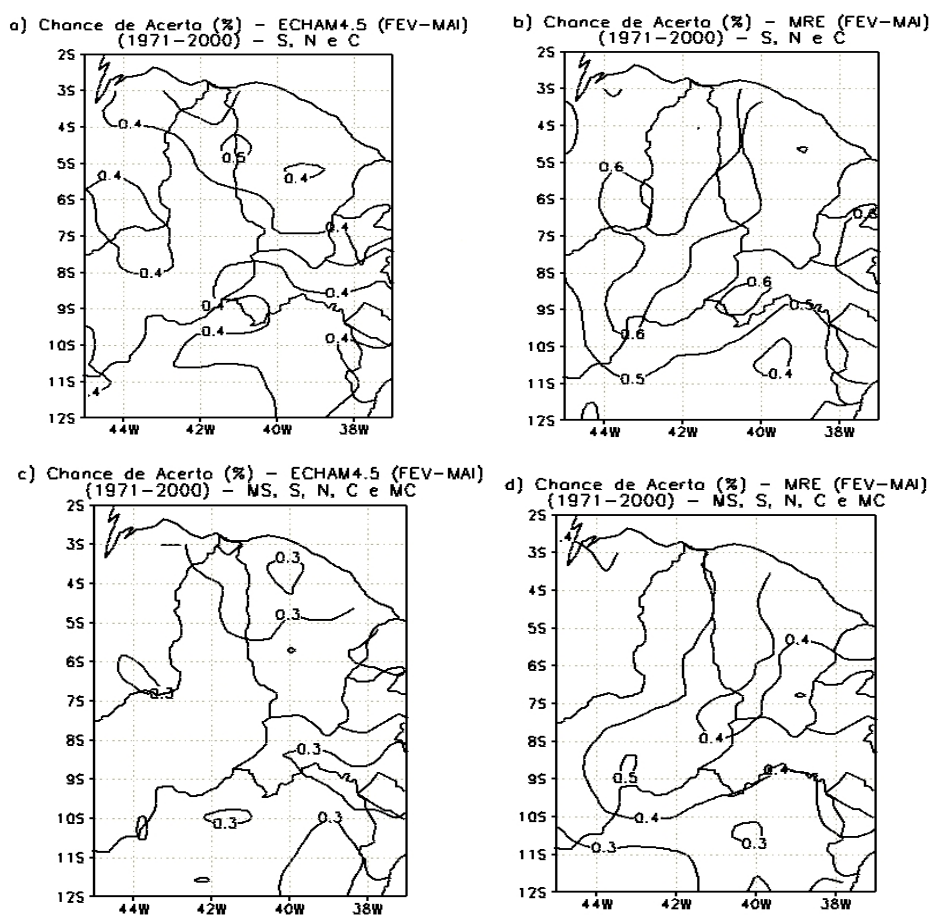


FIGURA 10 - Chance de acerto (%) em 3 categorias (Seco-S, Normal-N e Chuvoso-C) ou 5 categorias (Muito Seco-MS, Seco-S, Normal-N, Chuvoso-C e Muito Chuvoso-MC) de percentis de precipitação para o setor norte do NEB. a) Para 3 categorias ECHAM4.5, b) Para 3 categorias MR, c) para 5 categorias ECHAM4.5 e d) para 5 categorias MR.

Fonte: Alves *et al.*, 2005.

6.3 Técnicas estatístico-estocásticas usadas na previsão de vazão

No estado da arte do uso como subsídio a previsões hidrológicas as chamadas técnicas empíricas (estatísticas ou estocásticas) têm tido grande utilidade pela facilidade de aplicação. Entre estas técnicas estão aquelas que usam a própria observação da vazão no passado e os que relacionam essa variável com outras variáveis

preditoras. Os do segundo tipo utilizam relações físicas pré-definidas entre variáveis climáticas e o regime de aporte de água, ou a própria relação entre esse aporte para diversas defasagens no tempo, em uma dada bacia hidrográfica. Nessas técnicas filtra-se a complexa transformação chuva-vazão e faz-se por métodos empíricos uma estimativa direta da vazão através desses chamados preditores climáticos, ou em função da própria vazão observada no passado. Vários estudos nos últimos anos têm apresentado essas estimativas (UVO e GRAHAM, 1998; UVO *et al.*, 2000; SOUZA FILHO e LALL, 2003 e outros).

No aspecto matemático, as técnicas estatístico-estocásticas devem, sobretudo, estar baseadas em relações físico-observacionais entre as variáveis preditoras, e as que se quer prever, no caso específico de vazão em rios. Mesmo na maioria dos casos, com pouca física envolvida entre essas variáveis, para explicarem suas causas versus efeito, essas técnicas tem sido amplamente usadas, com bons resultados, e servem de alternativa aos modelos numéricos e também por serem de fácil aplicação e demandarem baixo custo computacional (SILVA FILHO, 2005).

Um dos primeiros modelos empíricos que se tem notícia foi utilizado pelo Sistema Hidrelétrico Brasileiro (SHB) desenvolvido por Matalas (1967), sendo descrito como um modelo auto-regressivo mensal com defasagem de um mês. Segundo Mêuser (1998), a função de autocorrelação representa uma medida da dependência linear entre o valor da variável aleatória no tempo t e o seu valor no tempo $t-k$, em que k é a defasagem. A autocorrelação nada mais é do que a autocovariância padronizada dividida pelo desvio padrão. Por exemplo, no caso de $k=5$, o grau de dependência linear da vazão de uma semana com a vazão ocorreu há cinco semanas pode ser medida por essa função.

Os modelos ou técnicas de previsão de séries temporais, no caso de vazões em rios, podem ser classificados em dois grupos básicos. Os modelos univariados, que se baseiam em uma única série temporal, e os multivariados, que tem a previsão em um dado local baseada em uma série temporal do próprio local de análise, ou em várias outras séries representativas do processo estocástico. A construção desses modelos tem como base o seguinte ciclo iterativo:

- Seleção do tipo de modelo: um grupo de modelos é selecionado para ser analisado;
- Identificação da forma do modelo: isto é geralmente feito com base na análise das funções de auto-correlação e auto-correlação parcial;

- Estimativa dos parâmetros do modelo: tendo-se como finalidade minimizar alguma função custo (por exemplo, erro médio quadrático);
- Verificação do modelo ajustado: para determinar se o modelo atende ao objetivo para qual foi desenvolvido.

6.4 Aspectos da modelagem hidrológica

Na literatura hidrológica, os relatos segundo Braga Jr. (1997), mencionados em Silva Filho (2005), os primórdios do uso de técnicas numéricas em aplicações de problemas hidrológicos, datam dos anos 60. Esse pioneirismo é atribuído ao grupo do *Harvard Water Resources Group-EUA*, cuja premissa era resolver problemas de água subterrânea, tentativa feita com programação linear. Com a fabricação dos computadores ao longo dos 50, novas técnicas surgiram com destaque especial à programação não linear (KUHNS e TUCKER, 1951).

A partir da década de 70 houve um grande avanço no uso de novas técnicas para tratarem principalmente de problemas relacionados a otimização-simulação de sistemas hídricos. Entre essas técnicas, cita-se a programação Dinâmica, Lógica Fuzzy e programação com o uso de algoritmos genéticos e Redes Neurais.

De acordo com Yeh (1982), a estrutura da modelagem hidrológica pode ser dividida em: variáveis de entrada (precipitações, vazões afluentes, evaporação), variáveis de estado (volumes armazenados nas várias partes do sistema), variáveis de saída (respostas da simulação), parâmetros de modelo (variáveis que caracterizam o sistema) e passo de tempo das simulações (determinado de acordo com as necessidades do estudo). Esses podem ser aleatórios, quando o sistema está sujeito a eventos aleatórios e determinísticos quando não há componente aleatório.

Yeh (1985) mostra que algumas vantagens e desvantagens do uso de métodos lineares em problemas de recursos hídricos. Segundo esse autor, uma das vantagens é a obtenção de um ótimo global relacionado ao problema estudado, e quando este se ajusta bem a problemas multidimensionais. Hoje há muitos pacotes no mercado que auxiliam na solução destes problemas. Quanto às desvantagens, Loucks *et al.*, 1981 e Vortruba (1988), citam a sua hipótese de tratamento linear da função objetivo, e representação do problema em um único estágio (estático), quando na maior parte na prática a questão é dinâmica, com o sistema variando no tempo.

Quanto à questão da programação não linear, a mesma é usada em praticamente todos os problemas de engenharia hídrica e ciências correlatas, pois grande

parte dos problemas apresenta características não lineares em termos de equacionamento. Sua grande desvantagem é o custo computacional, e necessidade de pacotes especializados, e a obtenção de soluções que podem não conter uma solução ótima (SIMONOVIC, 1992). Vários estudos sobre programação não linear têm sido executados nas mais diversas regiões do globo, várias análises a esse respeito são encontradas em Yeh, 1985 e Simonovic, 1992 e Wurbs (1996).

No Brasil, citam-se os artigos de Barbosa *et al.*, 2001, que estudaram o comportamento da operação de um sistema constituído de três reservatórios com múltiplos usos de água na Bacia do rio Capiberibe em Pernambuco. Andrade *et al.* (2001), que também na bacia do rio Capiberibe em Pernambuco, mostraram resultados para uma operação otimizada de um sistema hídrico formado por dois reservatórios em séries, Jucazinho e Carpina, e três perímetros de irrigação. E Curi e Curi (2001) que propuseram um modelo como ferramenta para maximizar os benefícios relacionados aos múltiplos usos da água em bacias hidrográficas.

Quanto às vantagens da programação dinâmica, ressalta-se a possibilidade de otimizar processos dinâmicos, retro-alimentação das normas de decisão, e a simulação do comportamento real do sistema com o uso de relações funcionais, tanto da função objetivo, quanto das restrições que são não lineares, convexas e até descontínuas (LABADIE, 1987 e SILVA FILHO, 2005). Nas desvantagens, incluem-se as dimensões exponenciais do sistema quando há um aumento das variáveis de estado, o que segundo a literatura de constitui na chamada “maldição da dimensionalidade” (VOTRUBA, 1988). Devido a esse problema, a programação dinâmica não apresenta bons resultados quando o sistema apresenta vários reservatórios, podendo ser corrigido com o uso conjunto de processos estocásticos (MAWER e THORN, 1974). Lima (2000) usou a programação dinâmica para avaliar o atual sistema de abastecimento de água em Fortaleza-Ce, concluindo que a técnica foi adequada aos seus propósitos.

Redes Neurais também têm sido empregadas em problemas de hidrologia. Redes Neurais tem como base modelos matemáticos que tentam imitar o cérebro humano (MÊUSER, 1998). Um dos problemas das redes neurais é que várias unidades de processamento de entrada do sistema estão conectadas a uma única unidade de saída através de pesos. Entretanto, várias aplicações têm sido feitas em recursos hídricos. Rashid e Wong, 1992 usaram essa técnica para a determinação de parâmetros em aquíferos, Karunanith *et al.* (1994) na previsão de vazões e Raman e Chandramouli (1996) na operação de barragens.

Definidos conceitualmente como conjuntos difusos ou nebulosos (*Fuzzy Sets*), a lógica *Fuzzy* foi proposta por Zadeh (1965), como uma generalização do conceito de teoria clássica dos conjuntos (GALVÃO, 1999). Na teoria clássica cada elemento tem uma pertinência μ que vale 0 ou 1, indicando pertinência ou não pertinência. O conjunto difuso possibilita vários graus de pertinência para elementos definidos geralmente no intervalo [0,1], podendo ser representado por uma função de pertinência μ (GALVÃO, 1999).

Segundo Galvão (1999), um conjunto difuso é formalmente definido como: $\tilde{A} = \{(x, \mu_{A(x)} / x \in X)\}$, onde X é o universo onde os elementos x estão definidos, e $\mu_{A(x)}$ é a função de pertinência de x em \tilde{A} . O intervalo de variação dos valores de $\mu_{A(x)}$ pode ser qualquer um, mas geralmente é empregada a faixa [0,1]. Nesta situação, o conjunto difuso é dito normalizado. As funções de pertinência dos conjuntos difusos podem assumir diversas formas, sendo a trapezoidal, ou um dos seus casos particulares, como a triangular a mais utilizada. Mais detalhes sobre a teoria dos conjuntos difusos pode ser encontrado em Mandani e Assilian (1975), Zadeh (1978), Sehresta e Duckstein (1985); Duckstein e Bogardi (1991), Kaufmman e Gupta (1991), Kosko (1992,1994); Cox (1994), Bardossy e Duckstein (1995); Sugeno (1995) e Zimmermann (1996) e Vieira (1996).

Técnicas de simulação, como, por exemplo, o uso do Método de Monte Carlo (utilizado para gerar séries sintéticas de variáveis nas características de uma distribuição de probabilidade que melhor represente esta variável) pode ser usado em problemas de modelagem hidrológica com mostrado por Studart e Campos (2001). Há situações que os problemas são mais complexos, múltiplos máximos e mínimos, e que não existe um algoritmo ótimo e eficiente para resolvê-los; nesses casos há possibilidade da utilização dos chamados algoritmos genéticos (LACERDA e CARVALHO, 1999).

6.5 Modelagem hidrológica utilizada na previsão de vazão

Devido às restrições de dados ao longo de uma bacia hidrográfica, uma grande parte dos estudos de simulação dos processos hidrológicos na prática para controle de cheias, e manejo dos recursos hídrico tem utilizado os chamados modelos concentrados (YANG, *et al.*, 2004). Esses modelos concentrados usam como variáveis de entrada dados médios sobre as características hidrológicas da bacia considerada, de

observações meteorológicas e outras, não usando diretamente a informação espacial sobre a bacia, tais como precipitação. Muitos desses estudos usaram o cálculo da precipitação média na área da bacia estudada, entretanto esse uso pode induzir incerteza adicional durante os processos de estimativa dessa precipitação, e também afetar a simulação dos processos hidrológicos (FINNERTY *et al.*, 1997; CRANMER *et al.*, 2001).

Outros tipos de modelos usados em simulações hidrológicas são os chamados modelos distribuídos. Esses modelos incorporam, em seus desenvolvimentos, informações da variabilidade espacial e temporal de características da bacia hidrológica (diferentes uso do solo, propriedades pedológicas dos diferentes tipos de solo e a topografia), bem como de variáveis meteorológicas de entrada nos mesmos. Alguns resultados mostram que esses modelos distribuídos podem simular com mais realidade os processo hidrológicos do que outros modelos (YANG *et al.*, 2000; YANG *et al.*, 2001a, 2003b).

Vários estudos, em particular para bacias hidrográficas localizadas em regiões fora dos trópicos, têm avaliado o desempenho de modelos distribuídos usando como dado de entrada a precipitação espacialmente distribuída na bacia (ASHKAR e ROUSSALE, 1993a; CRANMER *et al.* 2001; TASCHNER *et al.*, 2001; ANDERSEN *et al.*, 2004, FOUFOLA-GEORGIU *et al.*, 1991). Com essa incorporação da variabilidade espacial da precipitação espera-se melhorar a simulação hidrológica, mas alguns resultados mostram que essa melhora não ocorre.

Alguns estudos mais recentes mostram que em regiões com uma excelente cobertura observacional, como os de radar meteorológico, o uso dessas informações melhoram consideravelmente os resultados de previsão de cheias, comparados somente com os dados de precipitação distribuída na bacia (YANG *et al.*, 2003b; YANG *et al.*, 2004). Em síntese, a simulação hidrológica e seus processos são diretamente dependentes da resolução temporal, espacial dos dados meteorológicos de entrada, e esses dados ditam em geral o uso de modelos concentrados ou distribuídos (WOOD *et al.*, 1988).

A demanda por informação hidro-meteorológica no monitoramento e previsão de variáveis como volume afluente e escoamento superficial tem contribuído para agregar o uso da previsão meteorológica como dado de entrada na previsão dessas variáveis hidrológicas (SOUZA FILHO e LALL, 2003). Técnicas de redução de escala

(*downscaling*) tem sido uma ferramenta nos últimos anos (HAY e CLARK, 2003, WOOD *et al.*, 2004, DIAZ-NIETO e WILBY, 2005), usada com a utilidade de melhorar a resolução espacial da informação a ser divulgada.

6.6 A experiência da FUNCEME em modelagem climática e hidrológica

A FUNCEME tendo como missão fazer com que informações técnica e científica nas áreas de Meteorologia, Hidrologia e Meio ambiente possam vir a ser usadas por tomadores de decisão na esfera governamental e usuários em geral. Esta missão teve ter o sentido de contribuir para um melhor convívio da sociedade Cearense e nordestina com as adversidades climáticas inerentes a região NEB. Atualmente, a FUNCEME se destaca como centro de excelência regional nos estudos e aplicações das áreas citadas, e tem reconhecimento além das fronteiras regionais e nacionais.

No que se refere à previsão climática, a FUNCEME, desde a sua fundação em 1972, vem aprimorando conhecimento e técnicas, principalmente a partir da década de 1980 e hoje atinge níveis comparados a grandes centros mundiais que trabalham com essa problemática. A partir de 2002, a FUNCEME deu um grande salto, com a cooperação do *International Research Institute for Climate and Society (IRI)* consolidou um sistema operacional de previsão dinâmica sazonal de precipitação pluviométrica para todo NEB. Esse sistema possibilita refinar a previsão de MCGAs (*ECHAM4.5*) com o aninhamento (*downscaling*) de um MR (MRE/97), que têm em sua configuração características regionais como topografia, tipos de solo e vegetação mais detalhados, e parametrizações de processos físicos importantes para produção de chuva na escala regional não presentes nos MCGAs. Esta *Suíte* implementada na FUNCEME foi a pioneira no mundo a fazer com método de *downscaling* previsão operacional de precipitação a partir de 2002. Este sistema já apresentou resultados promissores na previsão da distribuição intra-regional da chuva no NEB (ALVES *et al.*, 2003; SUN *et al.*, 2005, 2006).

Para estudos de acoplamentos climáticos hidrológicos, a técnica de *downscaling* é vislumbrada como uma das interfaces para ajustar à escala da previsão climática de precipitação a escala da previsão do regime hidrológico de uma determinada bacia. Alguns estudos recentemente têm mostrado que o resultado do *downscaling* dinâmico apresenta melhor desempenho quando comparados aos dados observados de precipitação e vazão na escala abaixo da escala mensal, do que os

advindos dos MCGAs (NOBRE *et al.*, 2001; TUCCI *et al.*, 2003 e GALVÃO *et al.*, 2005).

Hoje, a FUNCEME, além desse primeiro sistema que aninha o MRE/97 no *ECHAM4.5*, instalou uma nova *Suíte* com maior capacidade computacional que possibilitou a mesma simulação de 30 anos (10 membros) para o período de 1971-2000, em modo de “previsão perfeita”, usando a TSM observada nos oceanos, aninhando modelo regional *RAMS* ao *ECHAM4.5*. Ambos os sistemas fazem operacionalmente a previsão sazonal de precipitação para o NEB a cada trimestre do ano com duas situações, usando as TSMs previstas e persistidas. É importante mencionar que a FUNCEME não executa rodadas de MCGAs, por exemplo *ECHAM4.5*. Seus resultados para o período de simulação (1971-2000) e para as previsões operacionais são enviadas a FUNCEME pelo IRI. Hoje já está implementado na FUNCEME o acoplamento dos resultados desse sistema de modelagem atmosférica com a modelagem hidrológica, na previsão de vazão em vários reservatórios hídricos no Estado do Ceará.

7 DADOS UTILIZADOS E METODOLOGIA

7.1 Dados usados no estudo

7.1.1 Dados de TSM

Os dados de TSM usados foram obtidos de duas fontes. Para o diagnóstico entre os dados de vazão na bacia do posto fluviométrico de Iguatu, usou-se TSM de uma versão do *Comprehensive Atmospheric-Ocean Data Set (COADS)*. Esse arquivo contém dados de médias mensais de TSM em pontos de grade de 1° x 1° de latitude e longitude, para o período de 1945 a 2000. Maiores detalhes desse arquivo de dados são encontrados em Da Silva *et al*, 1994. Como base para a simulação dos modelos *ECHAM4.5*, MR/97, foram usadas TSMs do bando de dados do *International Research Institute (IRI)*, conjunto de dados denominados de Interpolação Ótima (REYNOLDS e SMITH, 1994). Os valores de TSM para o período de 1971-2000, com cobertura em todos os oceanos, foram interpolados para a grade dos modelos *ECHAM4.5* e MRE/97.

7.1.2 Dados de precipitação

Especificamente sobre a área de captação da bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu, dos 108 postos pluviométricos com dados diários do banco de dados da FUNCEME e da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) no período de 1921-2000, somente 64 postos que passaram no teste de consistência (XAVIER e XAVIER, 2000) foram usados no estudo. Na seção de anexos é mostrada uma figura da localização destes postos na bacia, e uma tabela com seus códigos e coordenadas. A figura 11 mostra o número de postos pluviométricos diários usados no estudo entre janeiro de 1971 a dezembro de 2000. Pode-se observar uma grande variabilidade na quantidade de postos ao longo deste período. Uma queda abrupta no total de postos foi observada a partir de 1985 quando um grande número de postos pluviométricos da SUDENE foi desativado. Nota-se que nos últimos anos ocorreu um aumento na densidade de postos pluviométricos sobre a área de captação do posto fluviométrico de Iguatu.

Com estes postos pluviométricos da área de influência da bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu, usando o método do polígono de Thiessen (figura 12), foram calculadas médias diárias, e posteriormente com essas médias diárias foram acumulados totais pentadais quinzenais e mensais de precipitação. Como o interesse é nas chuvas do primeiro semestre visto que há uma concentração de mais de 90% das

chuvas nesse período na área da de captação da bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu, esses cálculos se detiveram ao período de janeiro a junho.

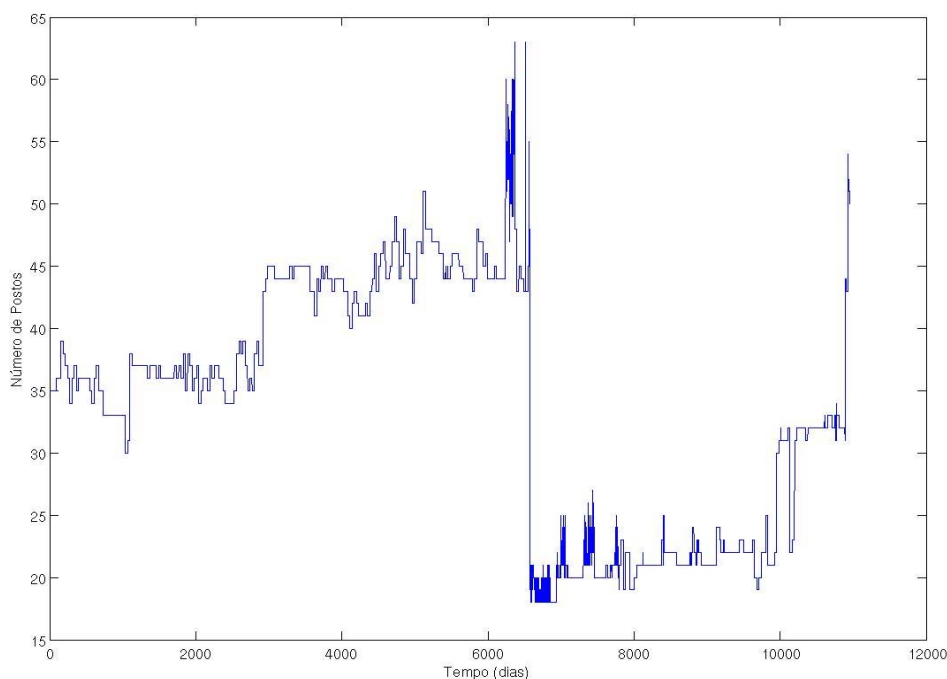


FIGURA 11 - Número de postos pluviométricos sobre a bacia do posto fluviométrico de Iguatu usados no estudo diariamente somatória dos dias julianos entre 01 de janeiro de 1971 a 31 de dezembro de 2000 (somatória dos dias julianos).

7.1.3 Dados de vazão e evaporação

Os dados de vazão afluente usados no estudo foram coletados no posto fluviométrico de Iguatu. Estes dados são valores diários para o período de 1921-2000. A partir desses dados diários foram calculados totais pentadai, quinzenais e mensais. Para os totais pentadai e quinzenais foram considerados valores de cinco ou seis dias, e quinze ou dezesseis dias entre o período de 01 de janeiro a 30 de junho de cada ano no período de 1940-2000. A coleta e consistência desses dados são rotineiramente feitas pela Agência Nacional de Águas (ANA), através da CPRM (Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais) no Estado do Ceará. A coleta e consistência destes dados anteriormente eram feitas pelo Departamento Nacional de Águas e Energia (DNAE). Uma análise mostrou os seguintes percentuais de dados diários sem vazão observada: para o período de 1950-1960 (0,8%), 1961-1979 (7,8%) e 1971-2000 (39,66%). Para a evaporação no modelo SMAP foi usado à observada mensalmente em Iguatu (climatologia 1961-1990). Para os cálculos diários esse valor foi dividido pelo número

de dias do mês. Estes dados de evaporação também foram usados na simulação do balanço hídrico do reservatório hipotético proposto na seção de metodologia.

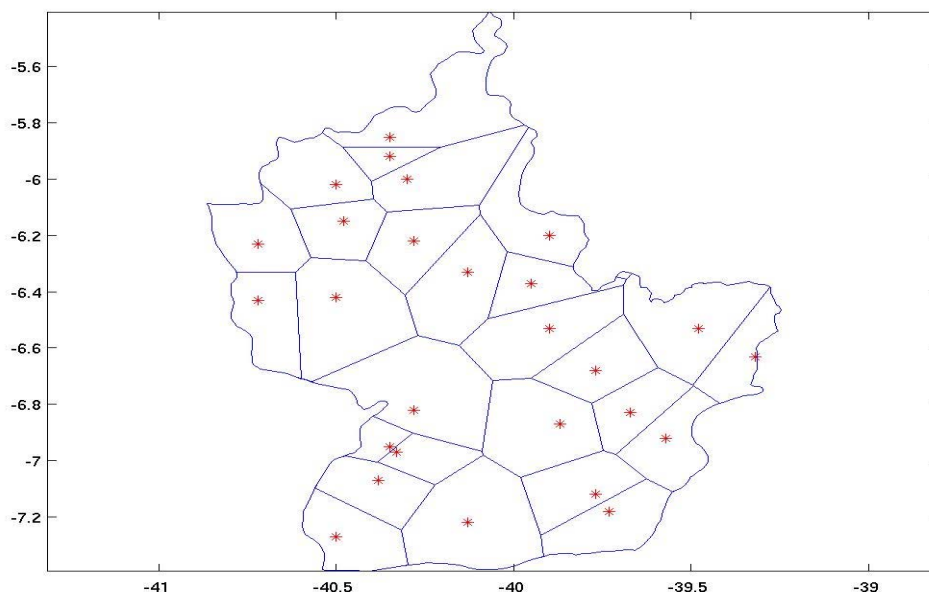


FIGURA 12 - Exemplo de um polígono de Thiessen com os postos pluviométricos usados no cálculo da precipitação, média, diária sobre a bacia do posto fluviométrico de Iguatu usados no estudo.

7.2 Análise diagnóstica do regime hídrico na bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu

Para se investigar o impacto dessa variabilidade climática tropical no regime hídrico da bacia hidrográfica do posto fluviométrico do Iguatu, nos conjuntos de anos, devido às forçantes e sumidouros térmicos observados nos oceanos Pacífico e Atlântico Tropicais, foi usada a técnica dos *composites* (NOBRE, 1996). Essa técnica é muito utilizada para identificar padrões de uma variável agrupada em um conjunto de anos. Essa análise foi feita para períodos pentadais, quinzenais, mensais. Sendo que as pântadas não se superpõem entre os meses, tendo cada mês de janeiro a junho 6 pântadas, sendo a última pântada podendo ter 4, 5 ou mais dias, em função do número de dias do mês. Embora existam dados de vazão para o período anterior a 1970, optou-se pela escolha do período de 1971-2000, por este se inserir o período de simulação do modelo atmosférico dinâmico.

Foram calculadas médias de longo tempo (MLTs), desvios padrões (DPs) e anomalias das áreas representativas do fenômeno El Niño (Região de Niño 3 - 150°W e 90°W e 5°S e 5°N) e do dipolo de TSM no Atlântico Tropical (definido pela diferença da anomalia entre área norte da Bacia - ATN área sul da bacia – ATS). Essas áreas

compreendem as seguintes coordenadas: ATN (5-20°N, 60-30°W) e ATS (0-20°S, 30°W-10°E). O cálculo das MLTs, DPs e anomalias foi para o período de novembro a maio do ano seguinte semestral. Esse período foi escolhido, porque nele concentra-se mais de 80% das chuvas na região de captação da bacia hidrográfica do posto pluviométrico de Iguatu. As anomalias de TSM nessas áreas foram usadas para identificar os anos de El Niño, La Niña e com dipolos de TSM no Atlântico Tropical, definidos a seguir.

Embora existam na literatura vários autores que tenham definido ano de ocorrência de eventos El Niño, La Niña, Neutros no Pacífico Tropical (KILADIS, 1989; TRENBERTH, 1998 e outros), e de dipolos de TSM no Atlântico Tropical (SERVAIN, 1991; SOUZA *et al.* 1997); nesse estudo nos definimos El Niño, La Niña e Neutros no Pacífico Tropical e de dipolos de TSM no Atlântico Tropical como: anos de El Niño quando a anomalia de TSM na área de Niño 3 esteve com uma anomalia acima de 0,5°C no quadrimestre novembro a fevereiro. La Niña quando essa anomalia foi inferior a -0,5°C. Anos Normais foram considerados aqueles com anomalias entre -0,5°C e 0,5°C. Como no Atlântico Tropical as anomalias de TSM apresentam magnitudes interanuais inferiores as regiões do Pacífico Tropical (PHILANDER, 1990). Anos com dipolo positivo de TSM foram definidos quando a diferença entre as anomalias no ATN e ATS nos meses de março a maio foi superior a 0,2°C, e anos com dipolo negativo de TSM quando essa anomalia foi inferior a -0,2°C. Os anos com dipolo de TSM Neutro foram definidos quando essa diferença ficou entre -0,2°C e 0,2°C.

Em função da classificação acima citada os anos tiveram a seguinte classificação: La Niña (1971*, 1972**, 1974*, 1975*, 1976**, 1984*, 1985*, 1986*, 1989*, 1996**, 1997***, 1999* e 2000*), El Niño (1973*, 1977**, 1983***, 1987**, 1988*, 1992***, 1995* e 1998***), Normais (1978***, 1979***, 1980***, 1981***, 1982***, 1990**, 1991*, 1993** e 1994*). Os anos grafados com um, dois e três asterisco foram anos classificados predominantemente com dipolo negativo, neutro e positivo, respectivamente.

Para cada composição de anos colocadas no parágrafo anterior foram calculadas as MLTs, DPs e anomalias da precipitação e vazão nas escalas de tempo mencionadas anteriormente. O intervalo de confiança com significância estatística de 95% para as médias e desvios padrões para os anos classificados nas categorias

climáticas foi calculado pelas fórmulas seguintes. Para as médias como $\mu \pm t_c \left(\frac{\sigma}{n} \right)$, e

desvios padrões como $\sigma \pm z_c \left(\frac{\sigma}{\sqrt{2n}} \right)$, com t_c tabelado segundo a distribuição t Student de acordo o número de anos de cada composição. σ e μ nas equações acima indicam o desvio padrão e a média da amostra. A significância estatística a 95% para as anomalias das variáveis para as composições de anos de contrastes climáticos foi calculada segundo Harrison e Larkin (1998). Anomalias significativas foram aquelas cujo valor absoluto excedeu a $(z_{95}(n) \cdot \sigma) / (n)^{\frac{1}{2}}$, onde n é o número de anos usado na composição, σ é o correspondente desvio padrão do composto, z_{95} é o valor tabelado da distribuição t Student para n grau de liberdade.

7.3 Modelo dinâmico de grande escala e regional

7.3.1 Modelo dinâmico de grande escala *ECHAM4.5*

O modelo *ECHAM4.5* é baseado no modelo de previsão de tempo do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*. Várias modificações têm sido aplicadas no mesmo no *Max Planck Institute for Meteorology and German Climate Computing Centre (DKRZ)* para melhorar a previsão climática, estando o mesmo atualmente na quarta geração. Uma detalhada descrição do *ECHAM4.5* pode ser encontrada em Roeckner *et al.* (1996). Na versão padrão do modelo o mesmo tem 19 níveis híbridos usados em um sistema de coordenadas de pressão-sigma. O domínio vertical estende-se até o nível de pressão de 10 hPa. Variáveis prognósticas são vorticidade, divergência, logaritmo de pressão a superfície, temperatura, umidade específica, razão de mistura e total de água de nuvem. Exceto para componentes de vapor o prognóstico das variáveis são representados por harmônicos esféricos com truncamento triangular no número de onda T42.

O passo de tempo para a dinâmica e a física é de 24 minutos para a resolução horizontal T42 (aproximadamente 250 km). O passo de tempo para a radiação é duas horas. Os ciclos diurno e sazonal da forçante solar são simulados. Para o transporte de vapor d'água e água de nuvem um semi-lagrangeano (resolve as equações do modelo seguindo a trajetória do movimento) esquema é usado. Os fluxos turbulentos de superfície são calculados através do Monin-Obukov (teoria que tenta explicar as relações existentes entre as trocas de energia e massa entre determinada superfície e sua atmosfera circundante e seus respectivos gradientes *bulk* usando teoria da similaridade -

teoria que tenta explicar as relações existentes entre as trocas de energia e massa entre determinada superfície e sua atmosfera circundante e seus respectivos gradientes (LOUIS, 1981). Dentro e acima da camada limite atmosférica um esquema fechado de alta ordem é usado para computar a transferência turbulenta de momento, calor, mistura e água de nuvem. Os coeficientes de difusão turbulenta são calculados como função da energia cinética turbulenta (E). O modelo de solo contempla os balanços de calor, água no solo, pacote de neve sobre o continente e balanço de calor de gelo sobre o continente.

Efeitos de vegetação tais como interceptações de chuva na copa das árvores e controles de evapotranspiração pelos estômatos parametrizados (definição de um conjunto de valores com significado físico ou não, que servem para ajustar o comportamento de um modelo para que ele possa representar com maior fidelidade o comportamento físico ao qual se propõe a simular, Silva Filho, 2005). Estômatos são órgãos que têm a função de realizar trocas gasosas entre a planta e o meio ambiente. Está localizado geralmente na epiderme inferior (parte abaxial), evitando o excesso de transpiração devido a intensidade de luz que atinge a epiderme superior. O esquema de estimativa do escoamento superficial tem como base a área de captação da bacia hidrográfica e leva em consideração as variações de sub-grade da capacidade máxima de armazenamento de água no solo (capacidade de campo) sobre áreas continentais não homogêneas. Parâmetros de superfície tais como albedo, rugosidade, tipo de vegetação, índice de área foliar e parâmetros de solo tais como, capacidade de armazenamento de água, capacidade e condutividade térmica tiveram suas compilações segundo Claussen *et al.*, 1994. As parametrizações de convecção cumulus (rasa, média e profunda) são baseadas no conceito de fluxo de Tiedtke (1989).

7.3.2 Modelo regional espectral 97 (MRE/97)

O MRE aqui usado é uma versão 97 do MRE com aproximação não hidrostática (assume que não há equilíbrio entre a força de gravidade e a componente vertical do gradiente de pressão) desenvolvido no Centro de Modelagem de Meio Ambiente do *NCEP* desenvolvido por Juang e Kanamitsu (1994). Uma importante característica do MRE é a resolução da perturbação dependente do tempo e a acuracidade de alta ordem da computação que utiliza o método espectral. O MRE tem a mesma física do modelo espectral global (MEG) que é usado para previsão de médio prazo como descrito em Kanamitsu *et al.* (1991). Um importante avanço foi também

endereçado na dinâmica do MRE para manter a sua estabilidade computacional, uma opção de difusão local contida no MEG foi implementada no mesmo (IRIDELL e PURSER, 1994). A mesma pode ser utilizada para passos de tempo mais longos e faz uma checagem e difusão das áreas de ventos fortes que poderiam causar instabilidade computacional. Essa opção pode não ser ideal para previsão em áreas onde correntes de jato são importantes dinamicamente para sistemas atmosféricos de curta duração, entretanto pode ser útil para estudos climáticos que requerem integrações mensais com MRE de alta resolução.

O MRE tem 18 níveis sigma na vertical (seguem as coordenadas do terreno), com as seguintes características físicas: radiação de onda longa e onda curta com variação diurna, interação com radiação de nuvem, uma camada na superfície com propriedades físicas da camada limite planetária, arrasto por onda de gravidade, convecção cumulus tipo Arakawa-Shubert simplificada (PAN e WU, 1994; HONG e PAN, 1996), convecção rasa e alguns processos hidrológicos (KANAMITSU, 1989). As parametrizações físicas são computadas a cada passo de tempo, exceto para a rotina de radiação que é chamada a cada 1 hora pelo MRE. Além disso, tem sido testado e implementado vários pacotes físicos, particularmente, para parametrização de convecção (JUANG *et al.*, 1994). O MRE também usa um modelo de solo de duas camadas descrito por Pan e Marth (1987). Esse modelo de solo é usado para descrever o papel da vegetação e sua interação com a umidade no solo em modificar as trocas entre a superfície-atmosfera de fluxos de momento, energia e vapor d'água.

7.4 Sobre os experimentos de modelagem numérica de grande escala e regional

Vale mencionar que os resultados desse estudo se deterão a comparar resultados de modelagem dinâmica no chamado modo de simulação. Esse modo na literatura meteorológica é entendido como o modo de “previsão” perfeita, visto que se usa a TSM observada.

Segundo Alves *et al.* (2005), o aninhamento entre o MCGA *ECHAM4.5* e o MRE/97 foi unidirecional usando os resultados do MCGA de janeiro a maio (1971-2000), como dados de entrada para o MRE/97 de 6 em 6 horas. O método de perturbação aninhada usada seguiu o utilizado no MCGA sobre todo o domínio, e não somente na zona de fronteira lateral. Essa metodologia é diferente dos métodos convencionais usados na modelagem numérica, que usam os resultados do MCGA

somente nas fronteiras laterais dos MRs. As variáveis dependentes no MRE são definidas como a soma da perturbação e o campo base (campo que depende do ajuste do MCGA em relação ao MRE). Maiores detalhes sobre o MR/97 podem ser encontradas em Juang *et al.* (1994).

Antes da execução do experimento de simulação foram feitas algumas simulações para o mês de abril de 2001. Essas serviram para a escolha do domínio regional a ser utilizado, que compreende o comprimento ideal para fins de recursos computacionais, além da área geográfica específica de localização da fronteira lateral (áreas de topografia plana e sem grande atividade convectiva - formação de nuvens profundas), características que afetam a sensibilidade dos MRs. Após uma análise comparativa do campo de precipitação sobre o NEB e bacia do Atlântico Tropical entre o observado e o simulado, optou-se pela escolha da simulação de número 7 (tabela 1) para ser usado como controle para execução da simulação do MRE/97 para os meses de janeiro a junho de 1971.

Essa simulação foi a que apresentou melhor configuração qualitativa e um menor *bias* no campo de chuva sobre o NEB e bacia do Atlântico Tropical. Os domínios do MCGA e do MRE/97 usados na simulação de número 7 e suas topografias utilizadas são mostrados nas figuras 13 e 14. O MRE/97 foi integrado, com um conjunto de 10 membros (*ensemble*). Esta integração por *ensemble* é feita por semente randômica, em que condições iniciais, que caracterizam cada membro do conjunto diferem entre si somente por uma perturbação randômica sobreposta a análise de entrada do modelo global usado na integração. O passo de tempo foi de 600 segundos em modo de simulação (previsão chamada de “ótima” porque usa as TSMs observadas com condição de contorno), com um espaçamento de grade de 60 quilômetros centrada na latitude de 3°Sul e na longitude de 27°Leste, e 18 níveis verticais, e o domínio compreendeu desde o oeste da África do Sul até Região Amazônica (figura 8), para um período seis meses (janeiro a junho) durante 30 anos, de 1971 a 2000. As principais características da simulação do MR/97 como o passo de tempo da simulação (usado na resolução das equações diferenciais por diferenças finitas), centro da grade, número de pontos em latitude e longitude e tempo de processamento são mostrados na tabela 1.

Nas simulações o tipo de solo foi um com característica intermediária entre um arenoso e um argiloso. A vegetação foi do tipo savana aplicada à área de cada grade do MRE. Para a cobertura do tipo de solo essa foi similar a do caso da vegetação.

As forçantes de grande escala utilizadas nas simulações do MRE/97 foram obtidas de previsões do MCGA *ECHAM4.5* para os meses de janeiro a junho de 1971 a 2000. As informações de larga escala das componentes meridional e zonal, umidade específica, temperatura e pressão a superfície serviram de entrada a cada 6 horas para alimentar o domínio do MRE. Temperatura da Superfície do Mar (TSM) observada nos oceanos Pacífico, Atlântico e Índico (REYNOLDS e SMITH, 1994) nos meses de janeiro a junho (1971-2000) serviram de variáveis de contorno à superfície nas simulações do *ECHAM4.5* e do MRE/97.

TABELA 1 - Experimentos de simulação executados para o mês de abril de 2001 para se definir o experimento de controle que serviu de base para as simulações do MRE/97 para o trimestre (fevereiro a maio – 1971 a 2000). Os números de 1 a 8 na tabela indicam os índices das simulações.
Fonte: Alves *et al.*, 2003.

<i>Simulação</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
Esp. Grade (km)	30	40	60	80	40	60	60	60
Passo de tempo (s)	240	300	300	360	300	300	600	300
Centro da grade	3S,40W	3S,40W	3S,40W	3S,40W	3S,40W	3S,58W	3S,27W	3S,40W
No. de pontos I	73	55	73	55	73	109	109	109
No. de pontos J	90	68	72	54	90	72	72	72
Duração (hora)	16:00h	06:35h	10:00h	04:10h	13:00h	17:10h	17:10h	17:10h

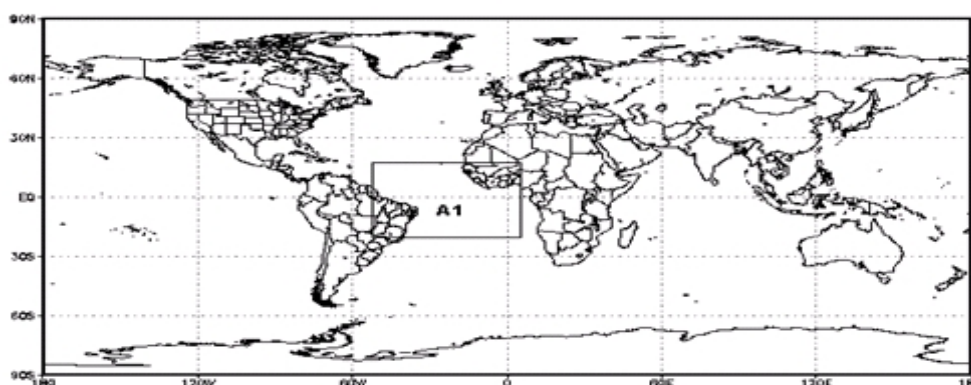


FIGURA 13 - Domínio dos modelos MCGA (*ECHAM4.5*) utilizado nas simulações do *ECHAM4.5* e do MRE/97 (área A1 da figura).

Fonte: Alves *et al.*, 2003.

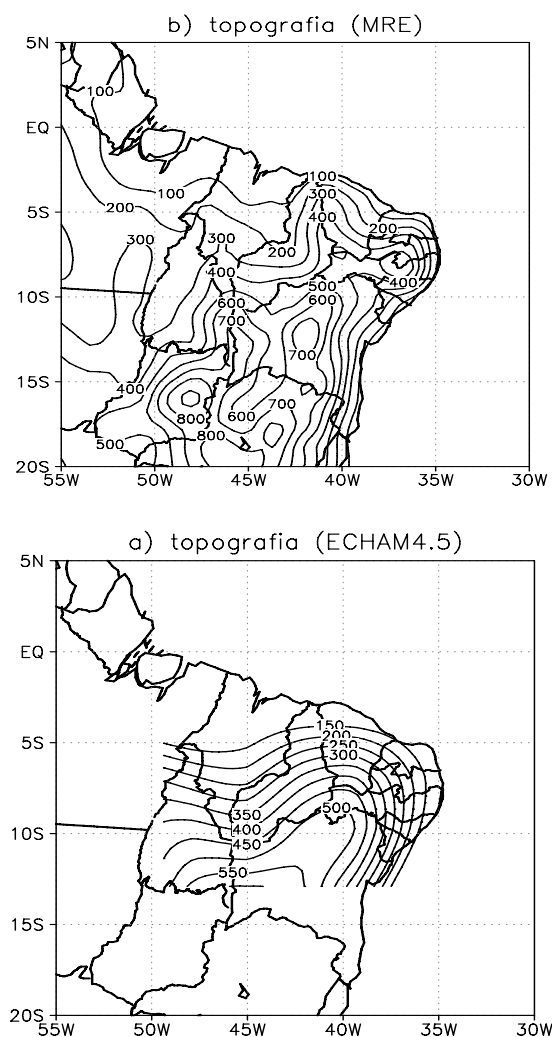


FIGURA 14 - Topografia sobre a Região Nordeste (m). a) MCGA (*ECHAM4.5*), b) MRE/97. O espaçamento entre as isolinhas da figura 14a é de 50 m, e da 14b é de 100 m. Fonte: Alves *et al.*, 2003.

7.5 O modelo de transformação chuva - vazão

Vários modelos hidrológicos têm sido testados para estimativa de vazão em bacias hidrográficas do NEB, inclusive na sua região semi-árida (LOPES *et al.*, 1981). O modelo escolhido nesse estudo para a geração de vazão foi o modelo SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*). Várias versões dessa modelagem hidrológica foram testadas com bons resultados na estimativa de vazões em áreas com características semi-áridas do NEB (SILVA FILHO, 2005). Além disso, foi considerada a facilidade de uso desse modelo, a qual exige a obtenção de poucos dados observacionais e a baixa demanda computacional. A base conceitual de aplicação do modelo hidrológico levou

em conta os conceitos de modelagem concentrada, admitindo, por exemplo, um valor médio de precipitação, evaporação ao longo da bacia do posto fluviométrico de Iguatu.

O modelo SMAP é um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão. Foi desenvolvido em 1981 por Lopes J.E.G., Braga B.P.F. e Conejo J.G.L., e apresentado no *International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling* realizado em Mississippi, U.S.A. e publicado pela *Water Resources Publications* (1982).

O desenvolvimento do modelo baseou-se na experiência com a aplicação do modelo *Stanford Watershed IV* e modelo Mero em trabalhos realizados no DAEE-Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo. Foi originalmente desenvolvido para intervalo de tempo diário e posteriormente apresentadas versões horária e mensal, adaptando-se algumas modificações em sua estrutura.

Em sua versão diária, tem a seguinte descrição. É constituído de três reservatórios matemáticos, cujas variáveis de estado são atualizadas a cada dia da forma:

$$R_{\text{solo}}(i+1) = R_{\text{solo}}(i) + P - E_s - E_r - \text{Rec}$$

$$R_{\text{sup}}(i+1) = R_{\text{sup}}(i) + E_s - E_d$$

$$R_{\text{sub}}(i+1) = R_{\text{sub}}(i) + \text{Rec} - E_b$$

onde: R_{solo} = reservatório do solo (zona não saturada)

R_{sup} = reservatório da superfície da bacia

R_{sub} = reservatório subterrâneo (zona saturada)

P = chuva (mm)

E_s = escoamento superficial (mm)

E_d = escoamento direto (mm)

E_r = evapotranspiração real (mm)

Rec = recarga subterrânea (mm)

E_b = escoamento básico (mm)

inicialização: $R_{\text{solo}}(1) = T_{\text{uin}} \cdot \text{Str}$

$$R_{\text{sup}}(1) = 0$$

$$R_{\text{sub}}(1) = E_b / (1-kk) / A_d * 86,4$$

onde: T_{uin} = teor de umidade inicial (adimensional)

E_b = vazão básica inicial (m^3/s)

A_d = área de drenagem (km^2)

A separação do escoamento superficial tem como base o método do SCS (*Soil Conservation Service* do U.S.A.).

- 1- Se $(P > Ai)$ Então $S = Str - Rsolo$
 $Es = (P - Ai)^2 / (P - Ai + S)$
 Caso contrário $Es = 0$
- 2- Se $((P - Es) > Ep)$ Então $Er = Ep$
 Caso contrário $Er = (P - Es) + (Ep - (P - Es)) * Tu$
- 3- Se $Rsolo > (Capc * Str)$ Então $Rec = Crec * Tu * (Rsolo - (Capc * Str))$
 Caso contrário $Rec = 0$
- 4- $Ed = Rsup * (1 - K2t)$
- 5- $Eb = Rsub * (1 - Kkt)$, sendo $Tuin = Rsolo / Str$.

A figura a seguir ilustra a estrutura do modelo em sua versão diária.

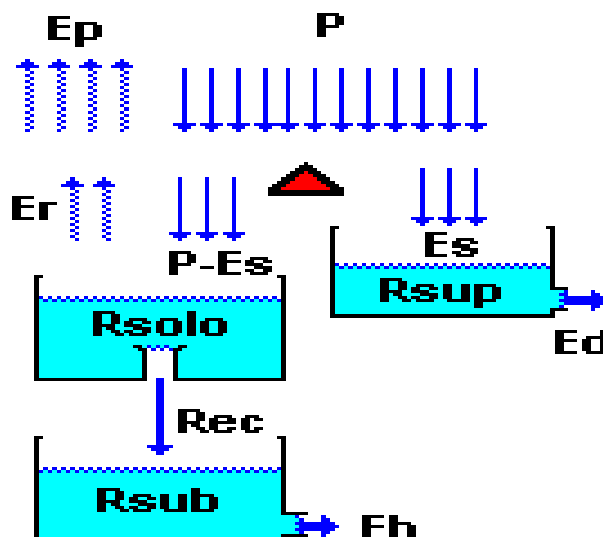


FIGURA 15 - Diagrama esquemático de operação do modelo SMAP.

São oito os parâmetros do modelo e os intervalos em valores utilizados: Srt - capacidade de saturação do solo (mm) (100 a 2000), $K2t$, constante de recessão do escoamento superficial (dias) (0,2 a 20), $Crec$ - parâmetro de recarga subterrânea (%) (0 a 20), Ai - abstração inicial (mm) (1 a 10), $Capc$ - capacidade de campo (%) (0 a 100), Kkt - constante de recessão do escoamento básico (0 a 3), $Tuin$ = teor de umidade inicial (adimensional) - (0 a 30) e Eb vazão básica inicial (m^3/s) - (0). O eventual transbordo do reservatório do solo é transformado em escoamento superficial.

Finalmente o cálculo da vazão é dado pela equação:

$$Q = (Es + Eb) * Ad / 86,4 \quad (7)$$

7.6 Calibração de modelos de transformação chuva-vazão

A calibração de modelos chuva-vazão, em geral, tem sido efetuada de forma manual, através de "tentativa e erro". Este método requer muita experiência do hidrólogo e constitui um processo trabalhoso e subjetivo. Por outro lado, apresenta a vantagem do acompanhamento total do hidrólogo na determinação de cada parâmetro, onde toda sua experiência é passada ao processo.

Recentemente, têm se utilizado de métodos matemáticos de otimização para calibração automática desses modelos, de forma a facilitar o trabalho e diminuir a subjetividade do processo manual. Infelizmente, as facilidades fornecidas por esses métodos, em geral, acarretam a falta de acompanhamento do hidrólogo na calibração passo a passo dos parâmetros, impedindo o desenvolvimento da sua sensibilidade, e com isso, diminuindo a confiabilidade dos resultados.

Entre esses métodos citam-se os métodos de busca direta que consistem em, a partir de um valor inicial dos parâmetros, minimizarem a função objetivo provendo-se variação dos parâmetros através de algoritmos matemáticos. As principais críticas aos métodos de busca direta recaem sobre a subjetividade da escolha da função objetivo e ao fato desses métodos convergirem a um mínimo local da função sem conseguir atingir o mínimo global, exemplo típico deste método é o de Rosenbrock-Hill (NASCIMENTO *et al.*, 2006).

A técnica de pesquisa global consiste em rodar o modelo para toda a faixa viável dos parâmetros, atribuindo a estes valores discretos. Seleciona-se então o mínimo valor da função objetivo e em torno dos parâmetros correspondentes novamente se roda o modelo com valores discretos agora mais próximos do mínimo encontrado. Repete-se este procedimento até que não haja mais variação significativa do valor da função objetivo.

Este procedimento equivale executar um "zoom" em torno do mínimo valor da função objetivo iterativamente. Dessa forma, dependendo da discretização dos parâmetros, os mínimos locais serão desprezados. Este procedimento é computacionalmente pouco eficiente se comparado aos métodos de busca direta, porém é muito mais seguro quanto a se atingir o mínimo global. Ainda com a utilização de microcomputadores o tempo de processamento é aceitável.

A equação utilizada para estabelecer a discretização dos parâmetros é a seguinte:

$$\text{Pr}(i) = \text{Pr}^* 2^{((i-4)/(2+lp))} \quad (8)$$

onde: $\text{Pr}(i)$ = vetor de parâmetros a serem testados.

Pr^* = parâmetro ótimo do *loop* anterior.

i = índice de discretização do parâmetro (de 1 a 7).

lp = número do *loop* (nível de "zoom") (de 1 a n (número de iterações)).

7.7 Parâmetros de calibração do modelo

Dos oito parâmetros do modelo foram calibrados apenas quatro (Str, K2t, Crec, Cappc). O parâmetro Crec (parâmetro de recarga subterrânea) não apresentou sensibilidade na calibração diária e pentadalmente apresentando valores muito próximos à zero podendo ser desprezado. Os valores encontrados na calibração desses parâmetros para o SMAP foram: diário (Str = 349 mm, K2t = 10,44 dias, Crec = $1,06910^{-8}$ e Cappc = 59,656 %), pentadal (Str = 348 mm, K2t = 10,47 dias, Crec = $7,01610^{-8}$ e Cappc = 75,568 %) e quinzenal Str = 351,54 mm, K2t = 11,10 dias, Crec = 1,5281 e Cappc = 82,106 %). Os demais parâmetros não foram calibrados, porque em regiões com solo de predominância rochosa (cristalino), como o que compõe grande parte da bacia do posto fluviométrico de Iguatu, estes não apresentaram variação significativa. Desta maneira foram adotados os valores determinados por Alexandre (2005).

Maiores detalhes do procedimento dessa calibração podem ser encontrados em Nascimento *et al.* (2006), para estudos com o modelo SMAP na escala de tempo mensal. A função objetivo usada na calibração entre as vazões observadas e simuladas pelo SMAP foi à eficiência Nash-Sutcliffe (NASH e SUTCLIFFE, 1970), que é dado pela seguinte formulação:

$$R = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (V_{o,i} - V_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^n (V_{s,i} - M_o)^2} \right] \quad (9)$$

onde V_o é o valor da variável observada, V_s é o valor da variável simulada e M_o é o valor da MLT dos dados observados. O valor de R varia a partir de negativo infinito a 1, sendo um indicativo de perfeito ajuste entre os dados observados e simulados. Os valores dos parâmetros no período de calibração com estimativas mais próximas da vazão observada foram usados no período de 1971-2000, o qual se pretende testar o desempenho do resultado da modelagem dinâmica.

7.8 Fonte de erros nos sistemas de modelagem

A incerteza associada à característica aleatória dos eventos que ocorrem na natureza já se constitui a priori numa fonte de erro quando se relacionam as suas previsões. Na atmosfera, as fontes de erro da modelagem numérica de suas variáveis, por exemplo, da precipitação são inúmeras. A primeira, no caso dos MCGAs, está na sua principal forçante a superfície, a TSM sobre os oceanos. Hoje previsões com confiabilidades aceitáveis, feitas operacionalmente, são ainda confinadas no Pacífico Tropical. Nos demais oceanos essas previsões tem pouca credibilidade.

Outra fonte de erro são as próprias parametrizações físicas dos processos que ocorrem na escala de sub-grade dos MCGAs. No caso dos MRs, estes contém equações ou aproximações para resolver alguns processos (balanço de radiação entre nuvens, micro física de nuvens, etc). Entretanto, nem sempre esses conseguem melhor desempenho quando comparado às características observadas.

Quando se propõe um sistema de modelagem que usa relações estatísticas entre variáveis climáticas e estimadas por modelagem dinâmica atmosférica e hidrológica (caso da precipitação e vazão) e variável observada (vazão) os erros passam a ser cumulativos em forma de cascata. Por exemplo, a chuva estimada pelos MCGAs ou *downscaling* dinâmico já incorporam no caso se usada a condição a TSM prevista a sua incerteza, o que não é o caso dos resultados desse estudo pois as simulações usaram TSMs observadas, que se reproduz na chuva que conseqüentemente influenciará na estimativa de vazão. No caso da relação estatística, já há um erro associado à própria não-linearidade entre as variáveis relacionadas assumida na relação utilizada que também impactará nos resultados finais. O erro final das diversas etapas do sistema proposto de estimativa de vazão será avaliado entre os valores de vazão observada e suas estimativas pelos critérios apresentadas na seção 7.12.

7.9 Técnicas usadas na correção dos dados de modelagem

Os resultados da modelagem dinâmica da atmosfera apresentam erros sistemáticos (tendências). Estes vieses podem ser corrigidos por algumas técnicas. De uma forma geral, estas têm como base métodos estatísticos que tentam realizar uma análise dos erros com base em uma série histórica longa de dados observados e modelados (WANG *et al.* 2004; WOOD *et al.*, 2002; FEDDERSEN *et al.*, 1999). Dois métodos em geral são usados: o que preserva os dois primeiros momentos da série

histórica e o método que preserva as frequências amostrais observadas na série histórica.

Segundo Reis Junior *et al.* (2006) o método dos dois primeiros momentos (MOM) consiste em calcular a média e o desvio padrão diários das séries observadas e modeladas para cada mês do ano para o período de 1971-2000. O valor bruto da previsão de chuva em um dado dia do mês é subtraído da média histórica dos valores previstos e dividido pelo correspondente desvio padrão, tem-se um valor padronizado. Então, o valor corrigido da simulação/previsão é dado pela multiplicação do valor padronizado pelo desvio padrão da série histórica observada e adicionar o valor da média histórica dos dados observados.

O método que tem como base as frequências diárias das amostras previstas/simuladas e observadas no período de 1971-2000, tem como procedimento a obtenção de duas curvas de frequência amostral uma para a previsão simulação outra para os dados observados (SOUZA FILHO e PORTO, 2003). O valor bruto da previsão diária de chuva em cada mês está associado a uma probabilidade de ocorrência dada pela curva de frequência amostral do modelo. Para se obter o valor corrigido da simulação/previsão, basta pegar o valor da chuva correspondente à mesma probabilidade de ocorrência na curva dos valores observados. Neste estudo foi executada apenas a correção com base nas frequências amostrais. O período usado para essas correções das precipitações diárias simuladas pelo MRE foi de janeiro a junho entre 1940-1970 (observações diárias de precipitação).

7.10 Técnicas sobre teoria da decisão abordadas no estudo

De acordo com McMahon e Mein (1986), citados em Sólón (2005), operação de um reservatório, em geral, se depara com períodos críticos relacionados à demanda. Quando ocorrem esses períodos no horizonte de operação, os mesmos requerem estratégias específicas. Nesses casos técnicas que se baseiam em teorias de decisão são importantes. Um dos conceitos mais difundidos de período crítico de abastecimento (PC) é definido como sendo o período que o reservatório de cheio passa para vazio sem ocorrer extravasamento no período (SÓLON, 2005). Entretanto, existem divergências quanto a esse conceito, a *United States Army Corps of Engineers* (1975) define como PC o período em que o reservatório vai de cheio-vazio-cheio.

Técnicas de teoria da decisão são ferramentas que possibilitam a adoção de uma estratégia relacionada a um prévio potencial conhecimento da evolução do sistema em estudo (ANDENBERG, 1979). Em seu estudo Andenberg propôs uma lógica de cálculo que associado a regras de operação de reservatórios, assegurasse uma maior flexibilidade na regularização das vazões do mesmo no horizonte de operação. Essa sua lógica foi denominada de *Anticipated Decision Influence Period* (ADIP). Vários estudos têm mostrado o uso de técnicas de decisão na operação de sistemas hídricos. Ostfeld (2005) desenvolveu um modelo para melhorar o dimensionamento e operação de sistemas de distribuição de água sob características variadas.

Quando se projeta e constrói-se um reservatório hídrico, objetiva-se inserir um ente físico, em um ambiente climático geralmente irregular pluviometricamente, que acumule água nos anos de excesso de chuva e supra a demanda nos anos de escassez hídrica. Assim, o reservatório é dimensionado a atender a demanda por um tempo longo, por exemplo, 100 anos, com uma estipulada garantia de abastecimento (SÓLON, 2005). A vazão regularizada calculada é fixa e como na prática a garantia não é de 100%, existem margens de falhas considerando-se períodos críticos de abastecimento. Essa margem de falhas exige um controle na operação do sistema, em curtos espaços de tempo que possibilite minimizar os períodos críticos. Conceitualmente, esse espaço é arbitrado de um ano, entretanto segundo Andenberg (1979), esse período não deve ser arbitrado e sim conhecido, o que incorrerá em uma melhor operacionalização do reservatório.

Essa questão do espaço não poder ser arbitrada, porque na prática este pode estar relacionado às seguintes situações: a ocorrência de período crítico de abastecimento pode ser de excesso ou de déficit. Caso ocorra um período de excesso, interessa modificar a liberação neste período para se manter um controle da sangria do reservatório, nesse caso a vazão liberada será maior do que a estipulada no estado de equilíbrio. No período de déficit a situação é contrária, torna-se necessário diminuir a vazão liberada, sendo inferior à vazão regularizada proposta para que não haja interrupção no fornecimento de água. Se esses períodos não foram identificados análise operacional poderá incorrer em erros, acarretando vazões menores e maiores em períodos de excesso e déficits, o que poderá resultar em sangrias não controladas e falta de abastecimento (Sólon, 2005). As principais características da ADIP desenvolvida por Andenberg (1979) são apresentadas a seguir.

7.10.1 Fases da curva de um período de excesso

Admita, hipoteticamente, um reservatório com uma dada capacidade máxima (K_{max}) e capacidade mínima (K_{min}). Estes dados associados à regra de operação do reservatório delimitaram a curva 1-2-3 (figura 16). No tempo t_0 o reservatório tem um volume inicial V_0 . De acordo com a política de liberação adotada e com as afluências ao mesmo, no ponto A o reservatório começa a transbordar e continua até o ponto B, tendo um volume sangrado (quando o volume do reservatório ultrapassa a sua capacidade máxima) nesse tempo de V_s . Em uma segunda fase, a curva desce até C, havendo um período de déficit de água até o ponto D. Após o ponto D, ocorre uma fase ascendente que não mais interessará ao planejamento. O tempo de t_0 a t_1 é denominado de período de excesso de t_1 a t_2 de déficit. Os sub-períodos A-B e C-D não chamados de períodos não-opcionais (PNO), pois o operador não tem qualquer decisão nos mesmos.

Algumas características podem ser avaliadas pelo operador nesse processo. Caso o operador decida diminuir a retirada no período de excesso (fase 4) ele irá aumentar PNO do reservatório de A-B para E-B, não obtendo nenhum período subsequente de déficit. Por outro lado, se o operador aumentar a liberação até atingir a fase 5, o PNO A-B se reduzirá a zero não havendo sangramento do reservatório, e maiores benefícios serão alcançados em termos de vazão liberada, trazendo ganhos a população atendida; e não trazendo conseqüências ao período de déficit. Nesse caso o ponto ótimo da oferta é atingido. Caso haja um incremento ainda maior na fase 6, o reservatório não atingirá o seu máximo, no período de excesso, não havendo, portanto o PNO A-B. Entretanto, as conseqüências dessa liberação exagerada irá se estender ao período de deficiência aumentando o PNO C-D para F-D.

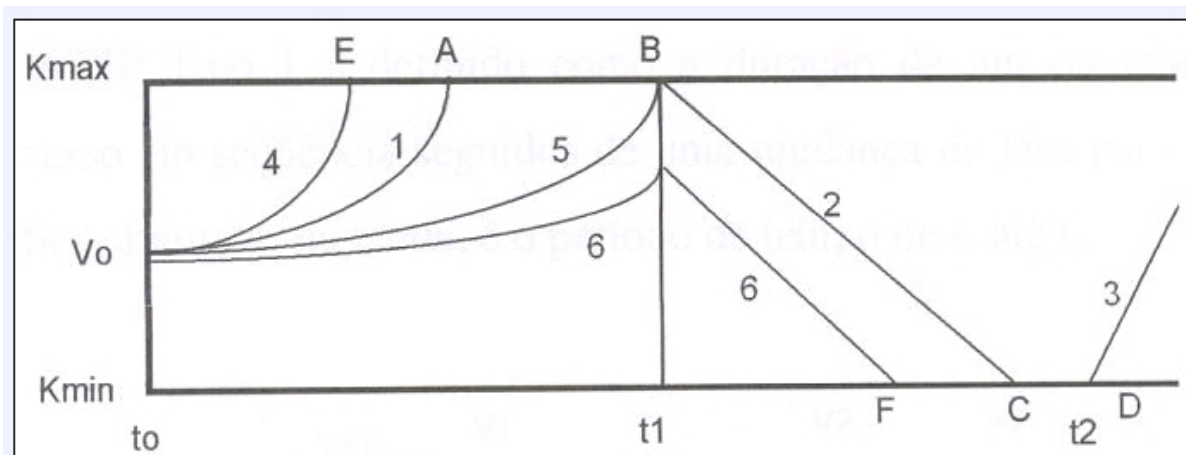


FIGURA 16 - Diagrama esquemático de uma fase de operação do reservatório associada a um período de excesso (denominada de Fase de Excesso).

Fonte: Sólón (2005).

7.10.2 Fases da curva de um período de déficit

A figura 17 mostra uma situação hipotética para o caso de um período crítico de déficit, as mesmas condições da figura 16. Nesse caso, como o volume do reservatório já está em situação crítica, o operador pode diminuir a liberação de água de modo a não atingir o PNO C-D.

As características apresentadas acima podem inferir três tipos de situações de ADIP (Sólón, 2005). ADIP tipo I, ADIP tipo II e ADIP tipo III. O ADIP tipo I é definido como a duração de um ou mais períodos de excesso seqüenciais, seguidos de um período de déficit (figura 18), ou ainda é o tempo de t_0 até t_p . O ADIP tipo II é o inverso do ADIP tipo I, caracteriza-se por um ou mais períodos de déficit seguidos de um de excesso, ou o intervalo entre o tempo t_0 e t_p (figura 19).

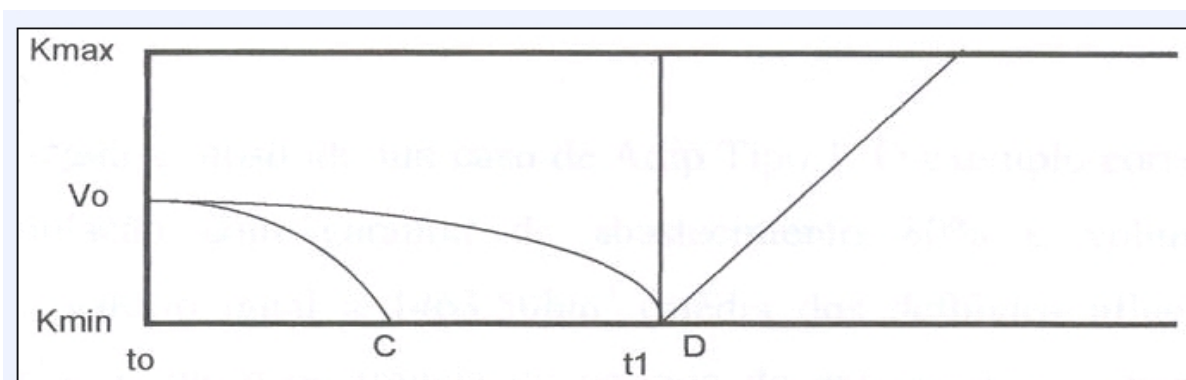


FIGURA 17 - Diagrama esquemático de uma fase de operação do reservatório associada a um período de déficit (denominada de Fase de Déficit).

Fonte: Sólón (2005).

O ADIP tipo III é definido como uma seqüência de excesso ou déficit, entre as quais não há uma mudança de fase de período crítico (déficit ou excesso). Exemplos dessas situações de ADIP, na escala mensal, utilizando séries sintéticas na operação do posto fluviométrico de Iguatu podem ser vistas em Sólón (2005). Entretanto, nesse seu estudo não foi diagnosticado quais ADIPs estão associados a anos de contrastes climáticos (tabela 1), e se estas são factíveis de previsão.

Nesse estudo a simulação da operação do reservatório (diagnóstico) para composição dos anos definidos anteriormente, foi feita para um período diário, pentadal e quinzenal. Isso foi devido o horizonte de análise a previsão ser semestral. Para o diagnóstico dos ADIPs, além da definição de Andenberg (1979), usou-se a extensão da classificação dos ADIPs definidas em Sólón (2005). Os ADIPs tipo I e II têm a mesma definição de Andenberg (1979). A ADIP tipo III foi dividida em dois tipos. Ficando o ADIP tipo III quando foi verificada uma seqüência de excesso sem mudança de fase no período de análise, e ADIP tipo IV seqüência de déficit sem mudança de fase no período de análise. Essa subdivisão é interessante devido à necessidade de identificar os casos de excesso para aumentar a vazão do reservatório e de deficiência para reduzir a sua vazão. O ADIP V se caracteriza por uma seqüência onde não é observado um ponto crítico (excesso ou déficit).

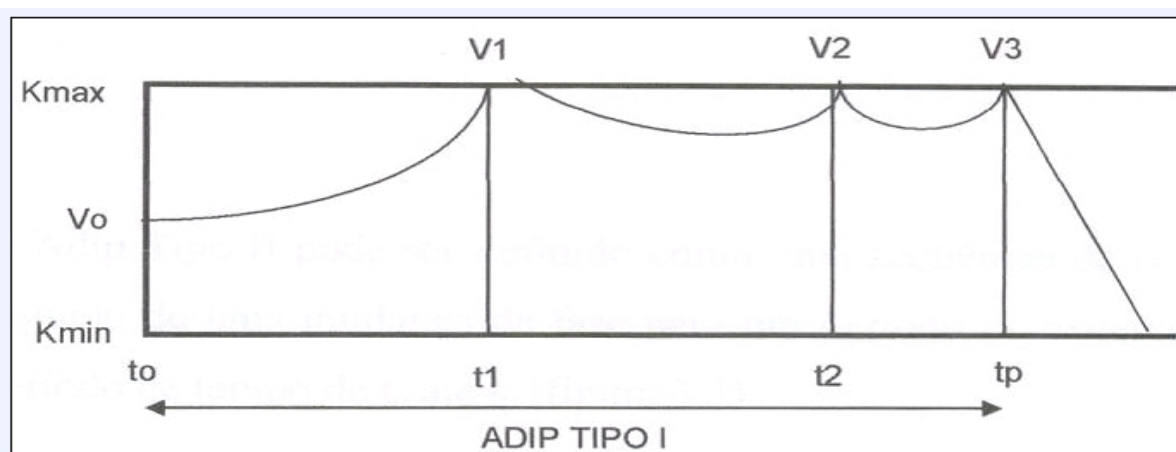


FIGURA 18 - Diagrama esquemático da ADIP tipo I.
Fonte: Sólón (2005).

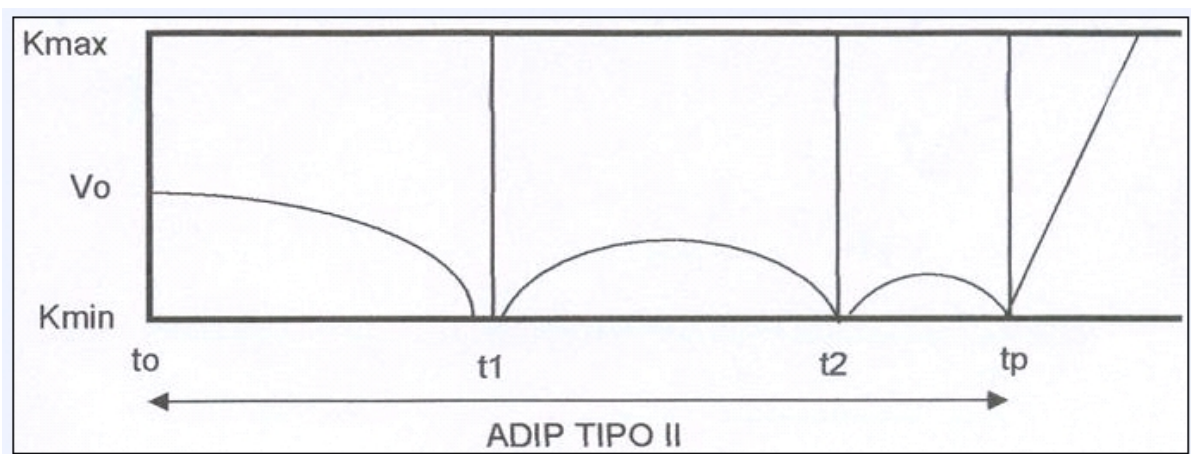


FIGURA 19 - Diagrama esquemático da ADIP tipo II.
Fonte: Sólón (2005).

7.11 - Simulação do reservatório

Para se diagnosticar os ADIPs e seu potencial de prognóstico nos anos de contrastes climáticos optou-se por executar a simulação de operação de um reservatório hipotético com as características do Açude Orós (1940 hm³ de capacidade máxima). A simulação foi executada a partir de 01 de janeiro até 31 de julho, considerando a escala diária, pentadal e quinzenal. O volume inicial V0 usado no reservatório, foi definido com valores de 0,25, 0,50 e 0,75 de sua capacidade máxima. Os dados como vazão regularizada foi usada o valor de 15 m³/s e a garantia de 90%. Nessa simulação quando os dados observados de vazão não foram observados, os mesmos foram substituídos pelos valores simulados pelo SMAP. Porém, para as estatísticas apresentadas na seção de resultados somente foram usados oito anos com dados diários completos nos meses de janeiro a junho (1971, 1972, 1975, 1976, 1977, 1978, 1979 e 1999).

A simulação do reservatório tem como base um balanço hídrico. A simulação objetiva investigar o comportamento do reservatório para certa gama de variáveis (volumes afluentes, precipitações, evaporação e uma determinada regra de retirada de água). A formulação do balanço hídrico em um reservatório tem a seguinte formulação.

$$V_{i+1} = V_i + (P_i - E_i) * \frac{1}{2} (A_{i+1} - A_i) + I_i - R_i - S_i \quad (10)$$

onde:

V_i e V_{i+1} = os volumes de água estocados no reservatório nos tempos i e $i+1$, respectivamente;

P_i = precipitação média sobre o espelho de água no Açude durante o mês (mm);

E_i = lamina média evaporada sobre o espelho de água no Açude durante o mês (mm);

A_i e A_{i+1} = as áreas do lago do reservatório nos tempos i e $i+1$, respectivamente (km^2);

I_i, R_i, S_i = representam os volumes afluentes ao reservatório, retirada do reservatório, e volume sangrado do reservatório (hm^3) nos tempos i , respectivamente;

$$R_i = \min\left(\frac{K}{2}, \frac{\mu}{2}\right)$$

A retirada considerada inicialmente foi $R_i = \min\left(\frac{K}{2}, \frac{\mu}{2}\right)$, ao final de cada semestre é analisado se o volume armazenado foi suficiente para atender a demanda, em caso negativo ocorreu uma falha. A regra básica de operação do reservatório tem como base as seguintes condições.

$$V_{i+1} = 0, \text{ se } V_i + (P_i - E_i) * \frac{1}{2} (A_{i+1} - A_i) + I_i - R_i - S_i \leq 0$$

$$V_{i+1} = V_i + (P_i - E_i) * \frac{1}{2} (A_{i+1} - A_i) + I_i - R_i - S_i \text{ se } 0 <$$

$$V_i + (P_i - E_i) * \frac{1}{2} (A_{i+1} - A_i) + I_i - R_i < K$$

$$V_{i+1} = K, \text{ se } V_i + (P_i - E_i) * \frac{1}{2} (A_{i+1} - A_i) + I_i - R_i \geq K$$

No final de 181 dias, 36 pênadas ou 12 quinzenas, tempo da simulação (01 de janeiro a 30 de junho) é verificado se o volume inicial assumido corresponde à frequência de falhas aceita (1-Ga). Se a frequência de falha for superior à requerida a retirada é reduzida. Caso contrário o valor da retirada é aumentado. Para ambos os casos a operação é simulada novamente.

No nosso estudo a garantia oferecida ao abastecimento foi diária, sendo

estimada pela relação: $f_s = \left(\frac{n_s}{N_s}\right) * 100$, sendo f_s frequência de falhas diárias em porcentagem, n_s número de dias ao longo dos seis meses (janeiro a junho) em que o reservatório deixou de atender a demanda e N_s o número total de dias de simulação.

Quanto à entrada e saída de água do reservatório (influxos e efluxos), como citado em Sólón (2005) duas hipóteses podem ser consideradas. i) ocorrências de influxos e efluxos no reservatório em tempos distintos (modelo mutuamente exclusivo) e ii) ocorrências simultânea de influxos e efluxos (modelo simultâneo).

No modelo mutuamente exclusivo a regra de retirada de água do reservatório obedece às condições:

$$\begin{array}{lll} Z_t = 0 & \text{quando} & Z_t + X_t \leq M \\ Z_{t+1} = Z_t + X_t - M & \text{quando} & M < Z_t + X_t < K \\ Z_{t+1} = K - M & \text{quando} & Z_t + X_t \geq K \end{array}$$

Considerando o modelo simultâneo, a regra de retirada é representada por:

$$\begin{array}{lll} Z_t = 0 & \text{quando} & Z_t + X_t \leq M \\ Z_{t+1} = Z_t + X_t - M & \text{quando} & M < Z_t + X_t - M < K \\ Z_{t+1} = K - M & \text{quando} & Z_t + X_t - M \geq K \end{array}$$

onde: Z_t é o volume da reserva no início do tempo t ; Z_{t+1} é o volume de reserva no final do tempo $t+1$, X_t é o influxo a reserva no tempo t ; M é a retirada anual da reserva e K é a capacidade do reservatório. Para este estudo o balanço hídrico do reservatório utilizou o modelo simultâneo.

Como a evaporação líquida sobre o lago do Açude foi usado à evaporação mensal observada em Iguatu, para dados diários esse valor foi dividido pelo número de dias do mês. Para o caso pentadal e quinzenal esses valores diários foram acumulados. A operação do reservatório foi feita apenas para o primeiro semestre do ano, pois o modelo dinâmico não foi simulado para o segundo semestre do ano.

As figuras 20a e b mostram uma síntese do acoplamento da modelagem dinâmica da atmosfera e a hidrológica resultando com a operação do reservatório base do estudo proposto e a incerteza associada a cada processo.

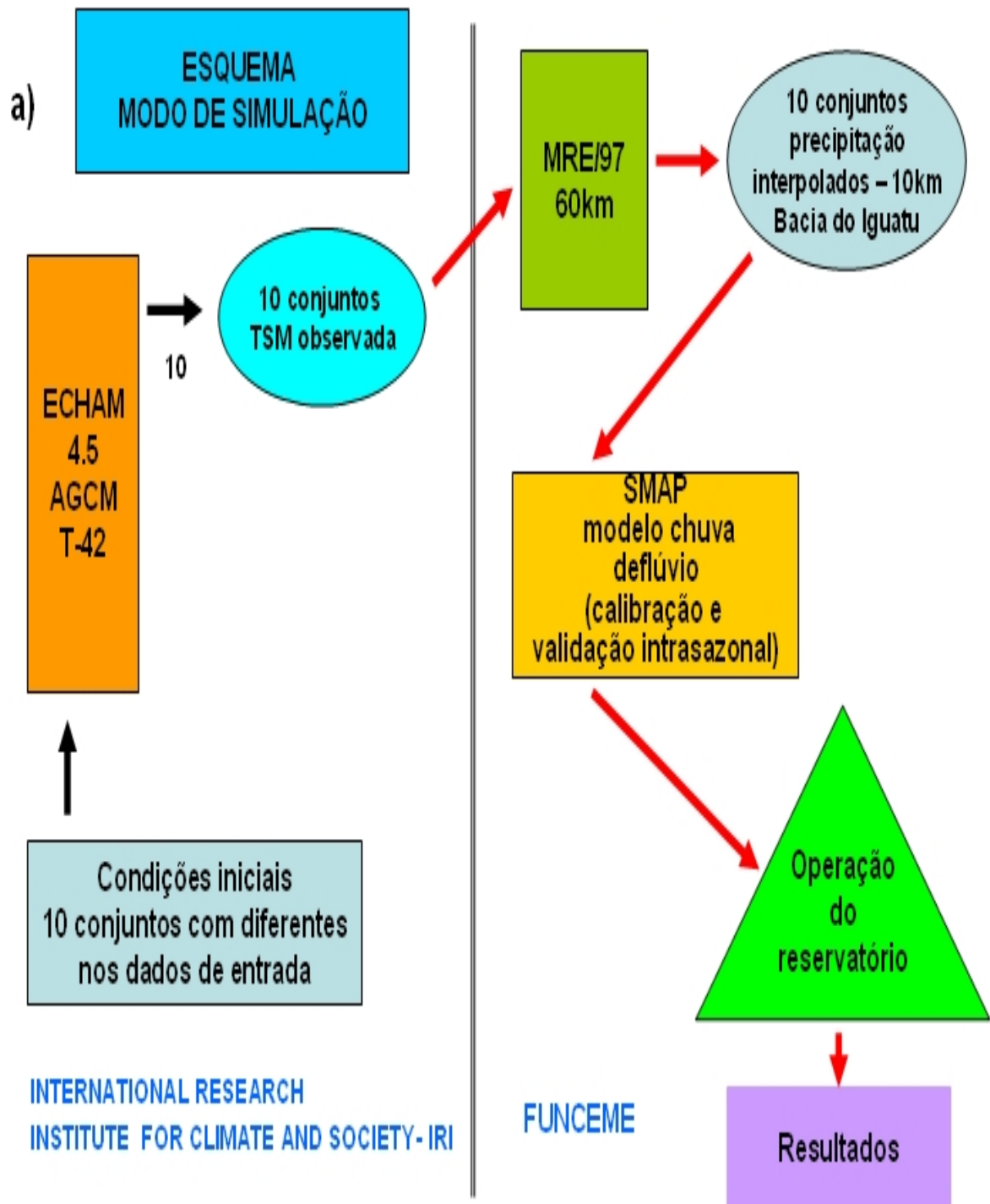




FIGURA 20 - a) Esquema representativo do acoplamento entre a modelagem dinâmica da atmosfera e a modelagem hidrológica com aplicação final na operação de um reservatório hídrico. b) Incertezas associadas em cada processo da modelagem dinâmica em cascata.

7.12 Critérios de avaliação estatística do regime hídrico observado e simulado

Várias medidas de desempenho podem ser usadas para comparar resultados e seus erros associados entre variáveis observadas e simuladas/previstas. Diversas medidas de erros podem ser usadas individualmente como índices de desempenho de modelos atmosféricos e outros, cada uma com suas vantagens e desvantagens, entretanto conforme Weber *et al.* (1982), o uso de medidas de erro isoladamente pode ser uma forma inadequada de estimativa da avaliação de resultados, e o emprego de várias medidas de erro em conjunto com outras métricas costuma ser um método mais justo (MARIA, 2007).

Com esse intuito a seguir, são apresentados os índices estatísticos que compõem a medida de desempenho dos modelos para uma eventual comparação. Tais índices foram selecionados visando identificar quão os resultados do MRE/97 ou suas correções, aplicados no modelo SMAP de transformação chuva vazão, estão mais próximos das observações. Considerando que as observações são as perfeitas realidades, pois não são considerados erros nas medidas (MARIA, 2007).

As métricas calculadas são o *bias* estatístico, o Erro Absoluto Médio, o Erro Quadrático Médio, a razão entre os desvios padrão modelado e observado, Erro absoluto Médio dos Desvios, o Erro Quadrático Médio dos desvios, o Índice de Concordância e o Coeficiente de Correlação.

Bias (Viés) estatístico (b) – É dentre as métricas consideradas aqui, a mais simples e menos representativa. É dado pela média da diferença entre a série modelada (simulada) e a observada, e indica o erro sistemático (subestimativa ou superestimativa).

$$b = \frac{1}{N} \sum (V_{o,i} - V_{s,i}) \quad , \quad (11)$$

onde V_o é o valor da variável observada, V_s é o valor da variável simulada e N é o período de tempo usado no cálculo. O *bias* pode ter qualquer valor real, onde os valores mais próximos de zero, por definição, representam menor erro. É medido com a mesma unidade usada nas séries.

Erro Absoluto Médio (EAM) - É considerada uma medida de erro mais justa. Na mesma os desvios negativos não se cancelam com os positivos, o que o torna mais representativo que o *bias*.

$$EAM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |V_{o,i} - V_{s,i}| \quad (12)$$

onde V_o é o valor da variável observada e V_s é o valor da variável simulada/prevista. Pela definição, só pode assumir valores não-negativos, sendo que quanto menor o valor maior semelhança entre as séries. É medido com a mesma unidade usada nas séries.

Erro Quadrático Médio (EQM) – É definido pela soma dos quadrados das diferenças entre resultados simulados/previstos e as observações.

$$EQM = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{o,i} - V_{i,s})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

onde V_o é o valor da variável observada e V_s é o valor da variável simulada/prevista. É a métrica de erro mais comumente usada. É muito sensível a grandes desvios entre os valores das séries comparadas, o que se torna mais relevante quando se trata de avaliação de grandes erros. Pode assumir qualquer valor não negativo e tem a mesma unidade de medida das séries. É maior a semelhança entre as séries simulada/prevista e a observada quanto mais próximo de zero for o seu valor.

Uma estimativa de erro freqüentemente sugerida (BUCKLEY *et al.*, 2004, PIELKE, 2001, KEYSER e ANTHES, 1977) é a comparação entre os desvios padrão do simulado/previsto e o observado. A síntese é que medidas parecidas de desvio padrão estão associadas à similaridade entre as séries.

$$\sigma_{obs} = \left[\frac{1}{N} \sum (V_{i,o} - \bar{V}_o)^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

$$\sigma_{sim} = \left[\frac{1}{N} \sum (V_{i,s} - \bar{V}_s)^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

onde, onde V_o é o valor da variável observada e V_s é o valor da variável simulada/prevista, onde \bar{V}_s e \bar{V}_o indicam o valor da média DA variável simulada/prevista e observada. Com o cálculo dos desvios padrão pode-se calcular a razão entre os desvios como:

$$R_a = \frac{\sigma_{obs}}{\sigma_s} \quad (16)$$

Uma maior semelhança entre os desvios padrão é representada por uma razão mais próxima da unidade. Esta razão é adimensional, podendo assumir qualquer valor não negativo.

Steyn e Mckendry (1988) mencionam que possível causa de erros sistemáticos em resultados de modelagem, é devida em geral a formulação inadequada dos modelos, imprecisão causada pela discretização espaço-temporal e imprecisão dos próprios instrumentos usados na coleta dos dados observados. Segundo Jolliffe e Stephenson (2003), tais erros podem ser reduzidos com a remoção do *bias* estatístico, ou seja, quando as medidas de erros são calculadas apenas para os desvios das séries. A seguir, são apresentados reformulações de algumas métricas para a eliminação do *bias*. Erro Absoluto Médio dos Desvios (EAMD) – Segue a mesma definição do EAM, porém usa os desvios entre as séries.

$$EAMD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |V'_{o,i} - V'_{s,i}| \quad (17)$$

onde $V'_{o,i}$ é o valor do desvio variável observada e $V'_{s,i}$ é o valor do desvio da variável simulada/prevista. Analogamente pode-se definir o erro quadrático médio dos desvios.

$$EQMD = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V'_{o,i} - V'_{s,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

Estas medidas de erros com o uso dos desvios das séries têm as mesmas propriedades das formulações das séries originais.

Willmott (1982) apresenta o Índice de Concordância (IC), mencionando que avaliações de erro feitas com o EAM e o EQM não informam o tamanho relativo à diferença, ou mesmo a natureza dessas diferenças. Este novo índice (IC) é dado pela seguinte formulação.

$$IC = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N |V_{o,i} - V_{s,i}|^2}{\sum_{i=1}^n \left(\left| V_{o,i} - \bar{V}_s \right| + \left| V_{s,i} - \bar{V}_s \right| \right)^2} \right) \quad (19)$$

As definições são as mesmas das formulações anteriores. Nota-se que o *bias* não é explicitamente eliminado. Entretanto, a presença indireta do viés no denominador e numerador atua como uma remoção. É adimensional e segundo Buckley *et al.* (2004), pode assumir valores entre 0 e 1, tendo maior similaridade entre as séries observadas quando o mesmo se aproximar da unidade.

Coeficiente de Correlação (r) - De acordo com Jolliffe e Stephenson (2003) é a mais relevante métrica de comparação de todas as apresentadas. Sua fórmula é mostrada abaixo.

$$r = \frac{1}{N} \sum \frac{V'_{o,i} V'_{s,i}}{\sigma_o \sigma_s} \quad (20)$$

Pode assumir valores entre -1 e 1 indicando respectivamente perfeita anti-correlação e correlação. Se for igual a zero indica total ausência de correlação. O r tem a capacidade de detectar a correspondência entre as séries comparadas, sendo insensível a erros de *bias*. Segundo Hopkins (2000) os coeficientes de correlação foram classificados da seguinte maneira: 0,0 a 0,1 (muito baixo), 0,1 a 0,3 (baixo), 0,3 a 0,5 (moderado), 0,5 a 0,7 (alto), 0,7 a 0,9 (muito alto) e 0,9 a 1,0 (quase perfeito).

Com os resultados dos volumes na simulação do reservatório foram calculadas tabelas de contingência (WILKS, 1995). Essas tabelas de contingência levaram em consideração os volumes iniciais considerados nas simulações de 0,25, 0,50 e 0,75 da capacidade máxima do reservatório. Na tabela 2 é mostrada um exemplo da tabela de contingência para um volume inicial de 0,25 do volume total. Os freq(o,s) significam as frequências de ocorrência simultâneas quando os volumes observados e simulados/previstos estiverem dentro de cada intervalo de volume considerado. Se todas as ocorrências simuladas/previstas ocorressem dentro dos mesmos intervalos o valor da diagonal principal seria igual 1 ou 100%.

TABELA 2 – Diagrama esquemático mostrando uma tabela de contingência entre dados simulados/previstos e observados.

Obs	Simulado/Previsto			
	<=0,25	>0,25<=0,50	>0,50<=0,75	>0,75
<=0,25	freq(o,s)	freq(o,s)	freq(o,s)	freq(o,s)
>0,25<=0,50	freq(o,s)	freq(o,s)	freq(o,s)	freq(o,s)
>0,50<=0,75	freq(o,s)	freq(o,s)	freq(o,s)	freq(o,s)
>0,75	freq(o,s)	freq(o,s)	freq(o,s)	freq(o,s)

8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os resultados aqui apresentados referem-se a uma média na bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu. Como mencionado na seção de metodologia, os resultados de simulações/previsões feitas por modelagem dinâmica geralmente apresentam erros sistemáticos necessitando de correções. A figura 21 mostra uma comparação entre os valores médios diários de precipitação (1971-2000) simulados pelo MRE sem a correção e com a correção com o uso da PDFs e o valor observado. É notável que os valores corrigidos são mais próximos dos valores médios observados. A correlação entre os dados sem correção e com a correção com os observados foi de 0,15 e 0,63, respectivamente.

Outra característica interessante nessa figura é que os valores corrigidos pelas PDFs conseguem acompanhar o ciclo sazonal da precipitação, fato que os dados simulados pelo MRE não reproduziram. Como os dados corrigidos, em média, são mais fidedignos com as observações, os resultados apresentados, que serviram de base de comparação com as observações em grande parte se deteram aos dados corrigidos pelas PDFs.

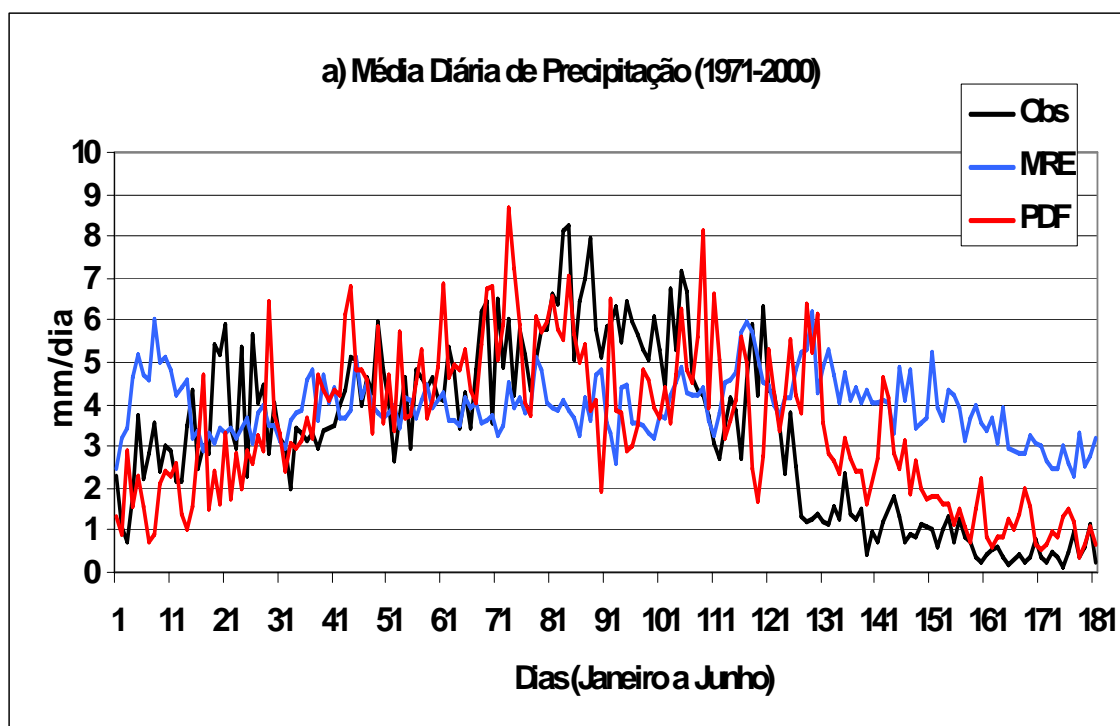
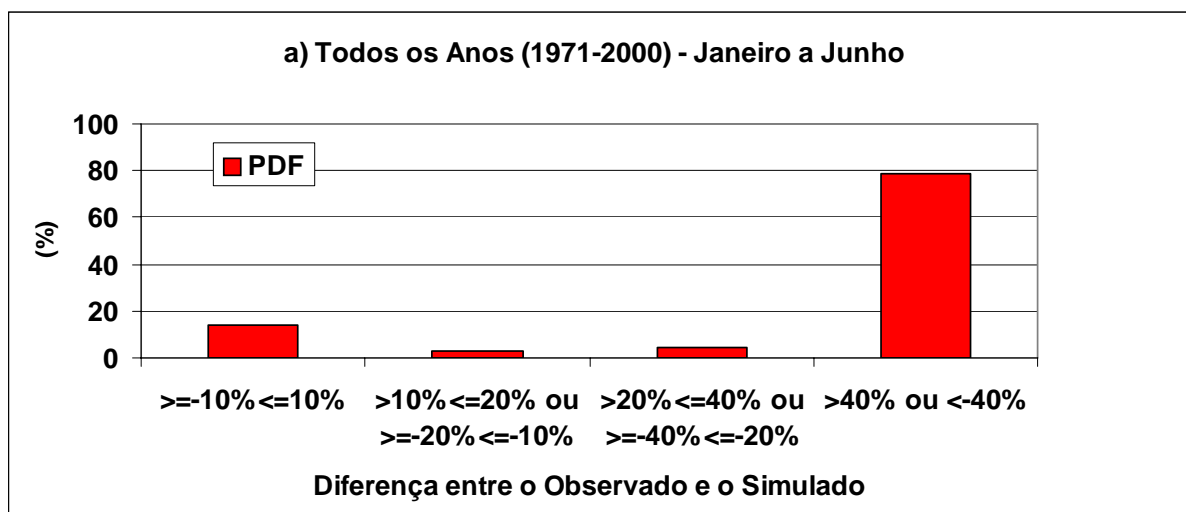


FIGURA 21 - Precipitação, média diária (mm) para o período de 1971-2000 na bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu.

8.1 Variabilidade intrasazonal da precipitação

Como a precipitação é a última grandeza quantitativa a ser calculada em modelos dinâmicos, resultando da integração de vários processos físicos que são resolvidos ou parametrizados como citado anteriormente, a sua comparação quantitativa com a precipitação observada sempre apresenta erros consideráveis. A seguir é feita uma comparação dos desvios em relação ao observado diário (janeiro a junho) para os 30 anos (1971-2000) e para anos Normais, de La Niña e de El Niño para os dados com correção pelas PDFs. Quatro índices foram criados: i) simulação considerada boa $DIF=ABS(>=-10\% \leq 10\%)$, regular $DIF=>10\% \leq 20\%$ ou $>=-20\% < -10\%$, ruim $DIF=>20\% \leq 40\%$ ou $>=-40\% \leq -20\%$ e muito ruim $> 40\%$ ou $< -40\%$. DIF significa a diferença entre o valor da precipitação observada e a simulada em percentual.

A figura 22 mostra essa comparação, nota-se que as maiores freqüências acima de 70%, mostram mesmos com a correção nos dados erros quantitativos acima de 40%, para todo o período de análise (1971-2000). Nestes anos de contrastes climáticos, os dados corrigidos pelas PDFs tiveram um percentual, embora não excedendo 20%, de dias com o índice na categoria de boa simulação. Análises feitas para cada um dos 10 membros do MRE (figuras não mostradas) apresentaram características similares às observadas na figura 18. Para totais pentadais, quinzenais e mensais as características desses percentuais foram similares em configuração, com acréscimos da ordem de 15% a 20%, nestas categorias, respectivamente. Estes, percentuais, ficaram em torno de 35%, 25% em média, nas categorias de boa e regular simulação.



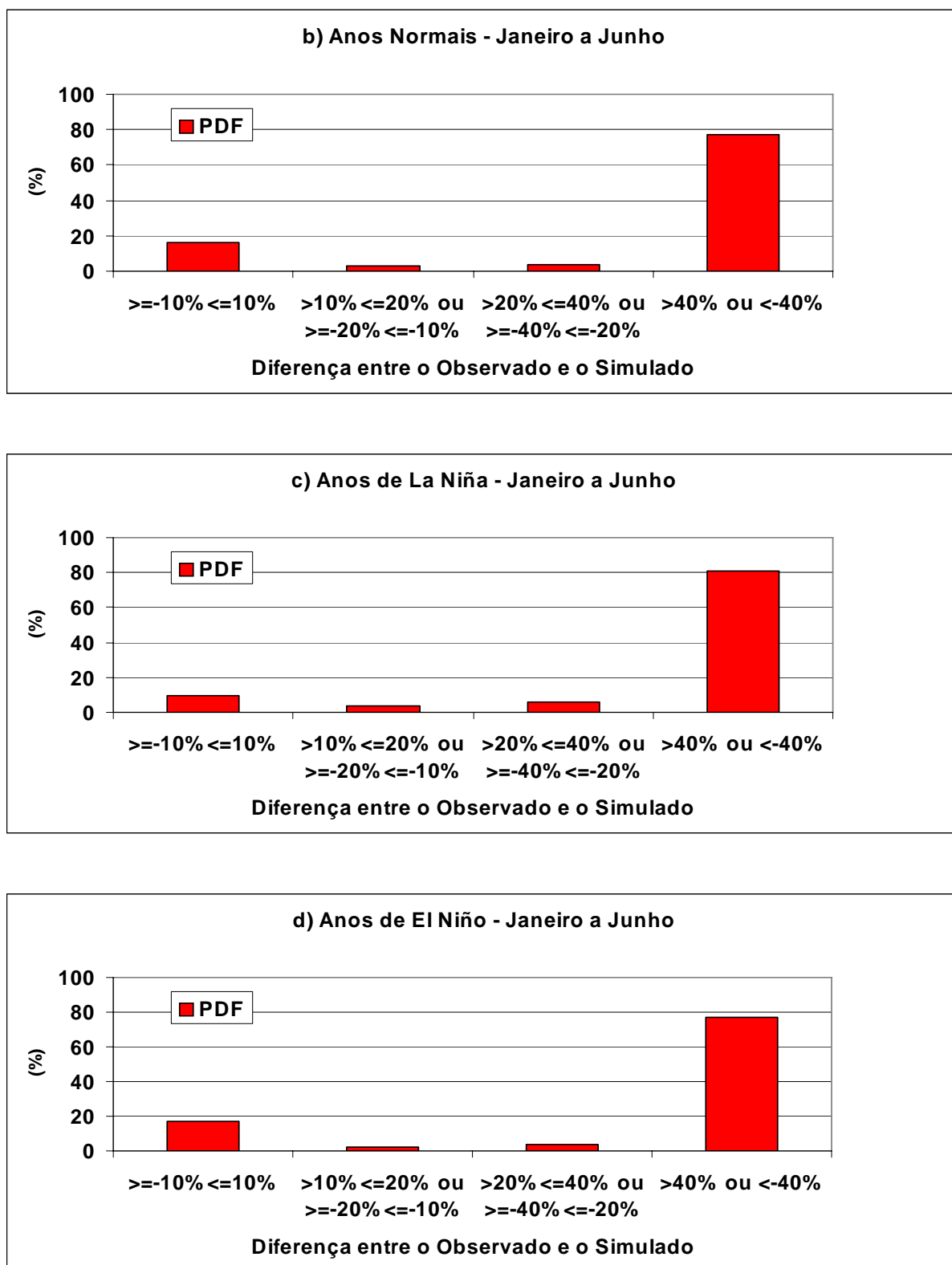


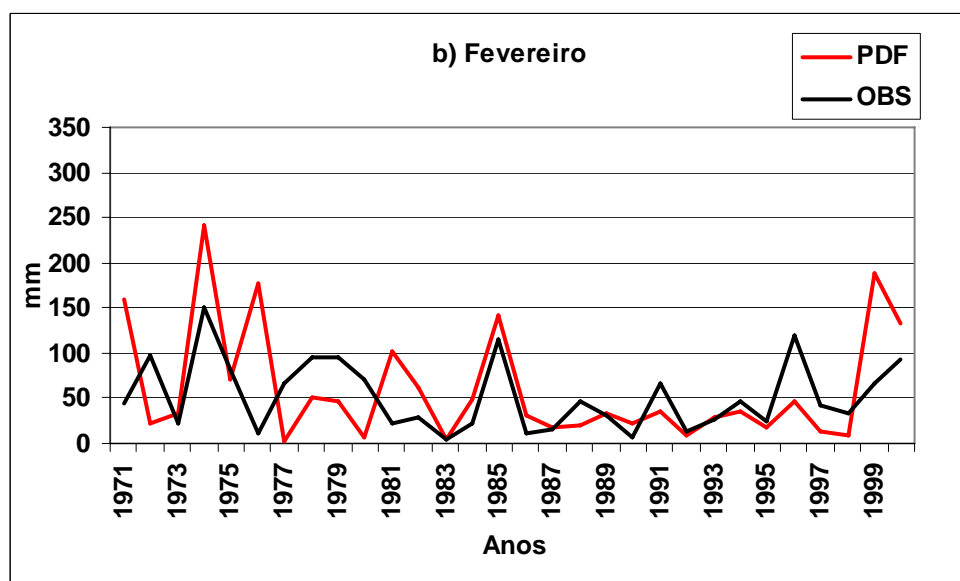
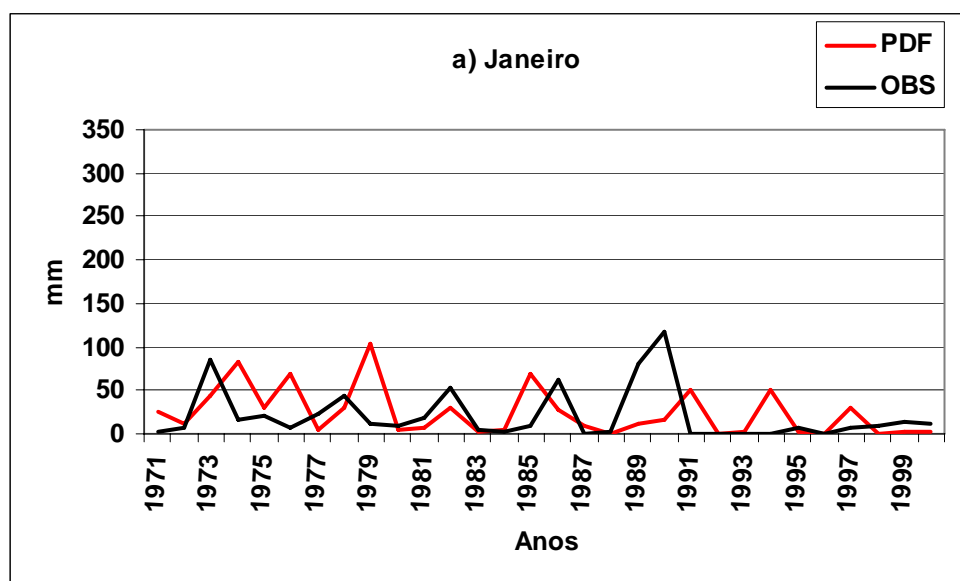
FIGURA 22 - Percentual de dias entre os meses de janeiro a junho (1971-2000) inserido nas referidas classes de percentuais (diferença quantitativa entre o observado e o simulado). a) período (1971-200), b) anos Normais, c) anos de La Niña e d) anos de El Niño.

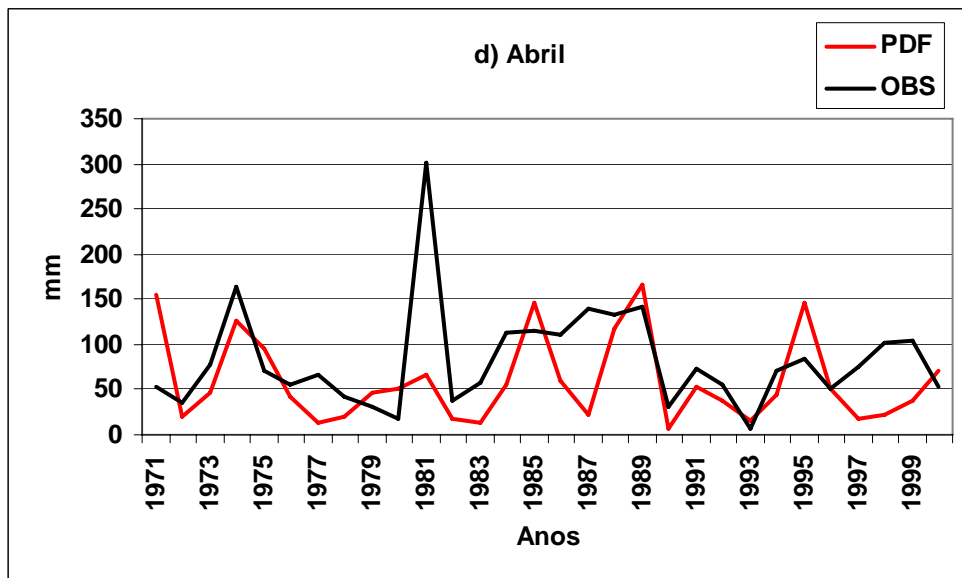
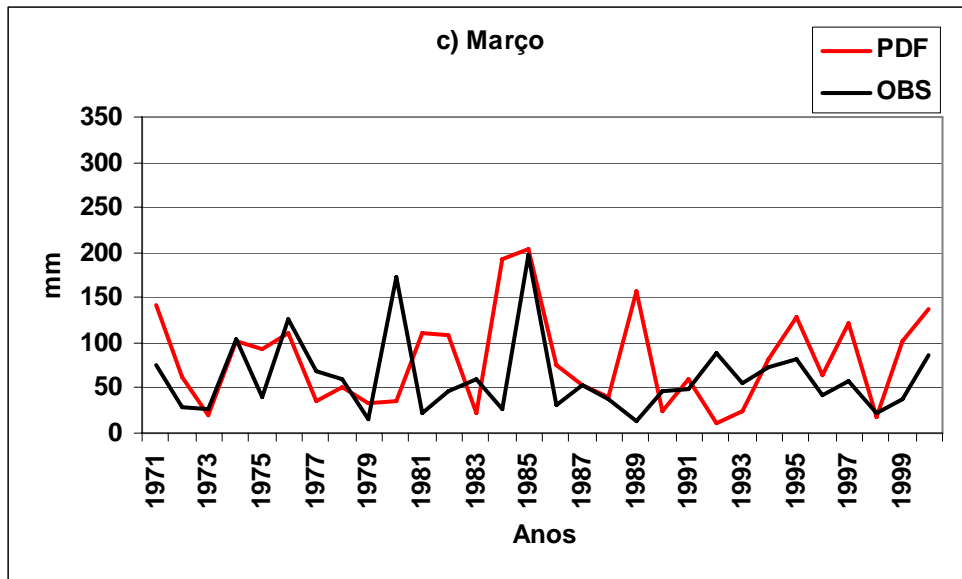
Diferenças entre valores de precipitação diárias observadas e obtidas por modelagem dinâmica podem ter várias explicações. Simulações/previsões de precipitação por esse tipo de modelagem dependem das características de cada modelo numérico (parametrizações físicas, etc). Para regiões tropicais, estas questões estão ligadas no aspecto de como estes modelos dinâmicos resolvem à escala de nuvens convectivas e suas interações com a atmosfera (ARAKAWA, 2004). Marengo *et al.* (2005), mostrou que para a bacia do Rio São Francisco, o MCGA do Centro de Previsão e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) apresentou simulações diárias de precipitação sempre acima da observada, no período de 2001-1951. Previsões de precipitação para a bacia do Rio São Francisco foram feitas por Marengo *et al.* (2005) para o período de 1998-2001. Seus resultados mostraram que o MCGA do CPTEC/INPE superestimou sistematicamente a chuva em toda a bacia, enquanto as previsões dos modelos regionais ETA e *Brazilian Rams Atmospheric Model System (BRAMS)* não apresentaram erros sistemáticos, embora suas previsões tenham sido muito semelhantes às geradas pelo modelo global com correção pela curva de distribuição de probabilidade acumulada diária.

A precipitação na bacia do posto fluviométrico do Iguatu na primeira quinzena dos meses de janeiro a junho observada, simulada pelo MRE corrigida pela técnica das PDFs é mostrada na figura 23. Para o mês de janeiro, como visto nos períodos pentadais (figuras não mostradas), o MRE simulou mais precipitação do que a observada, representando razoavelmente a variabilidade interanual com alguma defasagem até os anos 90, e superestimando a precipitação após os anos 90 (figura 23a). Vale mencionar que os picos de máximos não foram capturados pela modelagem dinâmica, mesmo com a correção nos dados. No mês de fevereiro, os valores do MRE corrigidos pelas PDFs foram mais consistentes com os valores observados entre os anos de 1985 e 1995 (figura 23b). O MRE não conseguiu simular com melhor desempenho em intensidade a precipitação mais excessiva nos anos de 1979, 1996.

Em março a correção pela PDFs, não conseguiu capturar os máximos ano-ano observados. Diferenças mais marcante na intensidade da precipitação foram observadas nos anos de 1980 e 1989. Nos meses de abril e maio, ocorreu uma melhor identificação em fase (mesma direção das curvas simuladas e observadas) e proximidade entre esses valores quinzenais (figuras 23d e 23e). Entretanto, Alguns máximos mais intensos e intermediários também não foram bem capturados mesmo com as correções. Em junho, como já observado nos dados pentadais, a configuração

entre os totais corrigidos do MRE e a precipitação observada tiveram valores mais aproximados (figura 23f).





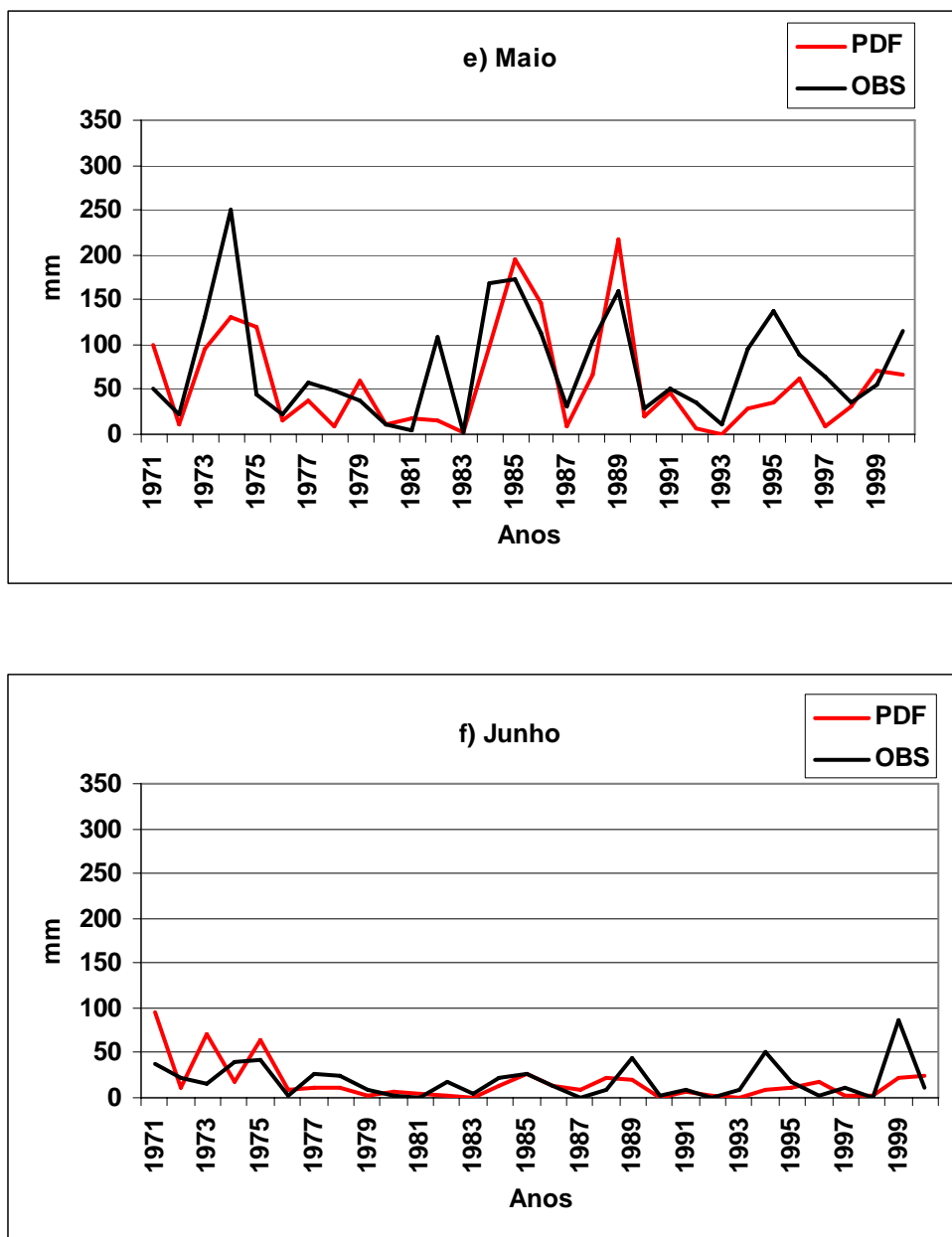


FIGURA 23 - Variabilidade interanual na primeira quinzena da precipitação (mm) observada (obs) e simulada pelo modelo regional com correção pela técnica com base nas PDFs a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio e f) junho.

A figura 24 mostra a variabilidade interanual da segunda quinzena da precipitação na bacia hidrográfica do posto pluviométrico do Iguatu nos meses de janeiro a junho observada e simulada pelo MRE corrigida pelas PDFs. Para janeiro, nesta segunda quinzena não foi verificado um predomínio de erro sistemático. Valores simulados pelo MRE e sua correção pela técnica dos PDFs, em grande parte dos anos, apresentou um bom desempenho com valores próximos dos observados, principalmente

entre 1971-73 e 1978 a 1983 (figura 24a). Alguns máximos de chuvas nos anos também não foram bem simulados (1974, 1976, 1985, 1995).

Em fevereiro, os valores corrigidos do MRE superestimaram os observados entre 1971 a 1985 e subestimaram a partir dos anos 90 (figura 24b). Máximos de precipitação como em 1992 e 1997 não foram bem simulados. Em março (figura 24c) valores corrigidos mais próximos as observações verificaram-se nos anos 70 e entre 1987 e 1997, entretanto alguns picos não foram bem simulados (1981, 1985 e 2000). Nos meses de abril e maio (figuras 24d e 24e), foi verificado uma melhor consistência em fase entre as curvas observada e a simulada pelo MRE corrigida pelas PDFs. Em junho o MRE e os seus valores corrigidos mantiveram, nesta segunda quinzena, uma característica similar à observada na primeira quinzena (figura 24f).

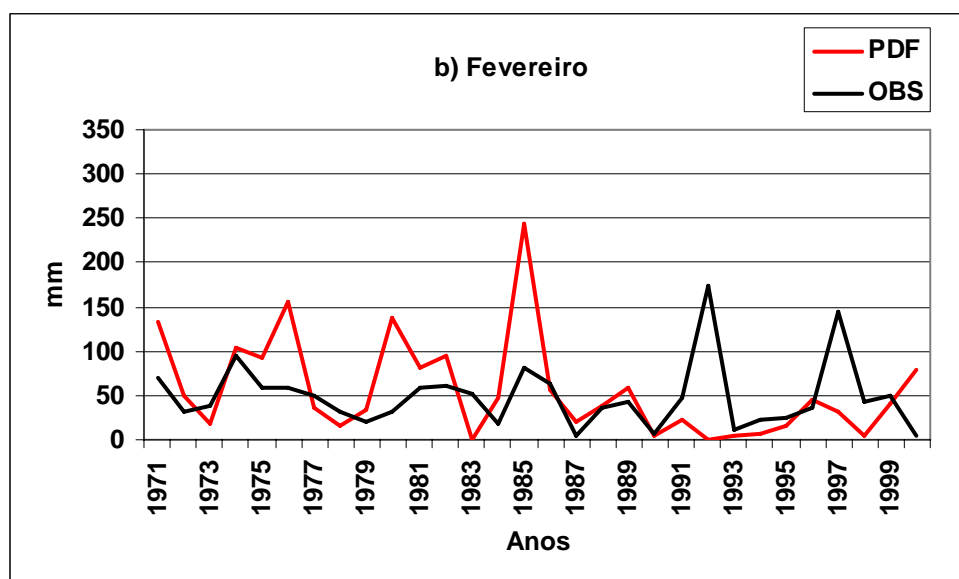
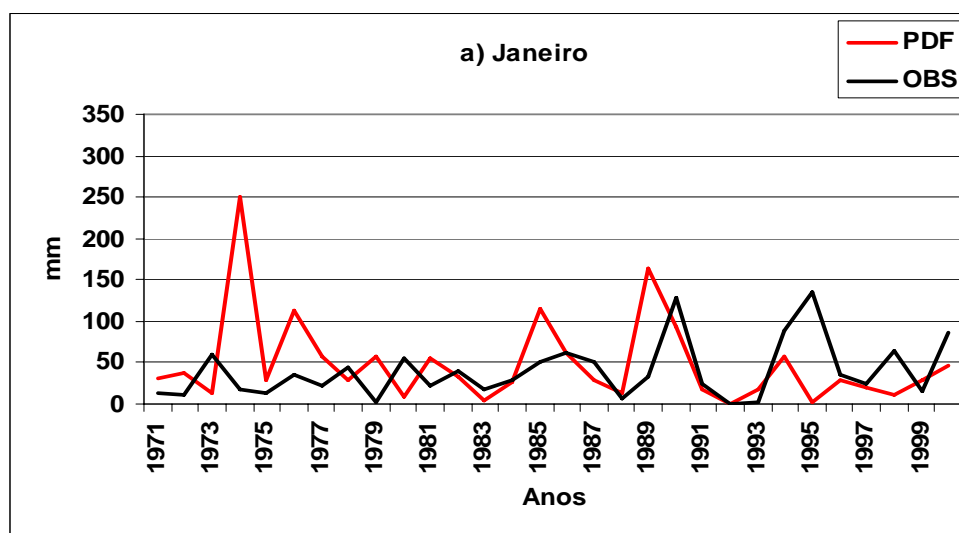
Uma das possíveis causas das simulações do MRE não representarem melhor curso da distribuição interanual de precipitação nas escalas pentadais e quinzenais, com melhor desempenho podem ter algumas razões. A primeira seria uma não assimilação de condições dinâmicas de superfície sobre o NEB (mudanças bruscas, por exemplo, na vegetação típica da região – caatinga), que deve mudar o balanço de massa, momento, radiação e trocas entre a superfície atmosfera. Essas trocas interferem diretamente na distribuição de precipitação ao longo do NEB. Nessas simulações do MRE de 1971-2000 foi considerada uma vegetação homogênea (savana) em toda a área do NEB. Além disso, as características pedológicas do NEB também foram consideradas homogêneas. Essas características podem ter influência significativa na precipitação a ser simulada por modelos dinâmicos (SUN *et al.* 2005).

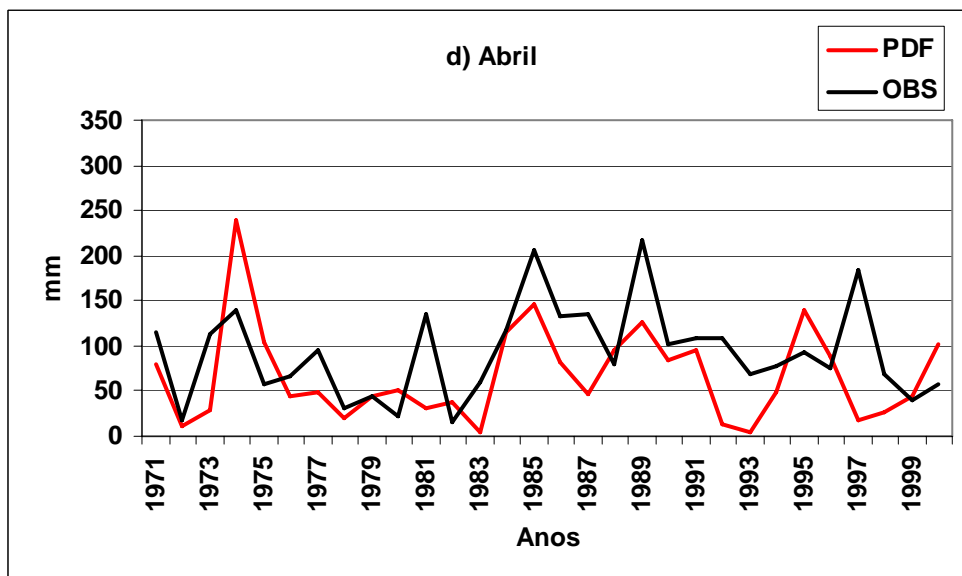
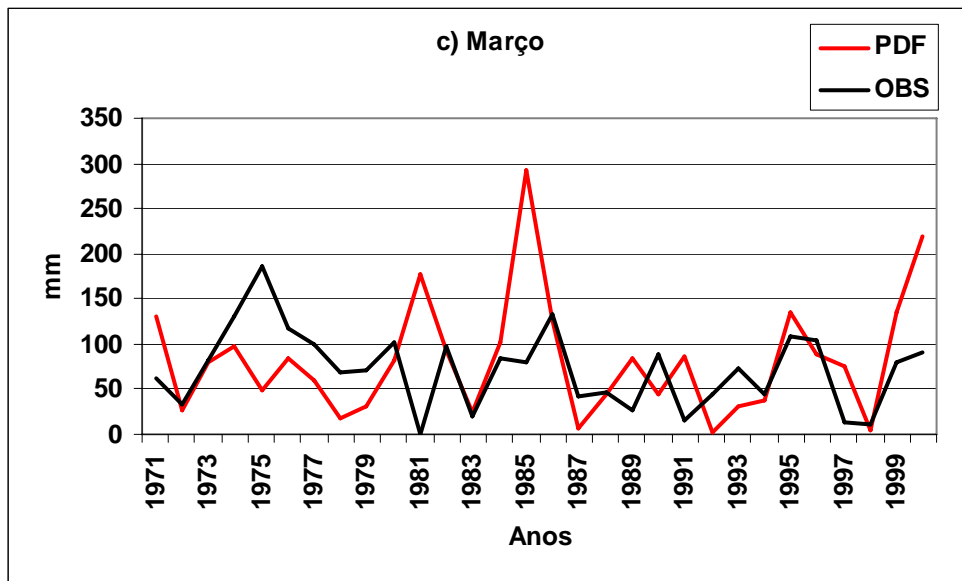
A grande diferença quantitativa em alguns meses deve estar ligada às características da modelagem climática. A primeira, é que como condição de contorno para essa simulação em análise do MRE é a TSM, com base mensal, a mesma explica muito pouco das precipitações intrasazonais (períodos abaixo da escala de três meses), da ordem de menos de 15% da variabilidade da precipitação nesses meses (ALVES *et al.* 1993). A segunda refere-se aos sistemas que causam chuvas ao longo desses meses são mais transientes (Vórtices Ciclônicos de Ar Superior –VCAS, Ondas de Leste e a atuação de complexos convectivos mesoescala), atuando em geral abaixo da escala de um mês. Estes sistemas são de difícil previsão em modelos dinâmicos rodados em escala sazonal (simulação em geral para períodos acima de um mês).

Essa última questão parece ser crucial, visto que nestas rodadas climatológicas o modelo assimila apenas uma vez uma condição chamada de “análises”

(dados observados em superfície e na atmosfera ou mesclados com dados de satélites) para ser inicializado.

Resultados mais recentes como os de Quian *et al.* (2003) e Seth *et al.* (2004) mostraram que a reinicialização pode melhorar o desempenho de MRs em simular quantitativamente a distribuição de precipitação. A resolução da TSM pode também ajudar na melhora futura de resultados de modelagem intrasazonal. Sun *et al.* (2005), sugerem que valores de TSM inferiores a 1° de latitude versus longitude, principalmente no Atlântico Tropical, poderiam ser usados para testar esses possíveis benefícios, além de os mesmos serem incorporados no modelo, por exemplo, em vez da escala mensal, na base semanal.





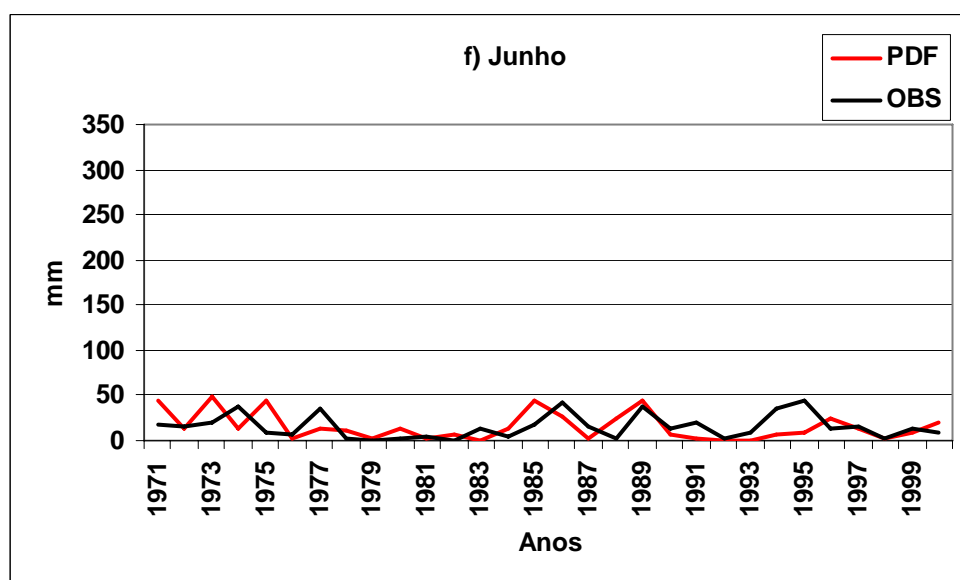
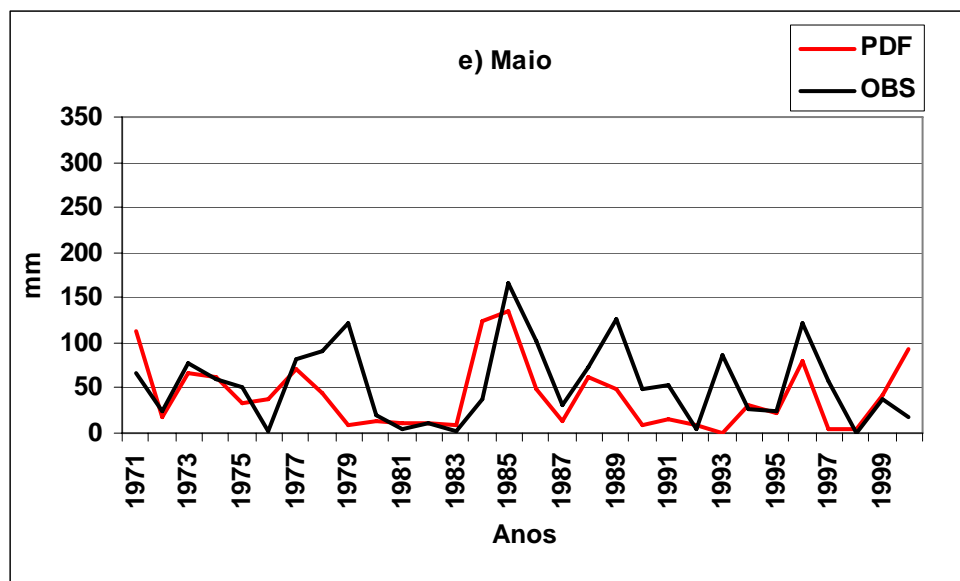
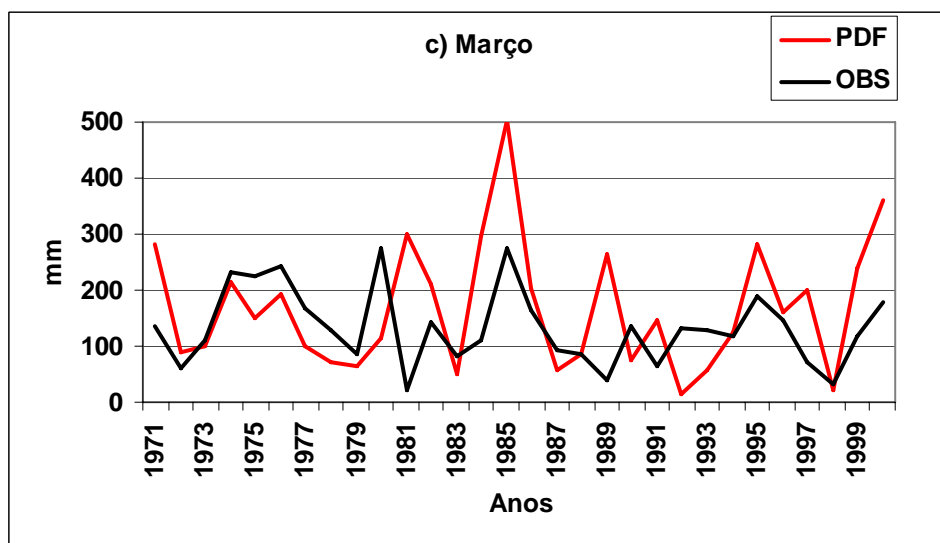
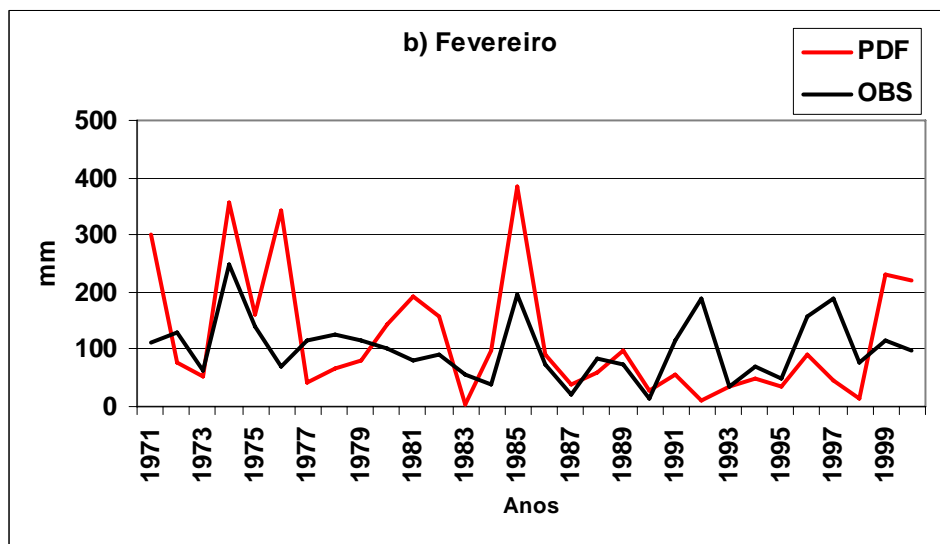
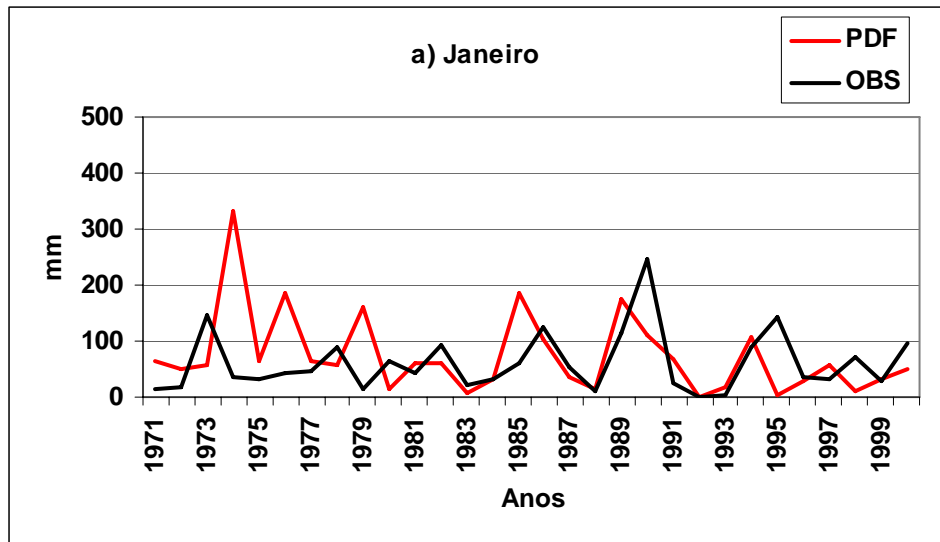


FIGURA 24 - Variabilidade interanual na segunda quinzena da precipitação (mm) observada (obs) e simulada pelo modelo regional com correção pela técnica com base nas PDFs a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio e f) junho.

A figura 25 mostra a variabilidade interanual mensal (janeiro a junho) para a precipitação observada e a simulada pelo MRE com correção via PDFs. Uma análise observacional mostra que o MRE corrigido apresentou um melhor desempenho na variabilidade interanual nos meses de abril, maio e junho, e pior nos meses de janeiro, fevereiro e março.



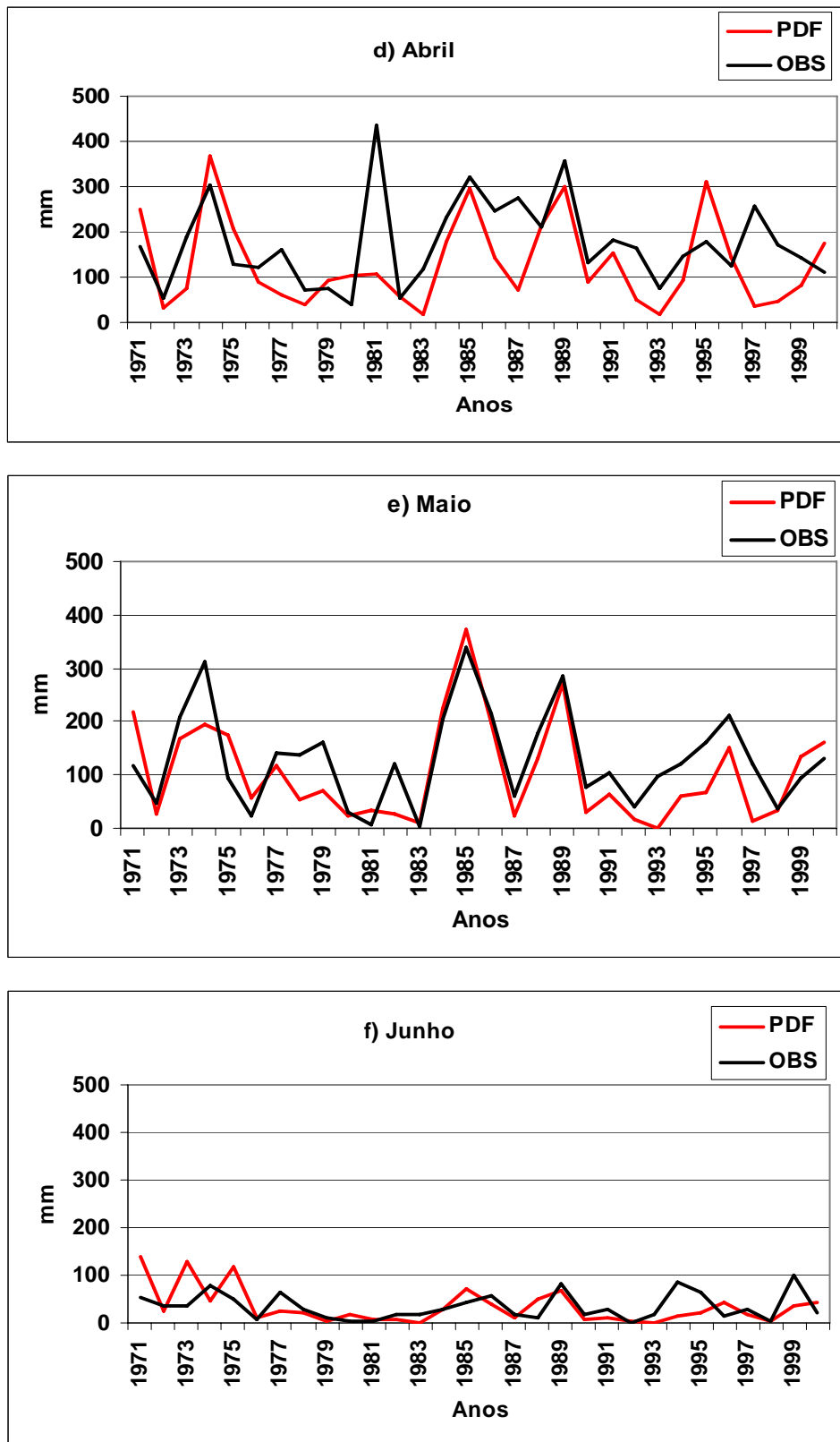


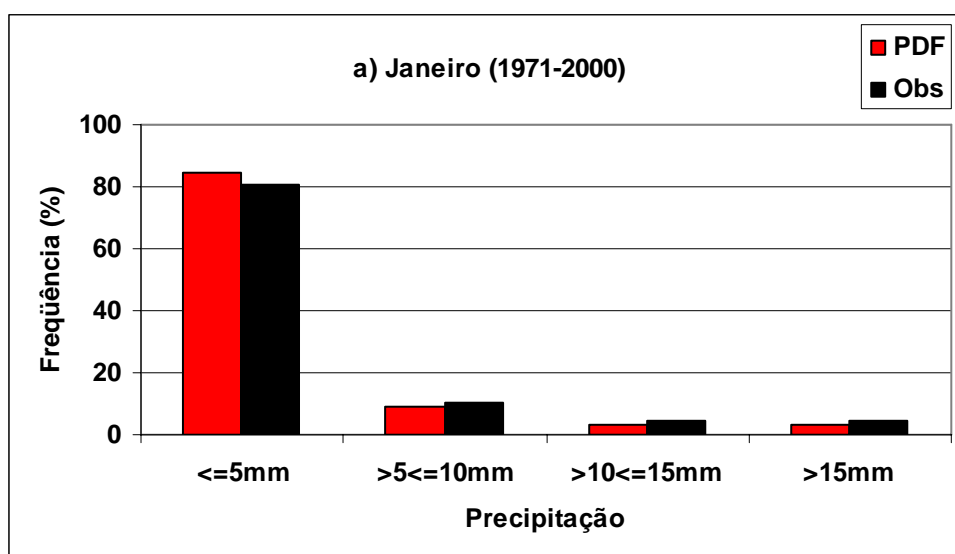
FIGURA 25 - Variabilidade interanual mensal da precipitação (mm) observada (obs) e simulada pelo modelo regional com correção pela técnica com base nas PDFs a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio e f) junho.

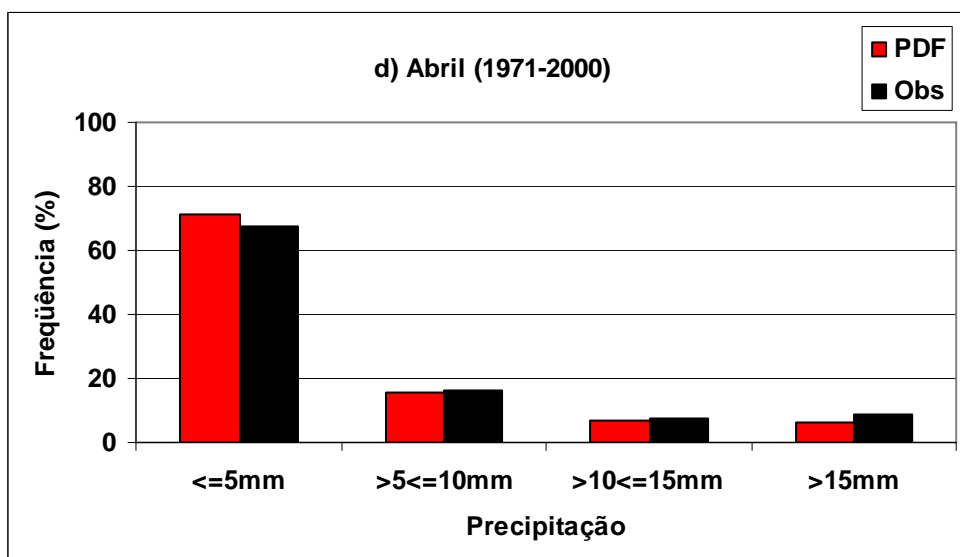
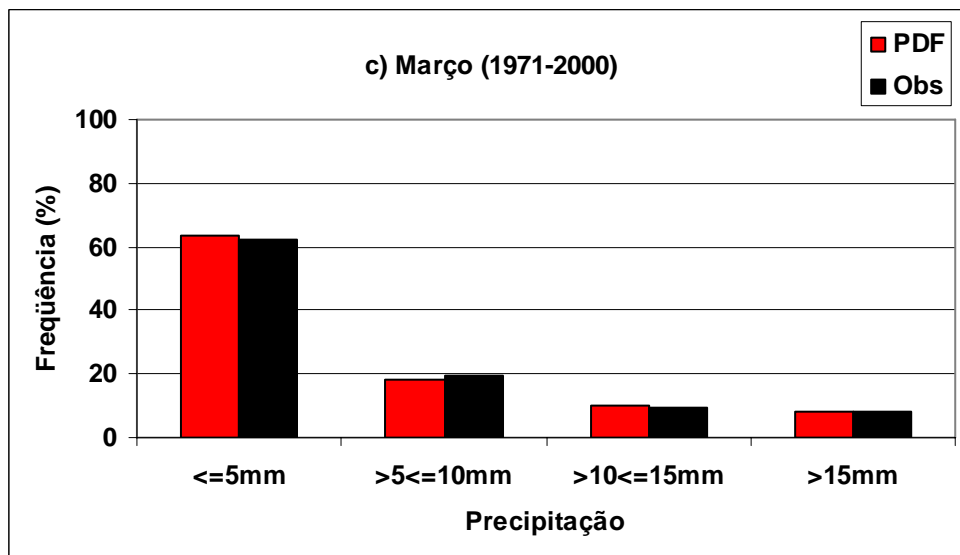
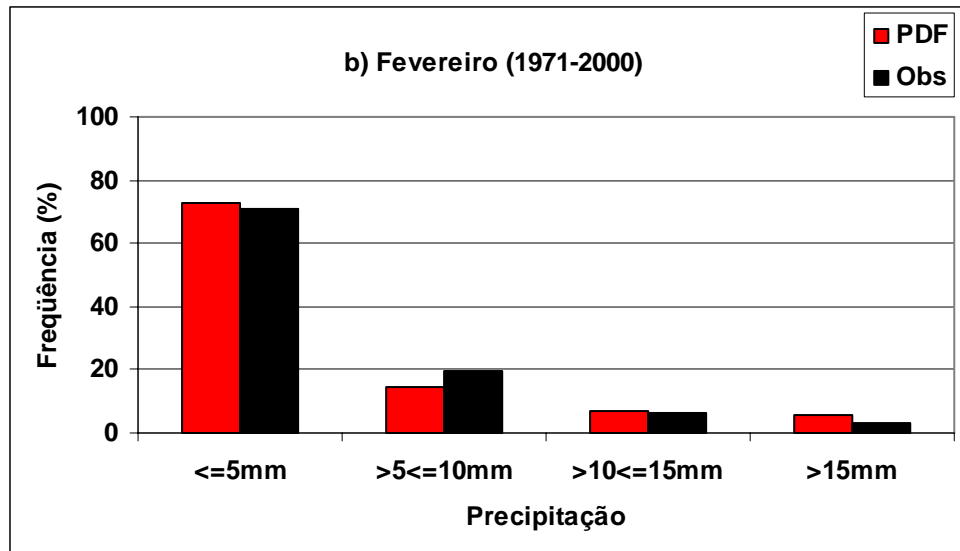
Histogramas diários (1971-2000) para os meses de janeiro a junho, para a média dos 10 membros do MRE corrigidos pela técnica de PDFs e o observado para a bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu são mostrados na figura 26.

Estes histogramas de frequência mostram que para todas as intensidade de precipitações, nos seis meses do ano, os dados corrigidos pela técnica das PDFs apresentaram frequências muito próximas (pequenas diferenças) das precipitações observadas para todos os limiares de intensidade de precipitação.

Seth *et al.* (2004) fizeram uma comparação entre a chuva diária de um MR (*Pen State/National Center for Atmospheric Research (NCAR) Mesoscale Model (MM5)* – Giorgi *et al.* 1993) com dados observados em estações meteorológicas para uma área do Nordeste do Brasil (seu setor norte). Este MR foi dirigido pelos dados de re-análises do *National Center for Atmospheric Prediction (NECP/NCAR)*, para os meses de janeiro a maio de 1983 e 1985. Nos seus resultados o MRE simulou melhor evento de chuva menor do que 5 mm/dia e teve pior desempenho em eventos acima de 15 mm/dia.

O MRE e seus dados corrigidos apresentaram histogramas similares aos de Galvão *et al.* (2005), em estudos realizados para a bacia dos rios Pirapama (600 km²) e bacia do Rio Piancó (4550 km²) nos reservatórios de Pirapama e Coremas, nos estados da Paraíba e Pernambuco. Nesses seus resultados, em ambos os reservatórios (ver suas figuras 27a e 27b) foram encontrados uma superestimativa do MRE nas chuvas mais fracas, superestimativa nas intensidades de precipitação intermediária e frequências próximas as observadas para precipitações mais intensas.





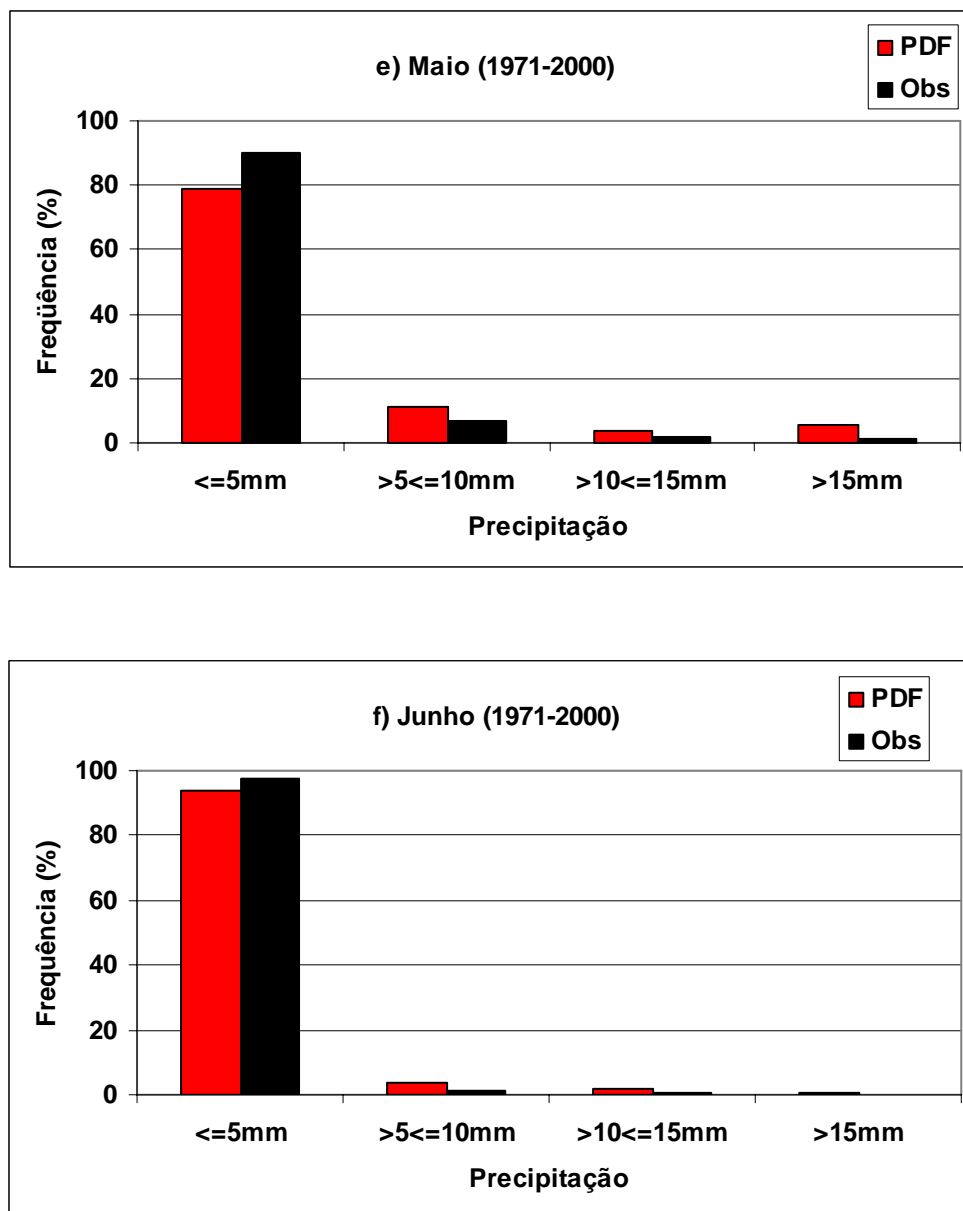


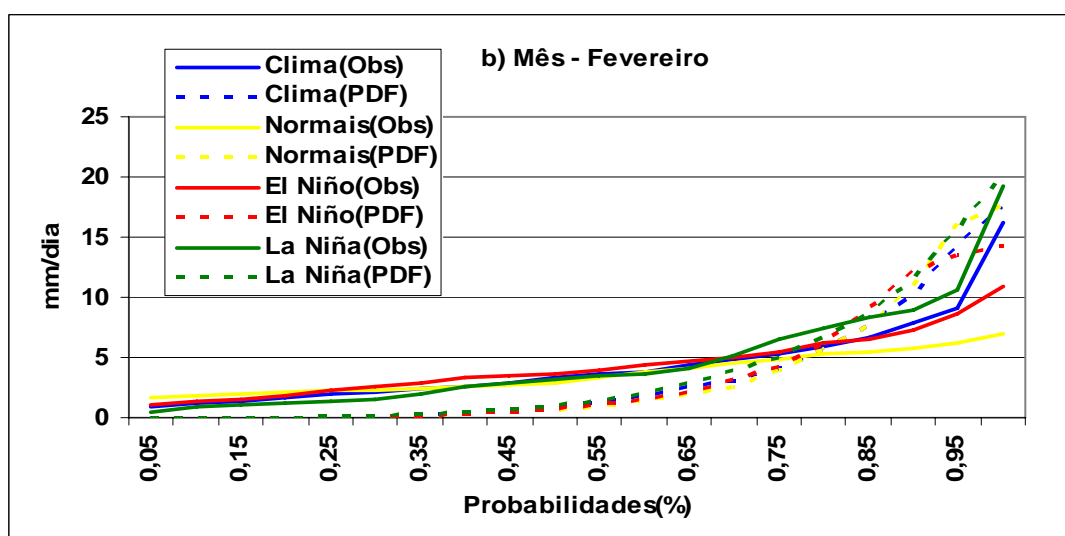
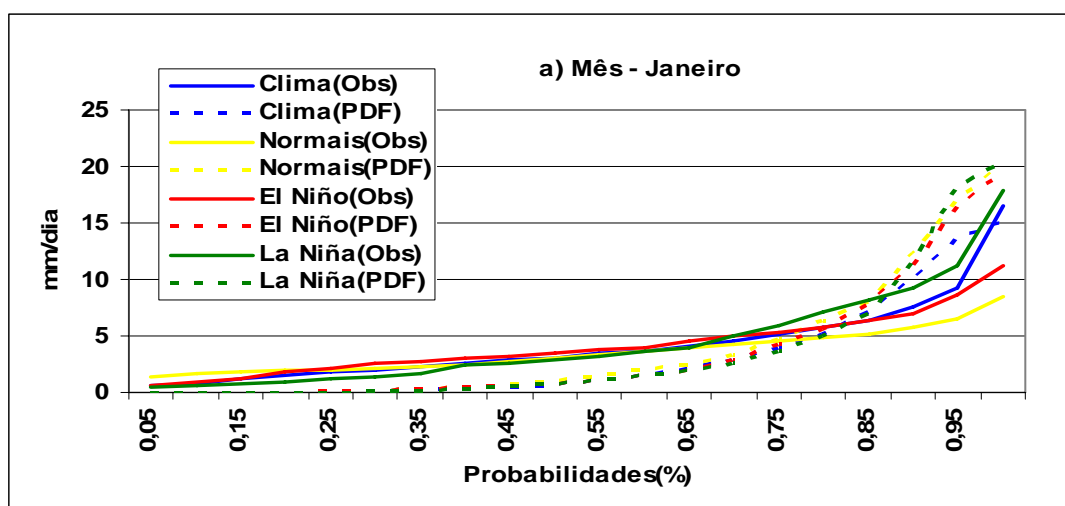
FIGURA 26 - Histogramas de precipitação diária observada e a média dos dez membros do MRE corrigido pelas PDFs a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio e f) junho.

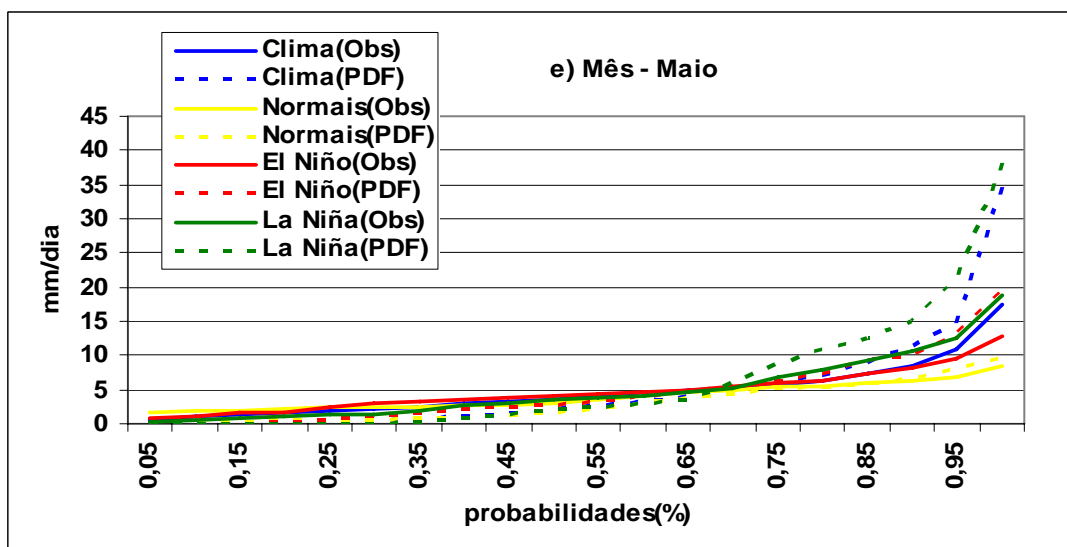
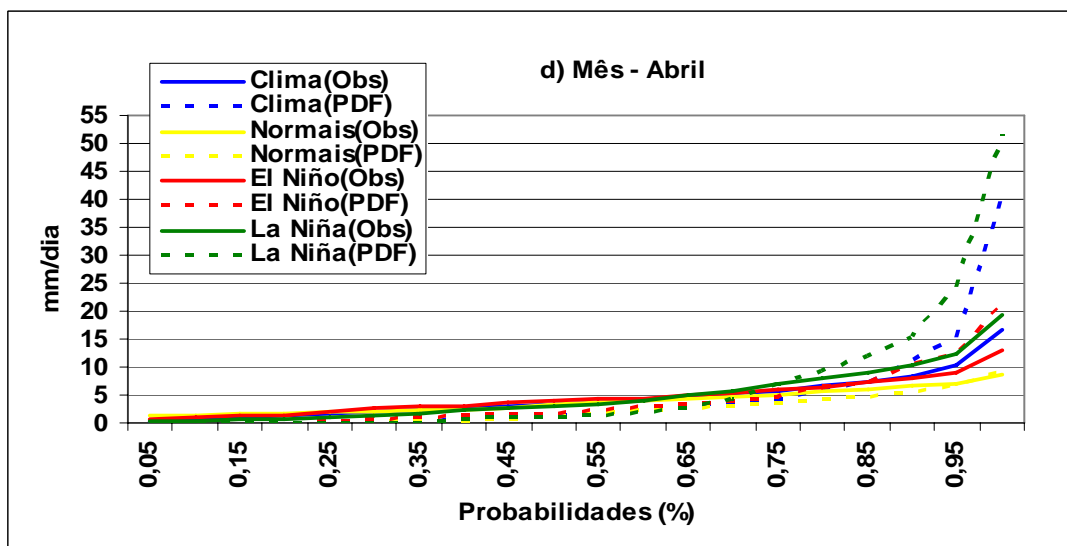
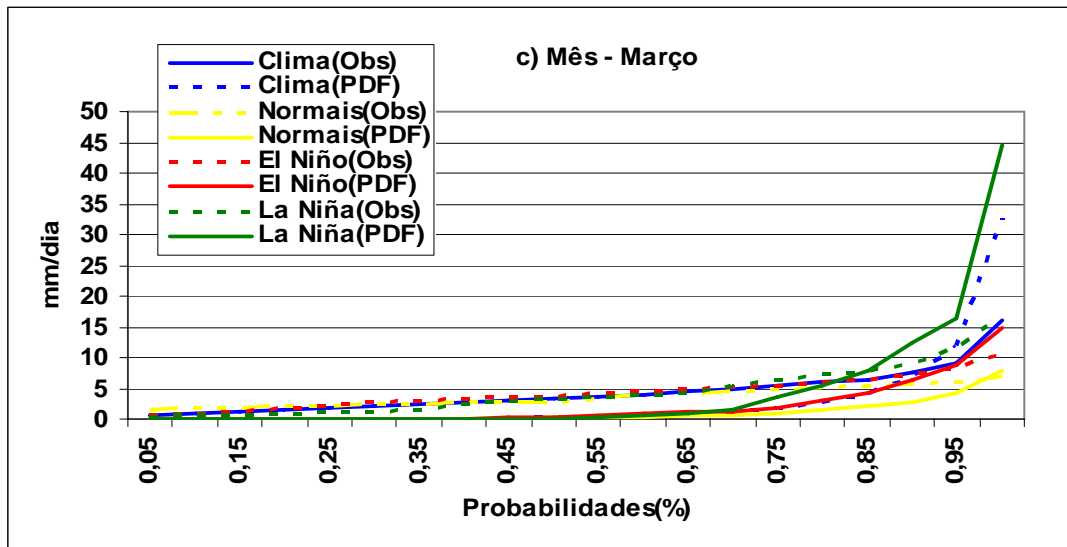
8.2 Variabilidade intrasazonal para os anos de contrastes climáticos

A figura 27 mostra as funções densidade de probabilidade (Fdps) mensais de janeiro a junho da precipitação observadas e corrigidas pela técnica das PDFs na bacia hidrográfica do posto fluviométrico do Iguatu para os anos de contrastes climáticos (El Niño, La Niña e Normais) e para o período de 30 anos (1971-2000) definido como clima.

Pode-se observar que nos meses de janeiro e fevereiro, as curvas das Fdps simuladas com a precipitação do MRE e corrigidas pela técnica das PDFs subestimam as observadas em todas as intensidades de precipitação. Porém, estas curvas conseguem reproduzir a variabilidade dos anos de contrastes climáticos, principalmente, na intensidade de chuvas acima de 5 mm cujas probabilidades são da ordem de 25%, sendo estas mais intensas que a climatologia nos anos de La Niña, enquanto que nos anos de El Niño e Normais estas são abaixo da média.

Nos meses de março, abril, maio e junho ocorreu um melhor desempenho, concordância, das curvas de Fdps simuladas pelo MRE e corrigidas pelas PDFs comparadas as curvas observadas. Em todas as intensidades de precipitação e para todos os anos de contrastes climáticos, bem como para os 30 anos, as curvas de Fdps observadas e simuladas estão mais aproximadas. Em geral, exceto no mês de março, as Fdps simuladas para precipitações acima de 5 mm superestimaram as Fdps observadas.





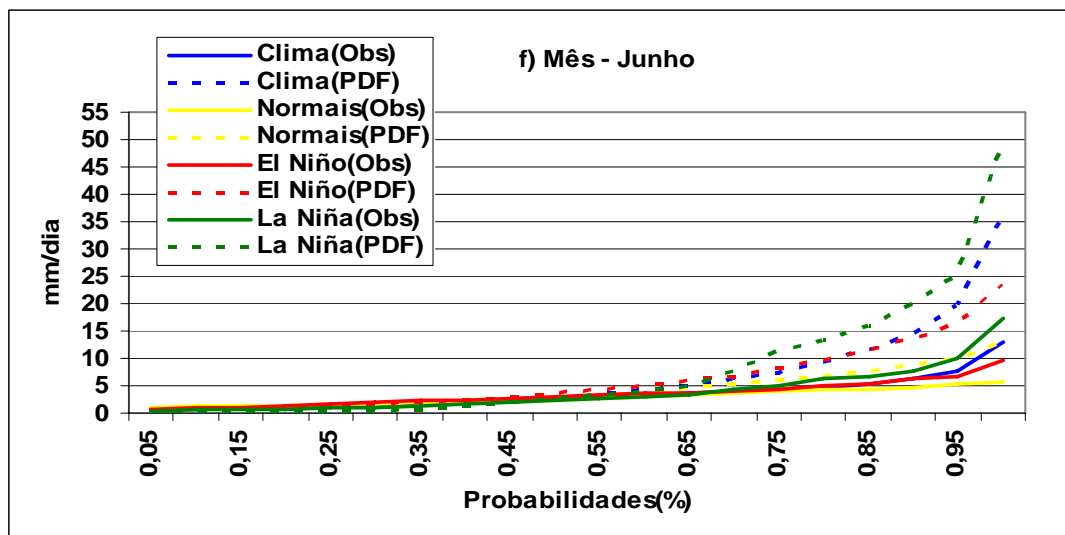


FIGURA 27 - Funções densidade de probabilidades (Fdps) para precipitação observada e simulada pelo MRE corrigido pelas PDFs. a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio e f) junho.

A tabela 3 mostra os índices estatísticos, pentadais e quinzenais de janeiro a junho para todo o período de estudo (1971-2000) como para os anos de contrastes climáticos.

Para os valores diários e pentadais pode-se observar que as correlações são muito baixas, passando a baixas com alguns valores moderados. Ressalta-se que todas as correlações não são significativas a 95%.

Quinzenalmente, as correlações aumentaram de valores quando comparados às avaliações para períodos diários e de pênadas. Estas passaram de moderadas a altas, segundo a classificação de Hopkins (2001), para o período de 1971-2000 e para a composição de anos de La Niña.

Quanto à redução do erro sistemático nota-se que em média nestes meses de janeiro a junho, os anos normais tiveram o menor *bias* (-0,34), enquanto nos anos de La Niña e de El Niño este *bias* foi superior a 1. Esta característica também foi observada para o período pentadal, com um aumento na magnitude deste *bias* da ordem de quatro vezes nos anos de La Niña e El Niño e 1,5 vezes nos anos normais. Para as quinzenas os *bias* foram menores do que os observados nos períodos pentadais, tendo os anos de El Niño o menor *bias* com valor abaixo da unidade.

Nesta tabela 3 pode-se observar que os valores dos outros índices estatísticos também apresentaram valores muito próximos tanto para o período entre 1971-2000 como para os anos de contrastes climáticos (de La Niña, El Niño e Normais).

Uma análise interessante, visto que quantitativamente a precipitação simulada pelo MRE mesmo corrigida apresenta erros consideráveis, é investigar a frequência de ocorrência do sinal da anomalia de precipitação observada e simulada. A figura 28 mostra essa frequência de acerto para as 36 pênadas (01 de janeiro a 30 de junho) para todos os anos (1971-2000) e para os anos de contrastes climáticos. Foi considerada uma frequência certa quando ocorreu coincidência de sinal negativo ou positivo ou anomalias nulas entre as anomalias pentadais observadas e simuladas. Pode-se verificar nesta figura 23 que quase em todos os meses as frequências são em torno de 60% ou acima, exceto no mês de março para todo o período e anos Normais que estas são da ordem de 40%.

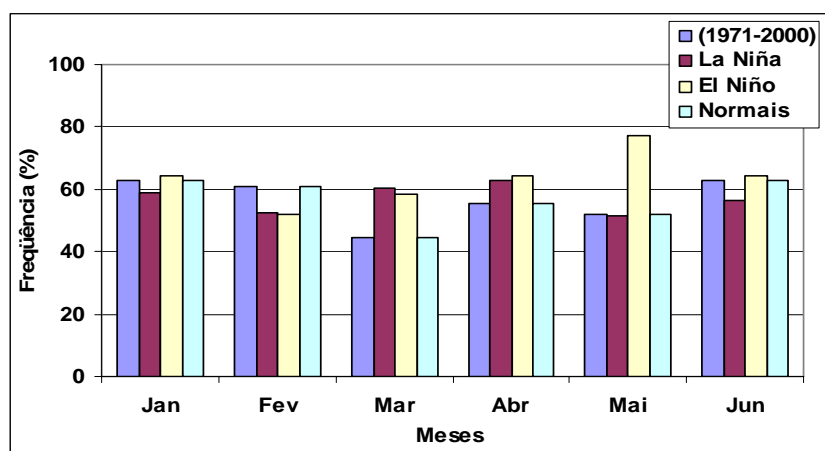


FIGURA 28 - Frequência de ocorrência de acerto no sinal da anomalia pentadal da precipitação observada e a simulada pelo MRE corrigida pelas PDFs para todos os anos (1971-2000), para anos de La Niña, El Niño e Normais.

TABELA 3 – Índices estatísticos usados na avaliação de desempenho da precipitação para períodos diários (janeiro a junho) para todo o período de estudo (1971-2000) em anos de La Niña, de El Niño e Normais. ttab e tcal indicam os valores da estatística de prova e sig a sua significância. Um asterisco na tabela indica correlação não significativa a 95%.

Diário - 1971-2000											
	r	ttab	tcal	sig(%)	bias	ra	EQM	EAM	EAMD	EQMD	CD
1971-2000	0,12	1,96	0,67	*	0,15	0,92	7,31	0,42	0,02	7,11	0,21
La Niña	0,15	1,93	0,54	*	1,23	0,81	8,38	1,35	0,05	8,04	0,21
El Niño	0,09	1,78	0,23	*	-1,06	1,08	6,16	0,32	1,22	6,06	0,21
Normais	0,09	1,82	0,25	*	-0,34	1,10	6,57	0,05	0,55	6,53	0,22
Pêntadas (1971-2000)											
	r	ttab	tcal	sig(%)	bias	ra	EQM	EAM	EAMD	EQMD	CD
1971-2000	0,20	1,96	1,10	*	-0,12	0,92	24,81	0,03	0,20	24,20	0,32
La Niña	0,21	1,93	0,73	*	5,39	0,79	28,72	5,39	0,04	27,72	0,30
El Niño	0,23	1,78	0,64	*	-5,97	0,96	20,19	0,29	6,04	20,17	0,44
Normais	0,17	1,82	0,49	*	-2,89	1,25	22,31	0,04	3,05	21,92	0,25
Quinzenas (1971-2000)											
	r	ttab	tcal	sig(%)	bias	ra	EQM	EAM	EAMD	EQMD	CD
1971-2000	0,43	1,93	1,63	*	3,92	1,33	28,23	3,92	0,05	24,40	0,50
La Niña	0,38	1,78	1,08	*	-6,37	0,83	24,34	0,24	5,69	23,89	0,57
El Niño	0,22	1,82	0,64	*	0,81	1,90	26,83	1,37	1,26	24,86	0,24
Normais	0,22	1,82	0,63	*	-3,20	1,25	28,61	0,06	2,97	27,65	0,25

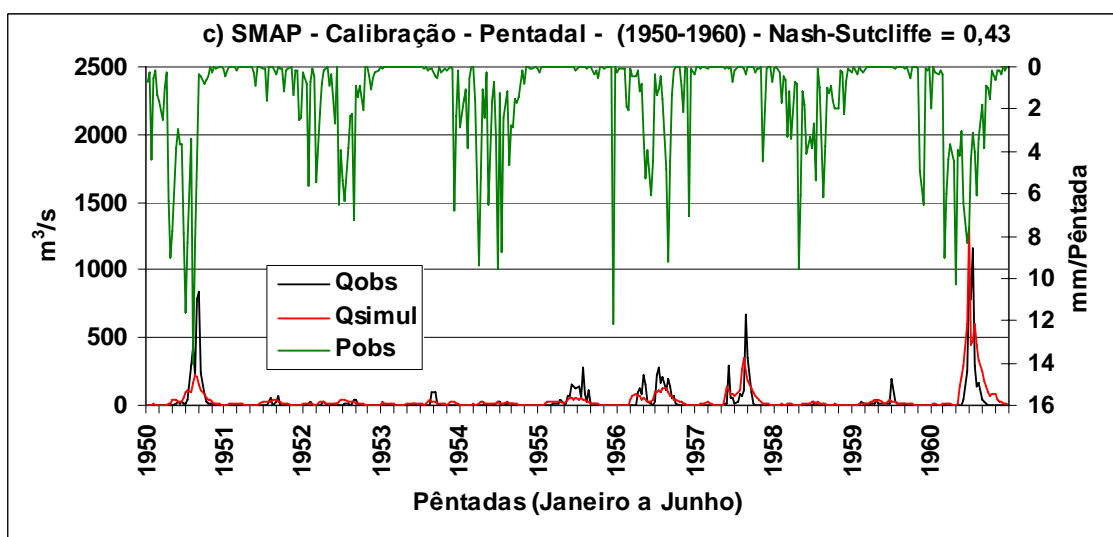
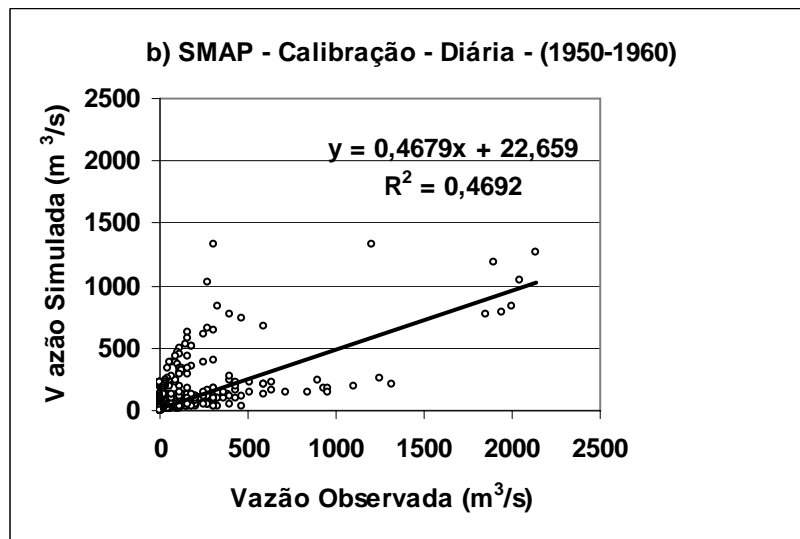
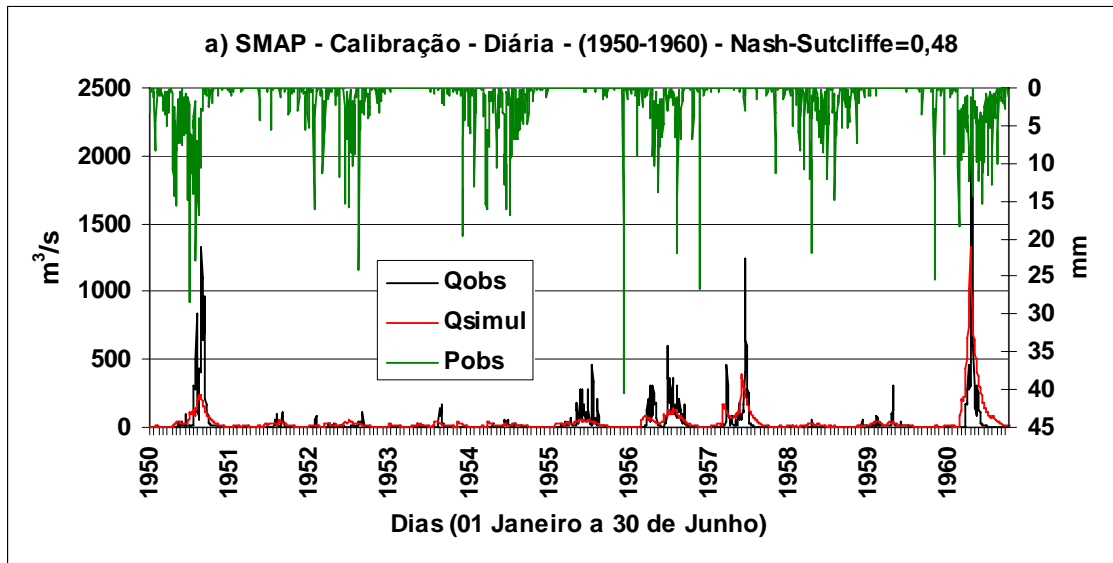
8.3 Calibração e validação do modelo SMAP

As análises a seguir foram feitas apenas para o primeiro semestre (janeiro a junho) período de maior ocorrência de chuva e afluência na bacia em estudo, e também por que as simulações do MRE estão disponíveis apenas neste período,

As figuras 29 e 30 mostram a calibração (1950-1960) e validação (1961-1970) do modelo SMAP na bacia hidrográfica do posto pluviométrico do Iguatu diariamente, para acumulados de cinco dias e quinzenalmente. No processo de calibração nas escalas de tempo diária, pentadal e quinzenal o passo de cálculo do modelo é diário, acumulando-se estes valores diários para os períodos pentadais e quinzenais. A calibração dos três parâmetros do modelo é feita com a tentativa de minimizar a função objetiva denominada como coeficiente Nash-Sutcliffe nas 100 interações usadas.

A figura 29 mostra os hidrogramas, os diagramas de dispersão do período de calibração (1950-1960) diariamente, pentadal e quinzenal. Observou-se que para todos os períodos o SMAP teve melhor desempenho nas vazões menos intensas dos hidrogramas e pior nos períodos de vazões mais intensas. Essa característica segundo Tucci *et al.* (2005), se deve a função objetiva de calibração que é muito sensível à variação quadrática das vazões mais intensas. Para esses períodos de calibração (diário, pentadal e quinzenal), a função objetiva de calibração (Nash-Sutcliffe), embora tenha apresentado valores classificados como aceitáveis entre 0,48, 0,43 e 0,59 para todos os períodos de tempo, estes são relativamente baixos (Gottschalk e Motovilov, 2000). Observou-se também que nos períodos de recessão há uma queda abrupta das vazões observadas, enquanto na simulação do SMAP essas quedas nos hidrogramas são mais lentas.

Os diagramas de dispersão também corroboram essas características mencionadas acima e mostram que para vazões mais intensas ocorreram maiores diferenças entre os valores observados e simulados. A explicação da variância entre as vazões simuladas e observadas, dada pelo coeficiente de determinação (r^2), mostrou que o SMAP explicou 46%, 45% e 50% das observações diárias, pentadais e quinzenais, respectivamente. Estes diagramas mostram também claramente que ocorreu uma superestimativa das vazões menos intensas simuladas pelo SMAP e uma subestimativa das vazões mais intensas, quando comparadas aos valores observados.



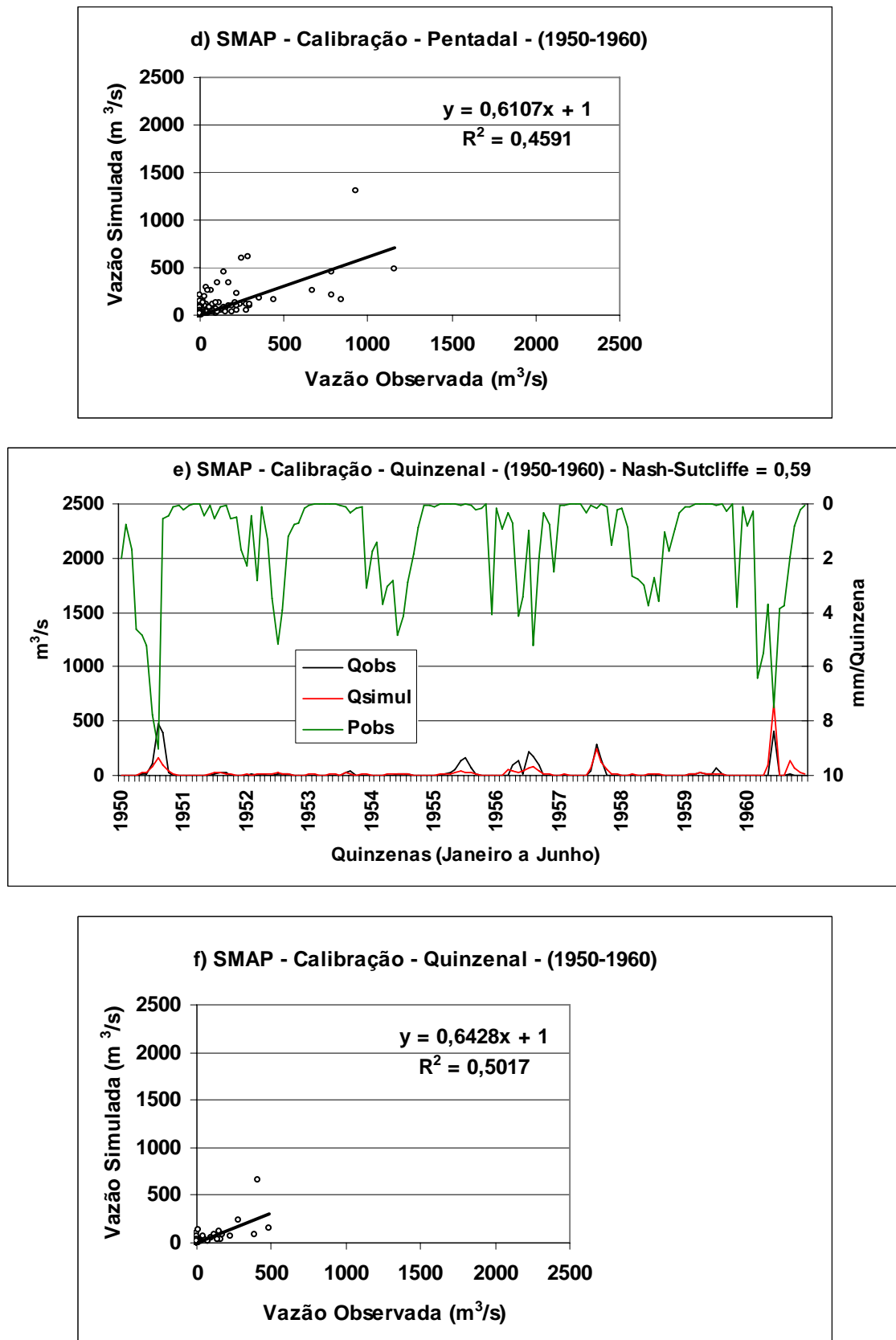
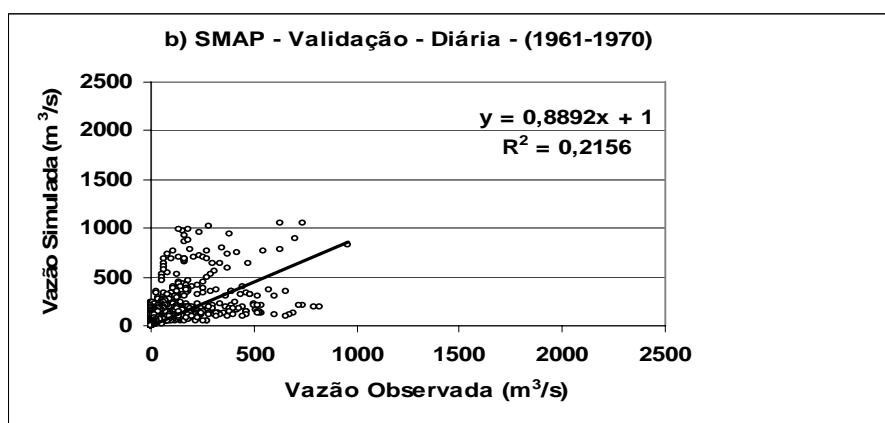
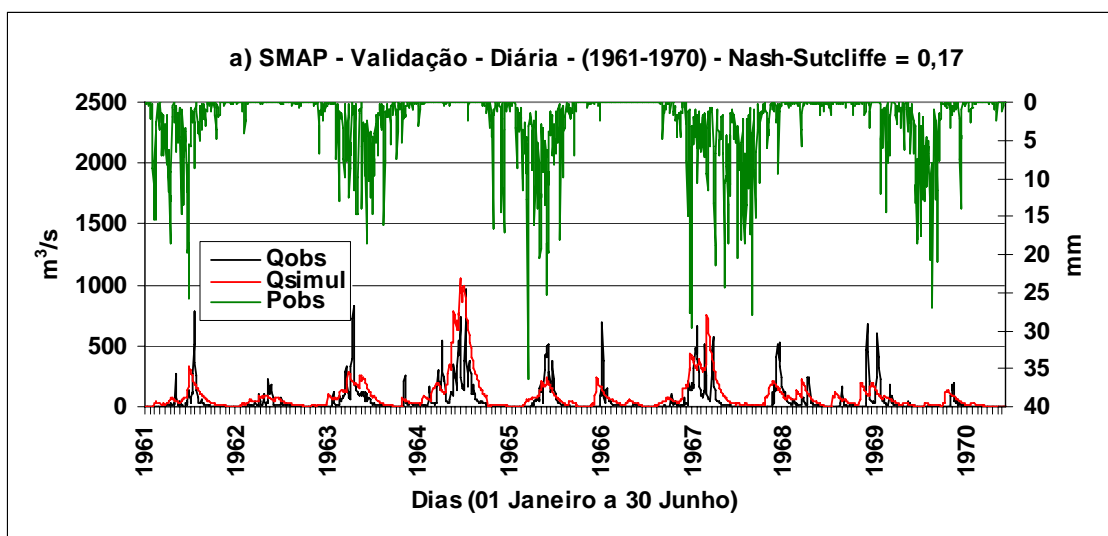
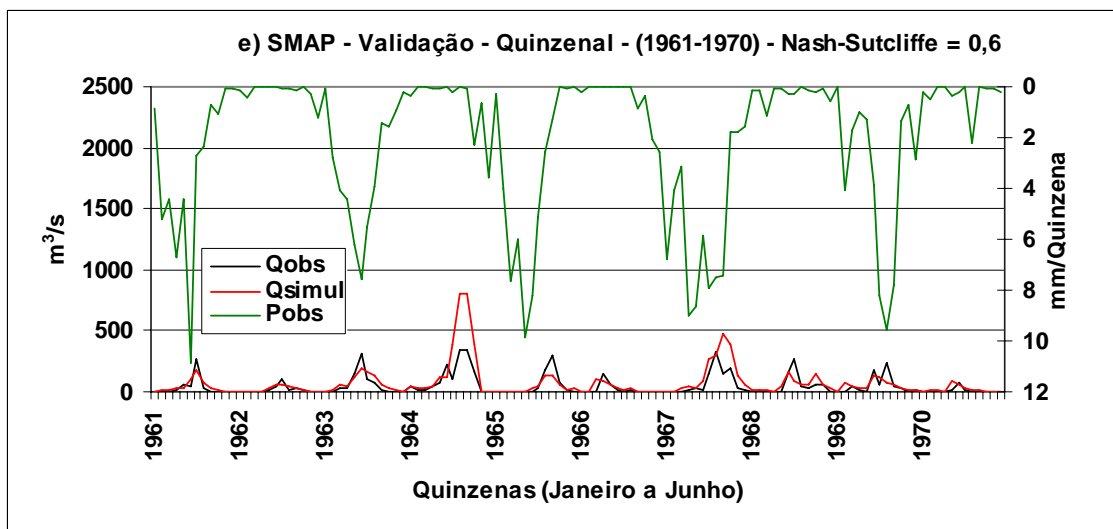
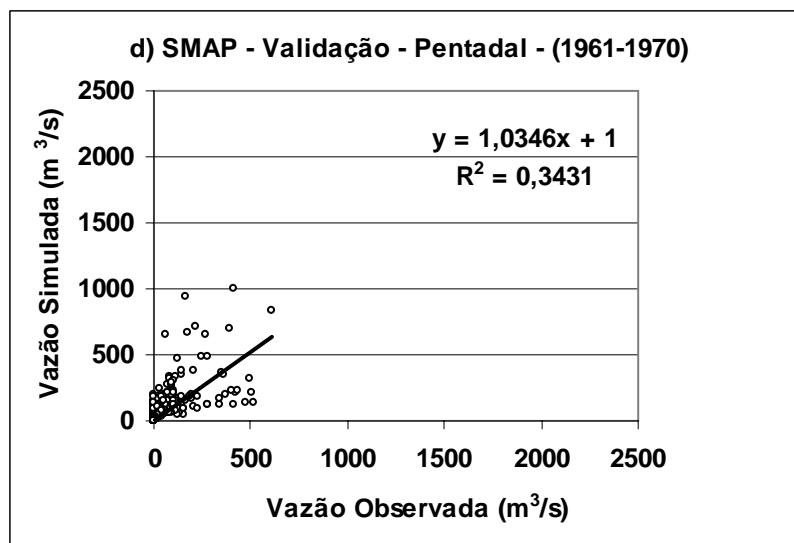
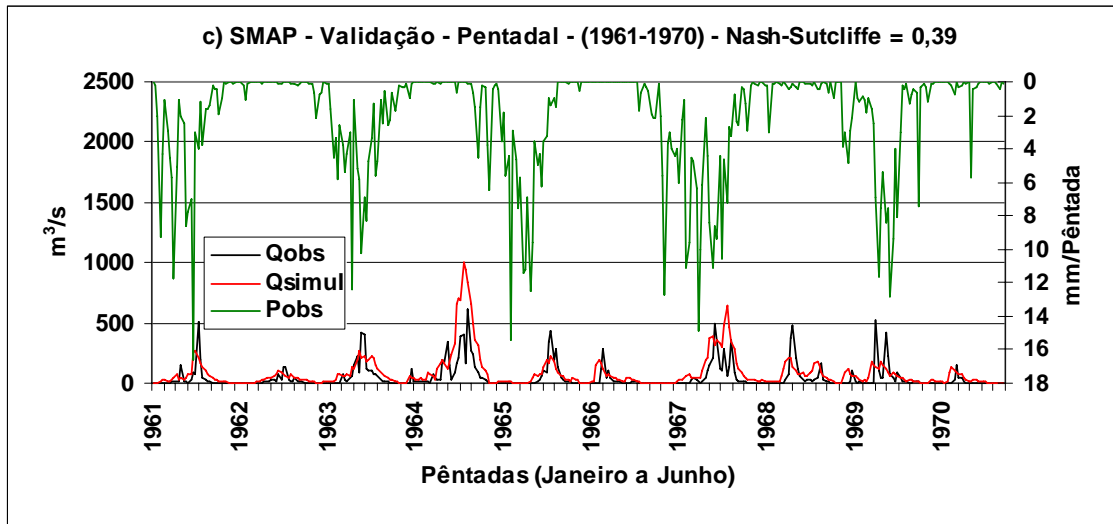


FIGURA 29 - Hidrogramas observados e simulados e seus diagramas de dispersão e precipitação observada no período de calibração do modelo SMAP (1950-1960), a) e b) diário, c) e d) pentadal e e) e f) quinzenal. O eixo dos x nas figuras 28a , 28c, 28e para escala diária está marcado de 10 em 10 dias.

Para o período de validação (1961-1970) também foi observado um melhor desempenho do modelo SMAP para vazões menos intensas, com erros menores em magnitudes, do que aqueles comparados as vazões mais intensas (figura 30). Essa característica se fez presente em todos os períodos de validação (diário, pentadal e quinzenal). Os valores dos coeficientes Nash-Sutcliffe tiveram pequena diminuição em magnitude comparada ao período de calibração, porém mantendo-se dentro do limite considerado como aceitável (TUCCI *et al.* 2005).

Maiores coeficientes de determinação foram observados nas validações para períodos quinzenais, explicando mais de 55% da variância das vazões observadas, seguidos das validações pentadaias em torno de 34% da variabilidade e diariamente com explicação da variância da ordem 21%. Os coeficientes angulares das retas nas figuras de dispersão mostram valores oscilando em torno da unidade (o ideal seria um valor igual a um para uma perfeita simulação), Estas diferenças do valor unitário, deve-se aos erros relativos a eventos de vazão de grande magnitude que foram subestimados os quais tem grande peso no ajuste linear.





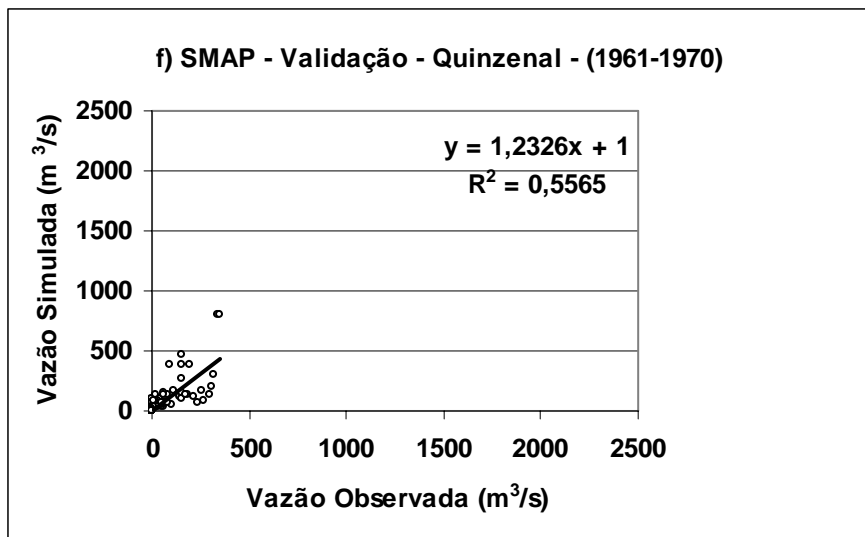


FIGURA 30 - Hidrogramas observados e simulados e seus diagramas de dispersão e precipitação observada no período de validação do modelo SMAP (1961-1970), a) e b) diário, c) e d) pentadal e e) e f) quinzenal. O eixo dos x nas figuras 30a, 30c, 30e para escala diária está marcado de 10 em 10 dias.

As tabelas 4 e 5 mostram uma síntese estatística entre as vazões observadas no posto fluviométrico de Iguatu e as calculadas pelo modelo SMAP usando a precipitação média observada na bacia hidrográfica do referido posto para o período de calibração (1950-1960) e validação (1961-1970). Esta estatística foi calculada para cada período diário, pentadal e quinzenal para os meses de janeiro a junho.

No período de calibração (1950-1960) os valores médios diário, pentadal e quinzenal calculado pelo SMAP foram maiores em magnitude do que as vazões observadas nos meses de janeiro, fevereiro, março e junho, e subestimaram os valores observados em abril. No mês de maio os valores dessas médias estiveram mais próximos em magnitude.

O erro absoluto médio, para períodos diários, pentadal e quinzenal, foi menor para os meses de março e abril. Os coeficientes Nash-Sutcliffe foram superiores a 0,3 chegando a valores acima de 0,5, em particular, nos meses de fevereiro, março, abril e maio. Em janeiro e junho esse coeficiente apresentou alguns valores negativos, indicando baixa concordância entre os dados de vazão observados e estimados pelo modelo SMAP.

O interessante nessas tabelas, é que não há uma relação direta do erro médio absoluto com o coeficiente Nash-Sutcliffe, ou seja, baixos erros não são acompanhados com altos coeficientes. Essa característica deve-se ao cálculo desses parâmetros, o erro absoluto é imune à variância (soma dos desvios absolutos ao quadrado), enquanto o coeficiente Nash-Sutcliffe é fortemente influenciado por esses desvios. Esta relação foi

mais observada no período de validação (1961-1970). Nos meses de pré-estação, final e pós-estação chuvosa (janeiro, maio e junho), essa condição foi mais aparente.

TABELA 4 - Estatísticas entre a vazão observada no posto fluviométrico de Iguatu e a calculada pelo modelo SMAP tendo como base os dados de precipitação média observada na área de captação de sua bacia, período de calibração (1950-1960). Mobs. (média observada em m³/s), Msimul. (média simulada em m³/s), EAM (erro absoluto médio em m³/s), N.S (coeficiente Nash-Sutcliffe adimensional).

1950-1960 (Calibração)												
	Diário				Pentadal				Quinzenal			
	Mobs.	Msimul.	EAM	N.S	Mobs.	Msimul.	EAM	N.S	Mobs.	Msimul.	EAM	N.S
Jan	1,31	7,43	6,12	-1,41	1,25	7,67	6,24	-2,84	1,19	3,20	1,99	-1,97
Fev	10,26	19,04	8,78	0,06	8,90	16,61	7,72	0,13	8,08	5,85	2,23	0,59
Mar	45	67,51	22,51	0,3	45,40	68,12	22,76	0,49	29,17	38,72	9,55	0,48
Abr	121,59	97,4	24,19	0,45	109,80	95,92	23,79	0,43	51,94	27,33	26,60	0,5
Mai	34,07	35,86	1,79	0,11	35,15	87,02	1,91	0,12	2,15	9,51	7,36	-16,97
Jun	0,55	7,87	7,32	-59,36	0,47	7,87	7,04	-56,69	0,49	2,09	1,70	-23,09

TABELAS 5 - Estatísticas entre a vazão observada no posto fluviométrico de Iguatu e a calculada pelo modelo SMAP tendo como base os dados de precipitação média observada na área de captação de sua bacia, período de validação (1961-1970). Mobs. (média observada em m³/s), Msimul. (média simulada em m³/s), EAM (erro absoluto médio em m³/s), N.S (coeficiente Nash-Sutcliffe adimensional).

1961-1970 (Validação)												
	Diário				Pentadal				Quinzenal			
	Mobs.	Msimul.	EAM	N.S	Mobs.	Msimul.	EAM	N.S	Mobs.	Msimul.	EAM	N.S
Jan	3,53	17,29	13,76	-1,26	3,31	16,48	13,18	-1,9	1,12	7,97	6,85	-23,23
Fev	19,5	45,28	25,78	-0,35	17,60	40,90	23,31	-0,52	13,93	15,18	1,24	0,71
Mar	70,26	94,23	23,97	-0,01	72,61	97,37	24,77	0,08	55,42	48,55	6,87	0,62
Abr	117,44	173,57	56,13	-0,5	117,44	173,57	56,12	-0,6	68,31	82,97	14,66	-0,58
Mai	75,39	151,55	76,16	-1,1	72,62	145,10	73,37	-1,09	31,05	53,14	22,08	-1,13
Jun	11,63	33,34	21,7	-2,49	10,03	28,78	18,75	-2,83	2,70	6,16	3,47	-9,77

8.4 Simulação de vazões como o modelo SMAP usando modelagem dinâmica

Nesta seção foram feitas comparações das vazões simuladas pelo modelo SMAP na bacia do posto fluviométrico de Iguatu e as observadas no período de 1971-2000. Para o cálculo dessas vazões simuladas foram usados os parâmetros calibrados no modelo SMAP no período de 1950-1960 e a precipitação obtida pelo MRE e corrigida pela técnica das PDFs.

Na figura 31 são apresentadas às comparações entre os valores médios quinzenais (1971-2000). Observa-se que as vazões mais próximas do observado referem-se às simuladas com as precipitações vindas do MRE com os dados corrigidos pelas PDFs, principalmente, nos meses de janeiro, fevereiro, março e parte do mês de abril. Entretanto, a partir do final de abril as vazões com o uso dos dados brutos do MRE quanto corrigidos apresentaram uma superestimativa acentuada em relação aos valores observados. Estas características também foram evidentes nos dados pentadai e mensais (figuras não mostradas), com as vazões simuladas pelo MRE e corrigidas pelas PDFs apresentando valores bem mais intensos do que os observados.

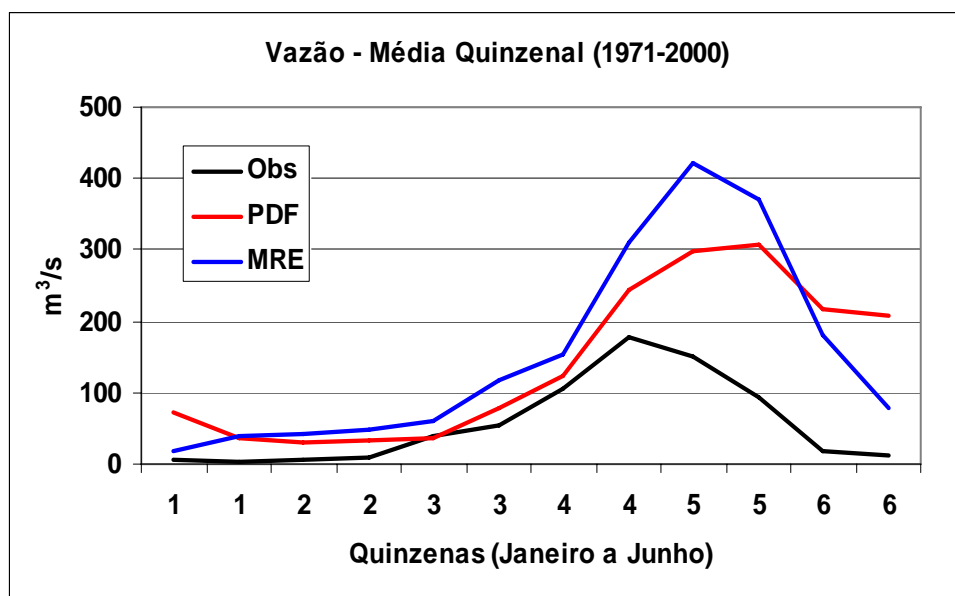


FIGURA 31 - Vazão (média quinzenal -1971-2000) observada e simulada na bacia do posto fluviométrico de Iguatu no período de 01 de janeiro a 30 de junho.

Como em média as análises acima mostraram que as vazões calculadas com os dados corrigidos pela técnica das PDFs se aproximaram mais das vazões observadas, a partir dessa seção de análises os dados comparativos entre as vazões simuladas e observadas se deterão a essa comparação entre as vazões calculadas via modelo SMAP com as precipitações simuladas pelo MRE corrigidas pelas PDFs amostrais.

As figuras 32 e 33 deram ênfase às análises comparativas para períodos pentadais e quinzenais. Nestas figuras são mostrados os hidrogramas comparativos dessas vazões e os diagramas de dispersão. Nota-se que pelos hidrogramas vazões simuladas não reproduziram com fidedignidade os valores observados superestimando-os intensamente em alguns casos nas duas escalas temporais (pêntadas e quinzenas), como observado nos anos de 1972, 1976, 1977 e 2000. Intui-se, que esse elevado erro de vazão, superestimativa, nestes anos, deva-se aos dados de entrada de precipitação simulados pelo MRE. Neste ano, as análises mostraram que o MRE simulou chuvas muito mais intensas do que o observado em média na bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu, e mesmo com as correções via PDFs, estão ainda assim influenciaram em uma superestimativa no cálculo das vazões pelo modelo SMAP.

Além disso, é provável também que este erro tenha sido influenciado pela umidade inicial do solo no início da simulação do modelo SMAP que não deve ter sido bem representativa da realidade. Mas neste estudo estas questões não foram investigadas. Alguns outros picos de vazão foram simulados com melhor desempenho, ainda que subestimados, como nos anos de 1974, 1985 e 1989, anos típicos de ocorrência de eventos de La Niña no Pacífico Tropical e dipolo positivo de TSM no Atlântico Tropical (ROPELEWSKI e HALPERT, 1989 e SOUZA, 1997).

Pelas figuras dos diagramas de dispersão, pode-se notar que, as simulações de vazões afluentes na bacia de captação do posto fluviométrico do Iguatu, apresentam uma clara tendência de superestimar as vazões. Seus valores de coeficiente de determinação (r^2) foram de 0,35 e 0,46 para períodos pentadal e quinzenal, respectivamente.

Esses resultados foram similares aos encontrados em Marengo *et al.* (2003) e Tucci *et al.* (2005) para a bacia hidrográfica do médio baixo São Francisco localizada no semi-árido Nordeste. Em seus estudos esses autores mostraram que os resultados de simulações/previsões de vazões com o uso de modelagem dinâmica apresentam resultados promissores, mais quantitativamente ainda apresentam erros significativos em alguns anos quando comparados às vazões observadas. Souza Filho e Porto, 2003 e

Souza Filho e Lall, 2003 encontraram coeficientes de correlação da ordem de 0,7 e 0,8 quando compararam as vazões mensais observadas e simuladas pelo SMAP usando dados de precipitação simulada pelo MRE no Açude Orós. Ressalta-se, que esses resultados são dependentes do tipo de bacia hidrográfica (tamanho, características fisiográficas, dados observados de precipitação e vazão sobre a mesma, etc.) além da modelagem dinâmica usada (modelo de estimativa de precipitação global ou regional) e do modelo hidrológico utilizado.

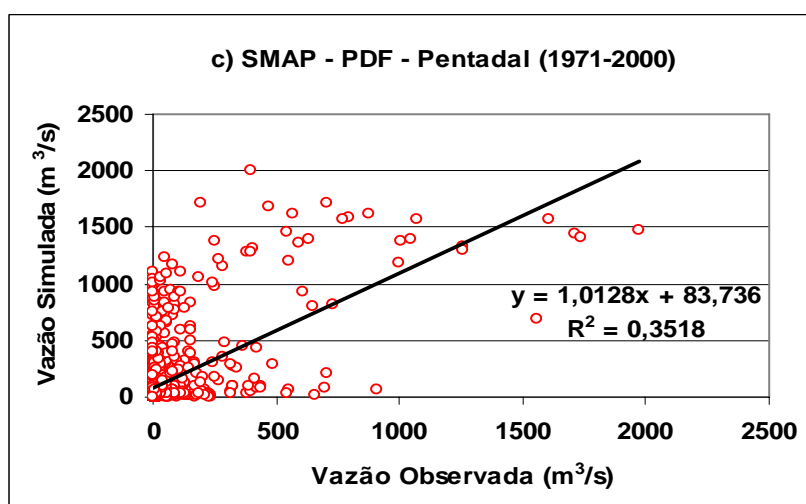
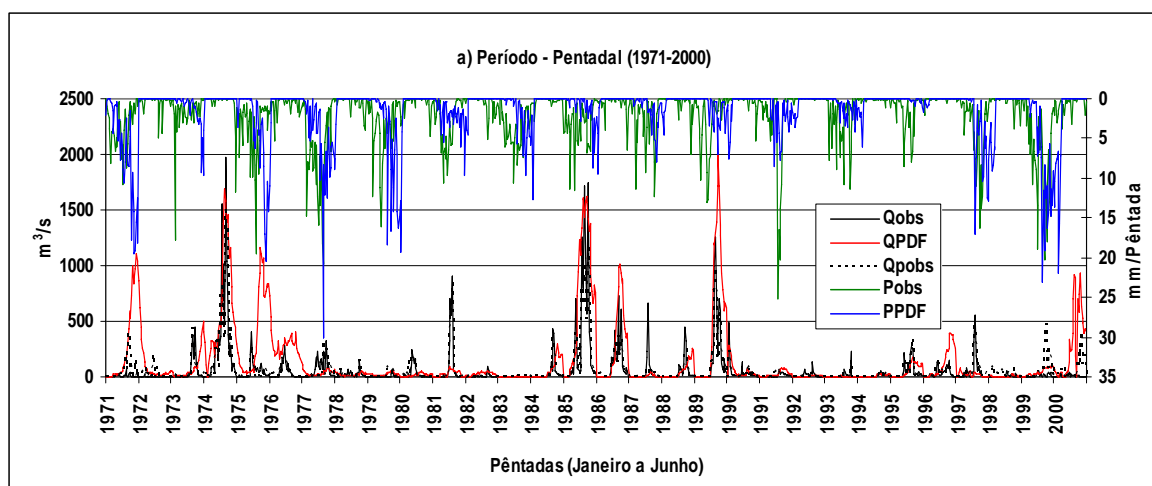


FIGURA 32 - Hidrograma pentadal interanual das vazões observadas e simuladas e diagrama de dispersão observados e simulados pelo modelo SMAP tendo como dados de entrada a precipitação simulada pelo MRE corrigida pelas PDFs no período de 1971-2000, e a precipitação observada e corrigida pela PDF. a) Hidrograma pentadal interanual e b) diagrama de dispersão. No gráfico do hidrograma estão marcados nos eixos dos x apenas a pentada inicial e final de cada ano entre os meses de janeiro a junho.

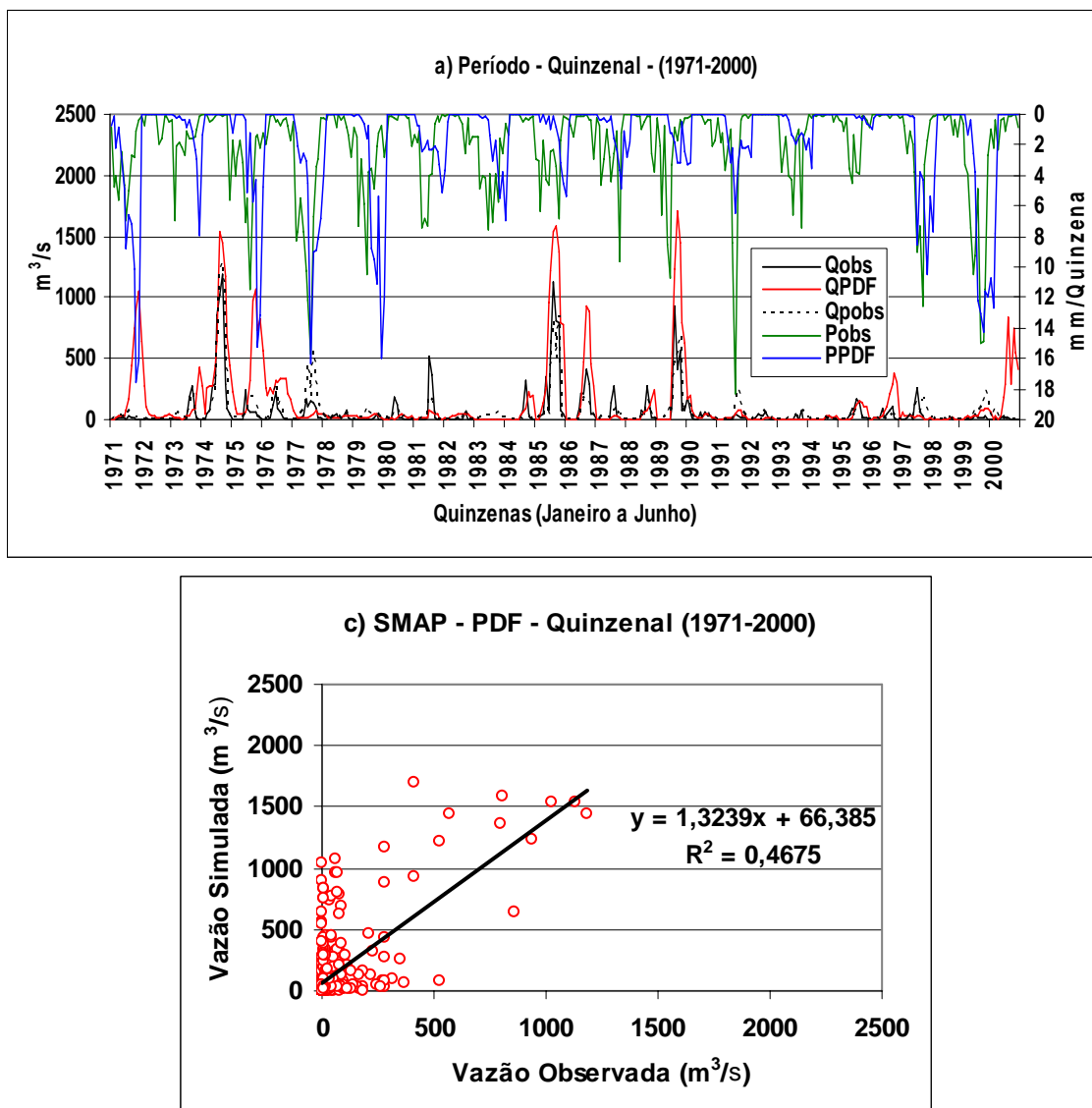


FIGURA 33 - Hidrograma quinzenal interanual das vazões observadas e simuladas e diagrama de dispersão observados e simulados pelo modelo SMAP tendo como dados de entrada de precipitação simulada pelo MRE corrigida pelas PDFs no período de 1971-2000 e a precipitação observada e corrigida pela PDF. a) Hidrograma pentadal interanual e b) diagrama de dispersão. No gráfico do hidrograma estão marcados nos eixos dos x apenas a quinzena inicial e final de cada ano entre os meses de janeiro a junho.

Outra forma de avaliação de resultados é comparar as vazões calculadas com a precipitação climatológica observada na bacia e usá-la no modelo chuva-deflúvio, as vazões climatológicas observadas com as calculadas via precipitação simulada pelo MRE corrigida pelas PDFs. Análises de coeficientes de determinação para períodos diários, pentadais e quinzenais mostraram que este foi da ordem de três vezes daquele quando é usada apenas informação climatológica, indicando o ganho de informação com o uso da modelagem numérica.

Na tabela 6 é apresentada uma estatística síntese intrasazonal diária, pentadal e quinzenal, médias, entre as vazões afluentes observadas no posto fluviométrico de Iguatu e a simulada usando a precipitação média na área de captação dessa bacia oriunda do MRE corrigida pela técnica das PDFs.

Analisando-se as médias diárias, pentadais e quinzenais entre as vazões observadas e simuladas, observa-se que ocorreu uma subestimativa das vazões simuladas nos meses de janeiro, fevereiro, março e abril; e uma superestimativa desses valores nos meses de maio e junho. Em termos de erros médios absolutos, os menores foram observados no mês de janeiro tanto para os períodos diários como pentadal e quinzenal; e os maiores, com significativas diferenças em magnitudes, foram encontrados no mês de junho.

No artigo de Tucci *et al.* (2005), que analisou previsões de vazões na bacia do sub-médio São Francisco, foi observado que os dados do MCGA do CPTEC/INPE quando corrigidos pela técnica das PDFs apresentou uma tendência aumentar os picos de vazão comparados aos picos de vazões observados, fato não observado nos dados sem a correção do MCGA. Os coeficientes Nash-Sutcliffe da tabela 6 são em sua maioria negativos, salvo algumas exceções, o que corrobora um predomínio de discrepância quantitativa, principalmente, entre os picos de cheias nesse período de 1971-2000 entre as vazões observadas e simuladas pelo modelo SMAP.

A tabela 7 mostra para os anos de contrastes climáticos (La Niña, El Niño e Normais) a explicação da variância dado pelo coeficiente de determinação (r^2) para os dados médios diários, pentadais e quinzenais entre as vazões observadas e simuladas pelo MRE corrigidas pelas PDFs no período de janeiro a junho. Nota-se que para as três escalas temporais as maiores explicações foram para os anos de La Niña, com explicações da variância nos três períodos de análises acima de 30%. As baixas explicações, em particular na escala diária, em anos de El Niño para os dados corrigidos foram devido à correção que preserva as bases climatológicas diárias. Como nestes anos em geral as chuvas são mais escassas, as estatísticas diárias consideradas nas PDFs amostrais, em geral, induzem a uma superestimativa entre os valores observados de precipitação, que refletem nas vazões simuladas pelo modelo SMAP.

TABELA 6 – Estatística entre a vazão observada no posto fluviométrico de Iguatu e a calculada pelo modelo SMAP tendo como base os dados de precipitação média observada simulada pelo MRE e seus valores corrigidos, período (1971-2000). Mobs, (média observada em m³/s), Msimul, (média simulada em m³/s), EMA (erro absoluto médio em m³/s), N.S (coeficiente Nash-Sutcliffe adimensional).

PDF	(1971-2000)											
	Diário				Pentadal				Quinzenal			
	Mobs.	Msimul.	EAM	N,S	Mobs.	Msimul.	EAM	N.S	Mobs.	Msimul.	EAM	N.S
Jan	10,3	0,72	9,57	-0,08	4,52	0,27	4,24	-0,04	4,51	0,21	4,30	-0,04
Fev	12,59	3,87	8,72	-0,16	7,33	2,03	5,31	-0,05	7,33	1,58	5,75	-0,12
Mar	64,8	16,41	48,39	-0,41	46,94	11,14	35,80	-0,31	46,94	9,40	18,77	-0,34
Abr	152,55	80,59	71,96	0,2	141,02	24,06	68,85	0,25	141,02	65,91	75,12	0,33
Mai	125,59	190,37	64,78	-0,9	120,57	179,25	58,69	-1,05	120,54	170,11	49,54	-0,92
Jun	16,79	353,06	336,27	-614,63	14,17	294,63	280,45	-666,25	14,18	283,75	269,57	-767,98

TABELA 7 – Coeficiente de determinação (r^2), em percentual entre os dados médios diários, pentadais (Pent.) e quinzenais (Quinz.) de vazão observada e simulada pelo SMAP quando foram usados os dados de precipitação do MRE corrigidos pelas PDFs para o período de janeiro a junho em anos de La Niña (La.), Normais (No.) e de El Niño (Ni.).

	La.			No.			Ni.		
	Dia	Pênt.	Quinz.	Dia	Pênt.	Quinz.	Dia	Pênt.	Quinz.
PDFs	30,00	37,00	50,00	21,00	27,00	30,00	6,00	16,00	28,00

Uma importante informação do ciclo intrasazonal das vazões afluentes na bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu mostrada nas análises acima indicou que a modelagem dinâmica conseguiu reproduzir o aumento das vazões de janeiro a abril na bacia, independente dos erros quantitativos associados. Por outro lado, a queda das vazões nos meses de maio, e principalmente em junho não foi identificada. Em junho, essa diferença é devida o MRE ter um *bias* úmido ao longo de todo o período de simulação. Para maio apesar da superestimativa nas vazões não ser tão expressiva quantitativamente, não há uma explicação mais conclusiva para este fato.

A informação citada acima é importante, porque há despeito das incertezas na estimativa da precipitação. A estimativa da vazão com o uso dessa precipitação no modelo SMAP conseguiu capturar razoavelmente o curso intrasazonal da vazão na bacia em estudo. Vale ressaltar, que nesse processo de simulação da modelagem dinâmica não há nenhuma influência da variabilidade interna da atmosfera (associada aos eventos meteorológicos de alta frequência que condicionam as características de condições de tempo na escala intrasazonal). Isto é, a variabilidade da precipitação é dependente em grande parte da condição de contorno (temperatura da superfície do mar).

A tabela 8 mostra um sumário dos índices de desempenho da avaliação entre as vazões estimadas pelo modelo SMAP tendo com precipitação os valores simulados pelo MRE corrigido pela técnica das PDFs amostrais. Este sumário é para períodos diários, pentadais e quinzenais entre 01 de janeiro e 30 de junho para todo o período (1971-2000) e para os anos de La Niña, de El Niño e Normais.

Em comparação com os dados de precipitação pode-se observar para os três períodos um aumento nas correlações, que passaram de muito baixas a baixas para moderadas. Correlações superiores a 0,5, significativas a 95%, (que explicam mais de 25% da variância das vazões diárias) foram encontradas para todo o período e para os

anos de La Niña. Para os anos de El Niño e Normais, essas correlações foram inferiores em magnitude.

Para períodos pentadais as características mencionadas na avaliação diária também foram aparentes. É claro um aumento das correlações nos 30 anos (1971-2000) nos anos de La Niña (com valores acima de 0,6 e significativos estatisticamente a 95%). Nos anos de El Niño e Normais, como na avaliação com os dados diários as correlações são mais baixas em magnitudes com valores oscilando entre 0,4 e 0,52.

Quinzenalmente, as correlações foram superiores as pêntadas, mantendo a característica com maior magnitude de correlação nos anos de La Niña (0,71), seguido da correlação para todo o período (1971-2000) que foi de 0,69 e dos anos de El Niño e Normais que apresentaram correlações de 0,53 e 0,58, respectivamente.

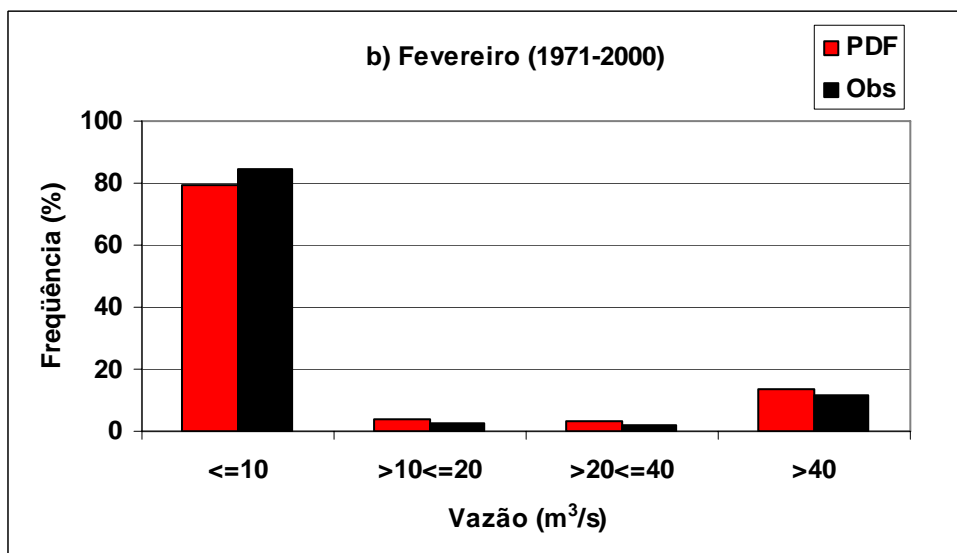
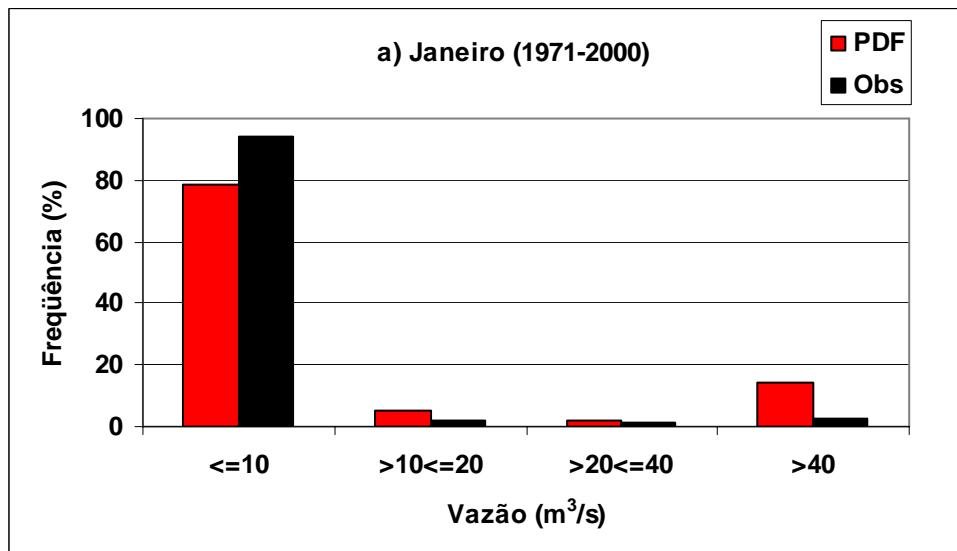
Uma análise dos outros índices estatísticos na tabela 8 mostram que os anos de La Niña, com maiores correlação nos três períodos de análises, não reflete os menores erros. Para estes anos, embora os valores de vazão calculados e observados tenham apresentado uma maior relação linear, os valores de erros são bem mais altos do que para a composição de anos de El Niño e Normais.

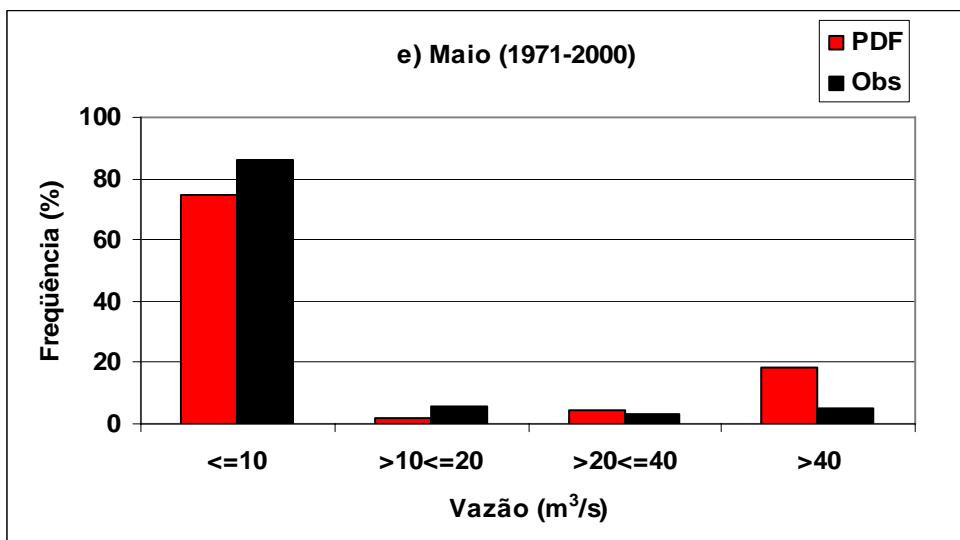
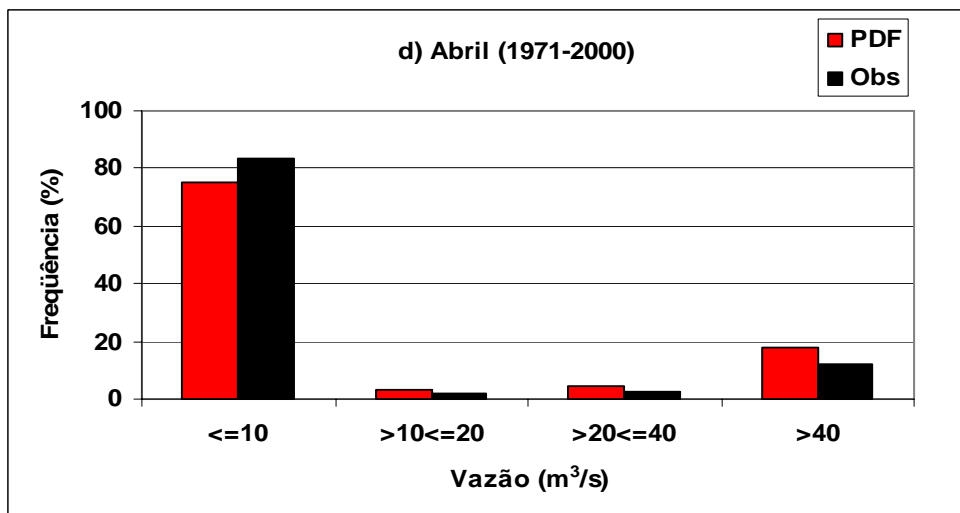
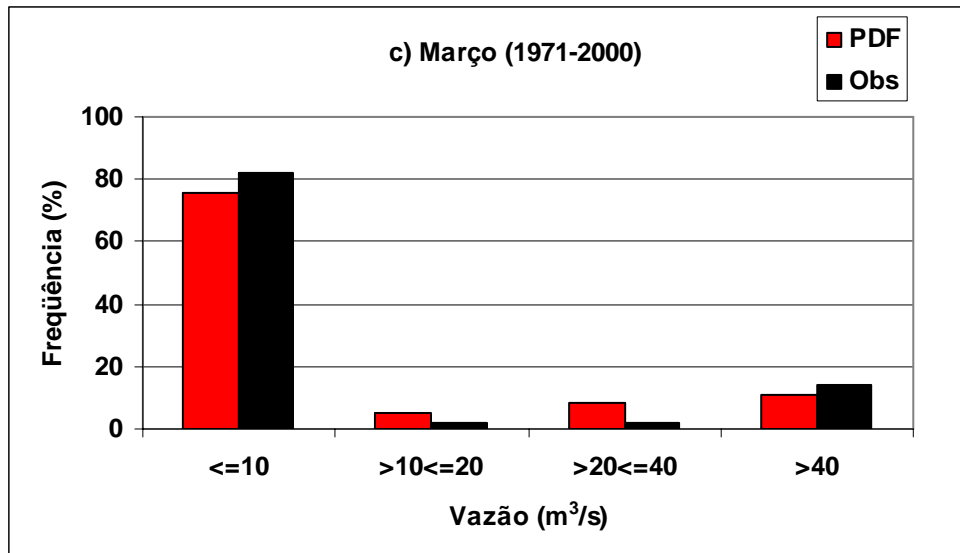
Esta característica, como nas análises dos períodos de validação e calibração do modelo SMAP, deve estar associada à deficiência do modelo em acompanhar os picos das vazões mais intensas, geralmente, ocorrentes nos anos de La Niña, climatologicamente, mais chuvosos no Nordeste do Brasil.

Este fato também está deve estar relacionado à função de calibração do modelo SMAP que é muito sensível ao erro quadrático dos desvios entre as observações e os valores simulados em acompanhar os picos das vazões mais intensas, geralmente, ocorrentes nestes anos de La Niña.

A figura 34 mostra as frequências de vazões diárias em várias intensidades simulada e observada para os meses janeiro a junho no período de 1971-2000. Nota-se que as vazões estimadas pelo modelo SMAP tendo como dados de entrada a precipitação simulada pelo MRE e corrigida pela técnica das PDFs, conseguiu capturar as frequências das vazões em quase todos os meses nas diferentes intensidades, apresentando pequena diferença entre os percentuais obtidos com as observações e as estimadas com o SMAP. Ocorreu uma superestimativa da frequência observada em relação à simulada para vazões menores ou iguais a $10 \text{ m}^3/\text{s}$ em todos os meses, sendo esta diferença maior em janeiro e junho. Para vazões acima de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ as frequências

simuladas foram maiores do que as observadas, na maioria dos meses, também com maiores diferenças nos meses de janeiro e junho.





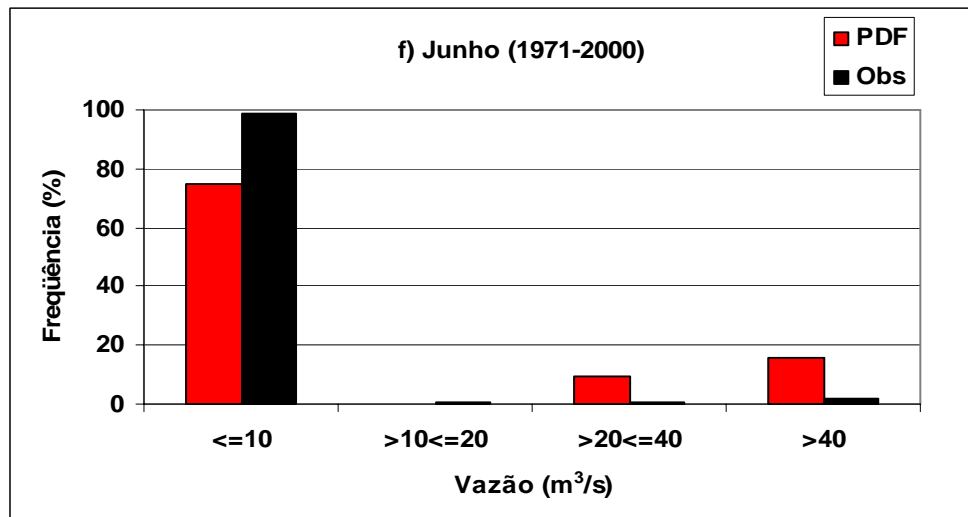
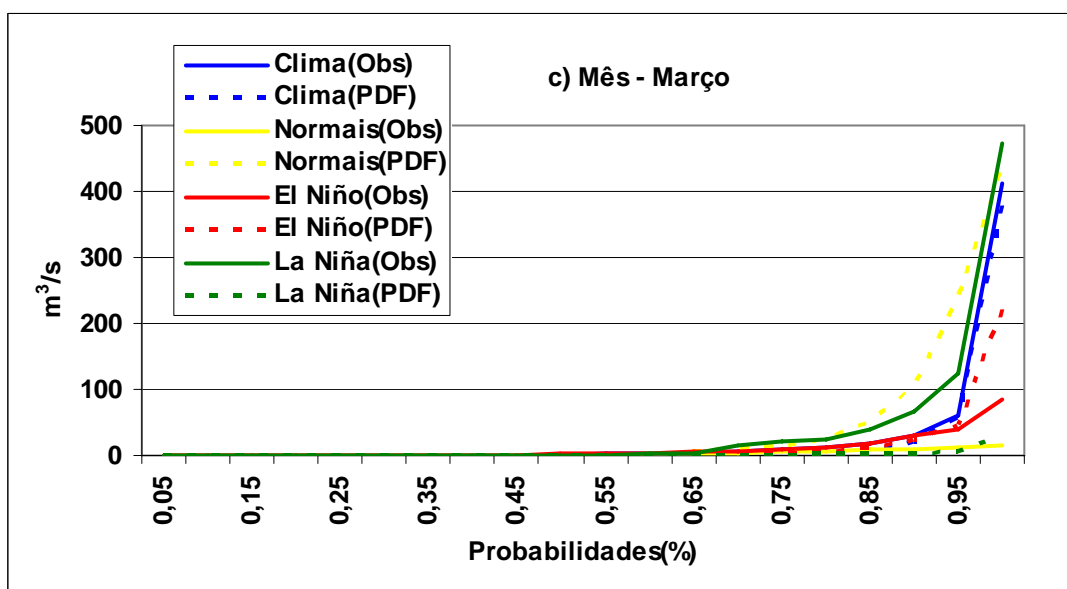
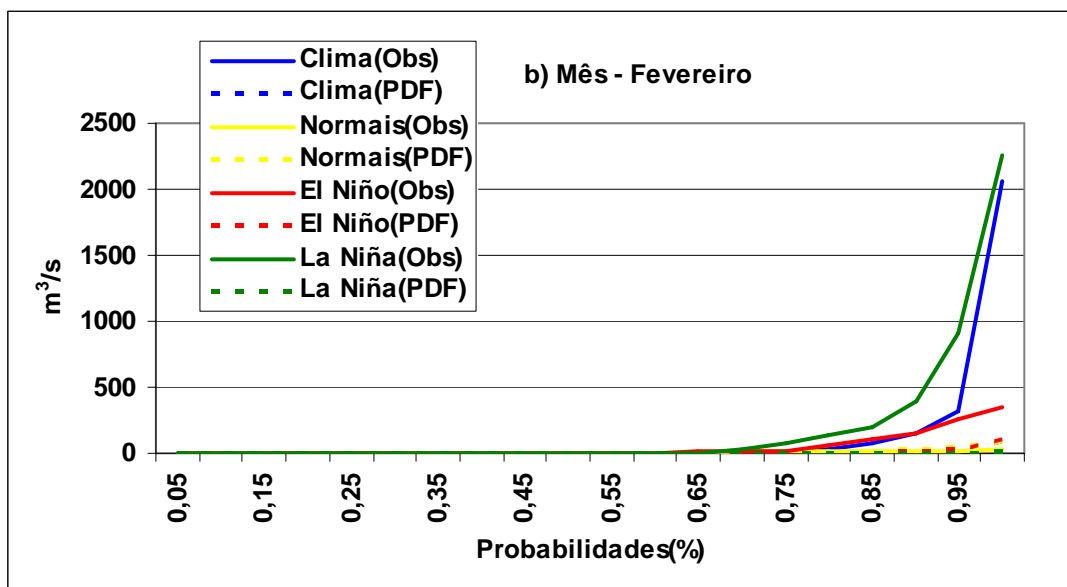
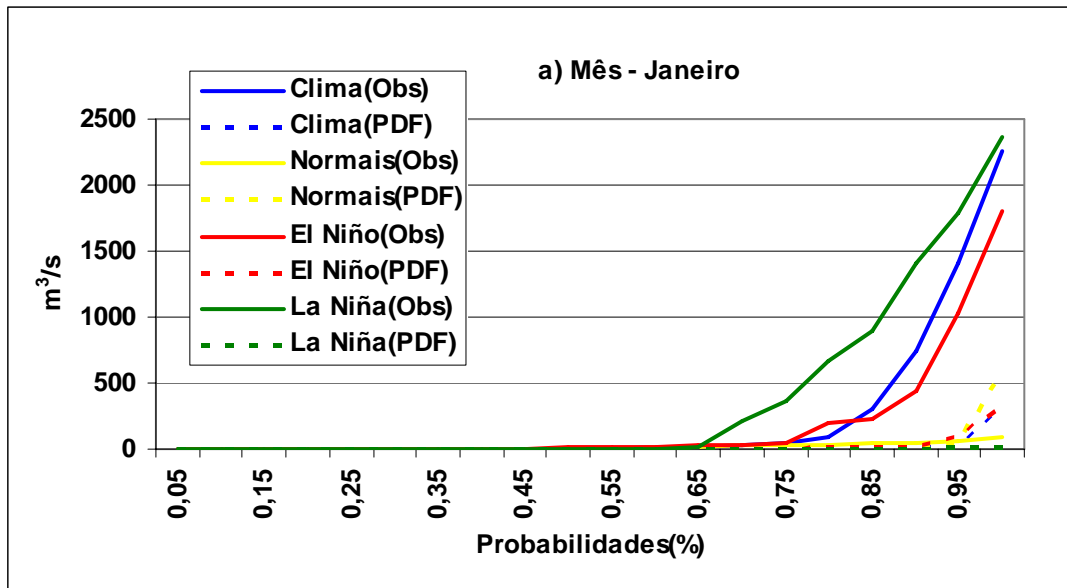


FIGURA 34 - Histogramas de vazão diária observada e simulada pelo modelo SMAP tendo como variável de entrada a precipitação, média dos 10 membros, simulada pelo MRE corrigida pela técnica das PDFs. a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio e f) junho.

A figura 35 mostra as funções densidade de probabilidade (Fdps) mensais de janeiro a junho da vazão observada e corrigida pela técnica das PDFs na bacia hidrográfica do posto fluviométrico do Iguatu para os anos de contrastess climáticos (El Niño, La Niña e Normais) e para o período de 30 anos (1971-2000) definido como clima.

A variabilidade interanual para os anos de contrastess climáticos e para a média de 30 anos, não foi capturada pelo modelo SMAP, quando este usou a precipitação do MRE corrigida pelas PDFs. Nota-se que as Fdps das vazões observadas, em todos os meses, mostram maiores vazões nos anos de La Niña, valores em geral, acima da climatologia, seguidos de anos de El Niño e Normais, com valores abaixo dos valores médios (clima). Estas características não foram verificadas nas Fdps simuladas.

Características mensais, para os últimos 25% de probabilidades – indicativos de vazões mais intensas, mostraram que as curvas das Fdps observadas superestimaram as simuladas nos meses de janeiro, fevereiro e junho, e foram subestimadas nos meses de abril e maio. Estas apresentaram um melhor desempenho no mês de março, principalmente na média dos 30 anos e para a composição dos anos de El Niño. Em geral, nos 75% de vazões mais baixas, houve uma melhor aproximação entre as Fdps observadas e simuladas em todos os meses.



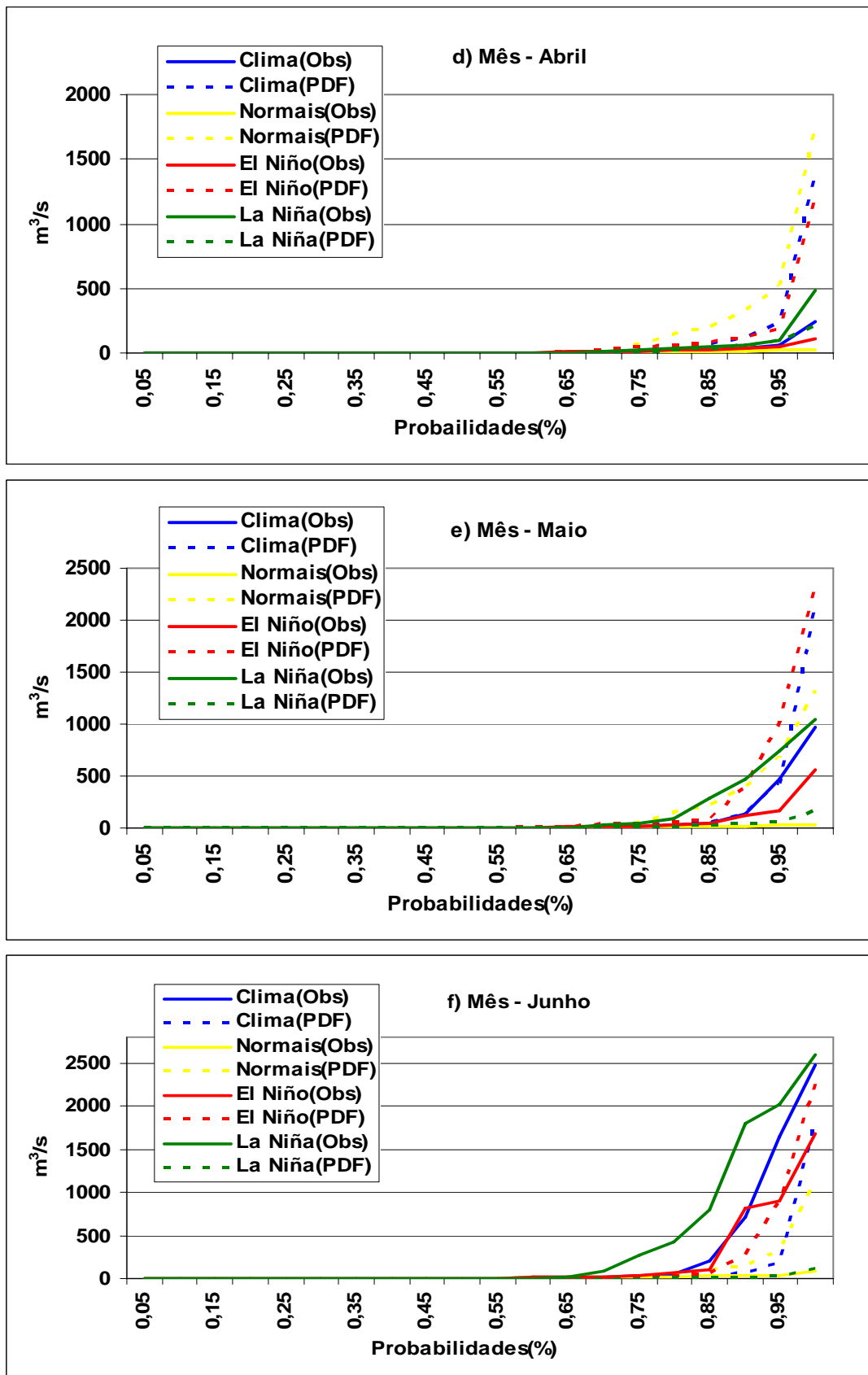


FIGURA 35 - Funções densidade de probabilidades (Fdps) para vazão observada e simulada pelo modelo SMAP tendo como entrada a precipitação simulada pelo MRE corrigido pelas PDFs. a) janeiro, b) fevereiro, c) março, d) abril, e) maio e f) junho.

Na figura 36 apresenta-se a freqüência de acerto do sinal da anomalia entre a vazão estimada pelo modelo SMAP tendo como variável de entrada a precipitação simulada pelo MRE e corrigida pelas PDFs e a vazão observada. Foi considerada uma freqüência de acerto quando ocorreu coincidência de sinal negativo ou positivo ou anomalias nulas entre as anomalias pentadais observadas e simuladas. Pode-se observar nesta figura 30 que quase em todos os meses as freqüências são em torno de 70% ou acima, exceto no mês de fevereiro, março, abril, maio e junho para os anos Normais cujas freqüências ficaram da ordem de 60%. Pode-se notar também que comparado a figura 28, da precipitação, estas freqüências de acerto das vazões tiveram um ganho em percentual para todo o período (1971-2000) e para os anos de La Niña e El Niño em torno de 20% a 30%.

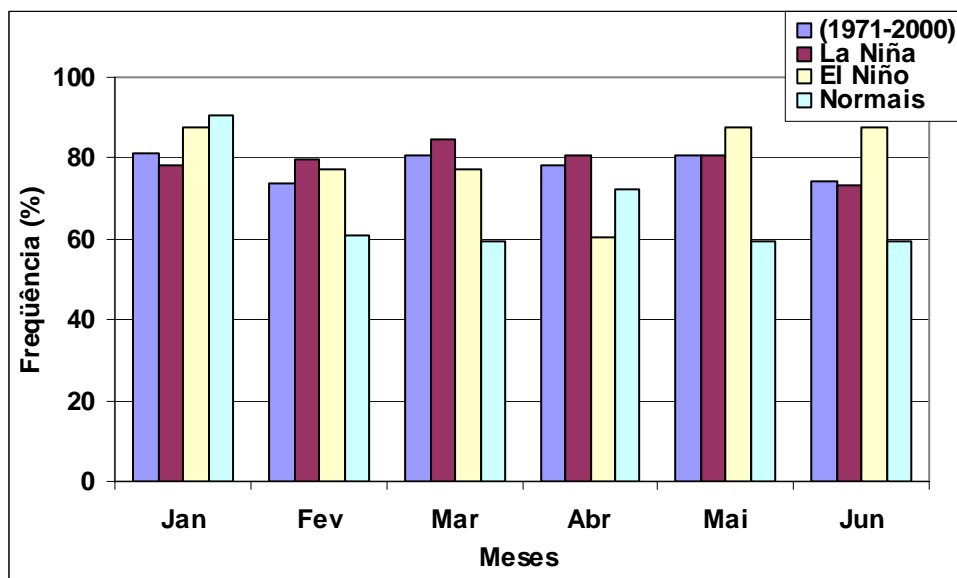


FIGURA 36 - Freqüência de ocorrência de acerto no sinal da anomalia pentadal da vazão observada e a simulada pelo modelo SMAP tendo como variável de entrada a precipitação MRE corrigida pelas PDFs para todos os anos (1971-2000), para os anos de La Niña, El Niño e Normais.

TABELA 8 – Índices estatísticos usados na avaliação de desempenho da vazão para períodos diários, pentadais e quinzenais (janeiro a junho) para todo o período de estudo (1971-2000) em anos de La Niña, de El Niño e Normais. ttab e tcal indicam os valores da estatística de prova e sig a sua significância. As outras siglas estão definidas na seção de metodologia. Um asterisco na tabela indica correlação não significativa a 95%.

Diário (1971-2000)											
	r	ttab	tcal	sig(%)	bias	ra	EQM	EAM	EAMD	EQMD	CD
1971-2000	0,55	1,96	3,55	95,00	113,24	0,63	304,40	113,24	0,28	267,77	0,64
La Niña	0,58	1,93	2,47	95,00	243,77	0,62	430,01	243,77	0,02	354,43	0,62
El Niño	0,25	1,78	0,69	*	-0,26	0,63	123,49	24,23	96,42	160,23	0,54
Normais	0,46	1,82	1,48	*	-0,26	0,72	101,78	6,24	94,59	155,49	0,67
Pêntadas (1971-2000)											
	r	ttab	tcal	sig(%)	bias	ra	EQM	EAM	EAMD	EQMD	CD
1971-2000	0,59	1,96	3,94	95,00	84,45	0,58	256,07	84,45	2,10	227,21	0,63
La Niña	0,61	1,93	2,70	95,00	195,12	0,58	377,11	195,12	0,46	308,92	0,50
El Niño	0,40	1,78	1,15	*	-0,17	0,52	91,19	15,87	84,61	135,34	0,90
Normais	0,52	1,82	1,70	*	-0,20	0,63	75,88	6,68	84,64	134,02	0,94
Quinzenas (1971-2000)											
	r	ttab	tcal	sig(%)	bias	ra	EQM	EAM	EAMD	EQMD	CD
1971-2000	0,69	1,96	5,10	95,00	84,45	0,51	237,60	84,45	4,92	207,89	0,66
La Niña	0,71	1,93	3,51	95,00	195,12	0,51	351,98	195,12	0,75	281,70	0,53
El Niño	0,53	1,78	1,67	*	-0,17	0,40	78,47	17,18	84,61	124,61	0,92
Normais	0,58	1,82	2,03	95,00	-0,20	0,54	61,25	5,02	84,64	125,07	0,96

8.5 Simulação do reservatório

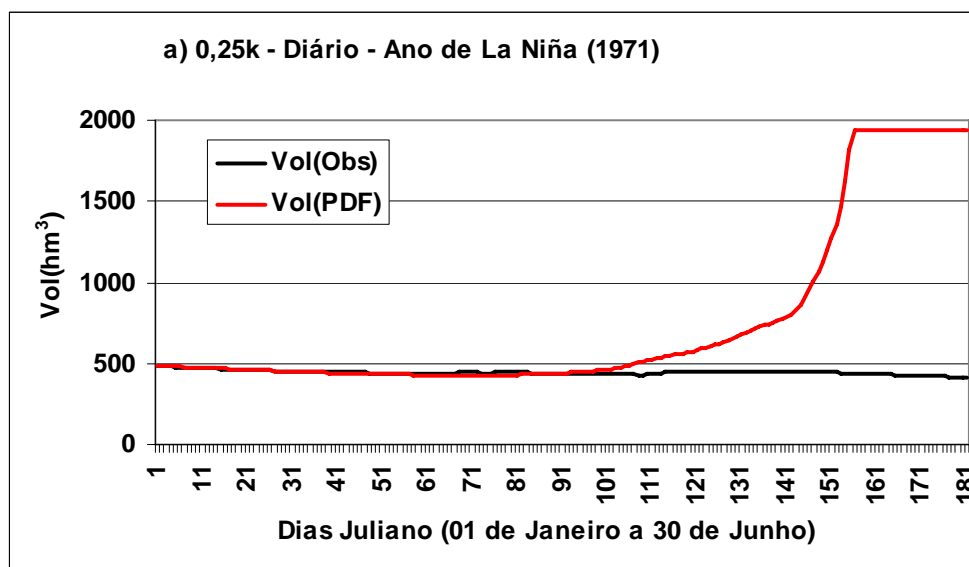
Nesta seção são analisadas as variações diárias de volume do reservatório hipotético simulado com volumes iniciais de 0,25k para todo o período (1971-2000) para os anos de La Niña, de El Niño e Normais somente com dados completos de vazão observada diária de janeiro a junho. Oito anos foram selecionados (1971, 1972, 1975, 1976, 1977, 1978, 1979 e 1999). O volume simulado Vol(PDF) teve como dado de entrada as vazões afluentes e as precipitações simuladas pelo MRE corrigidas pela técnica das PDFs. Comparações foram feitas com o Vol(Obs), volumes estimados com as vazões afluentes observadas. As análises abaixo foram feitas somente para $V_0=0,25k$. Na seção de anexos são mostradas as variações destes volumes para os volumes iniciais do reservatório com 0,50k e 0,75k.

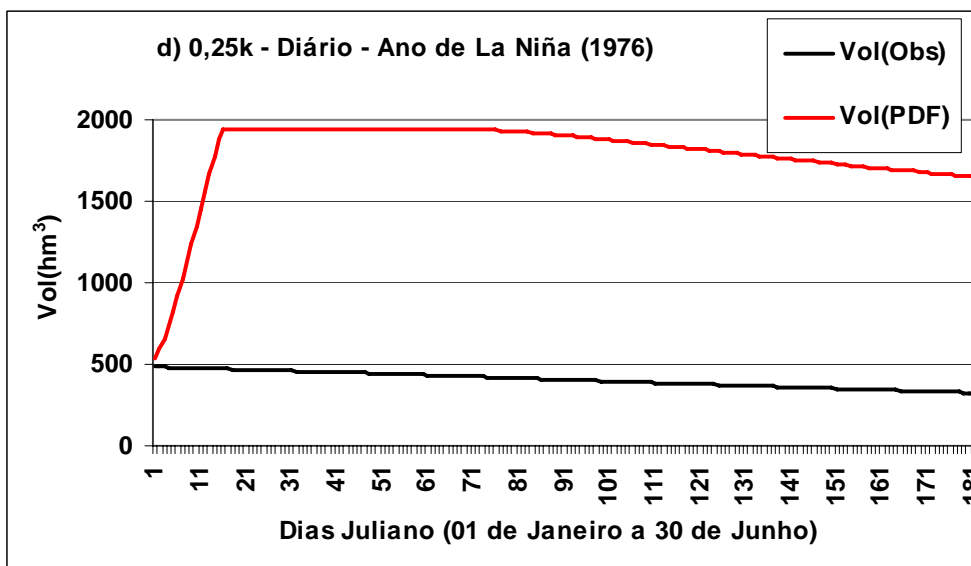
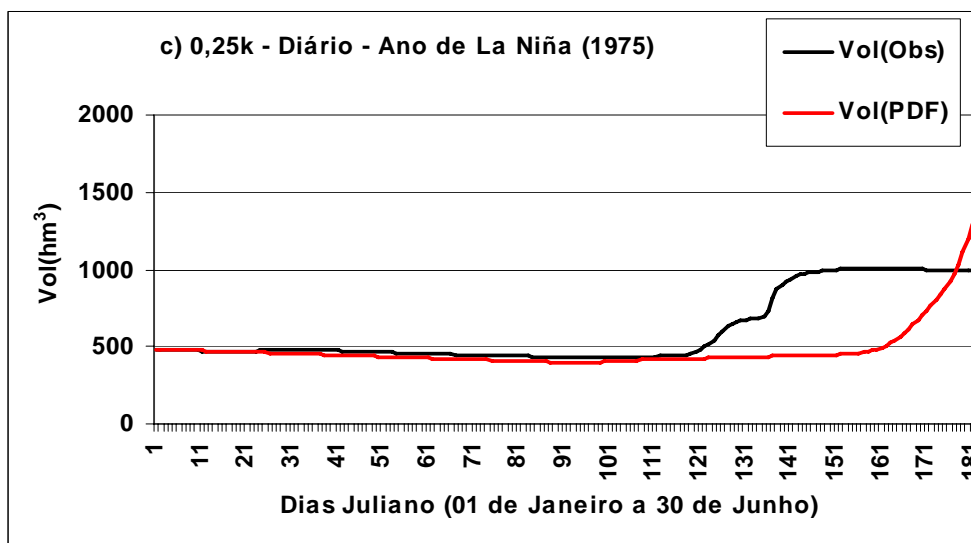
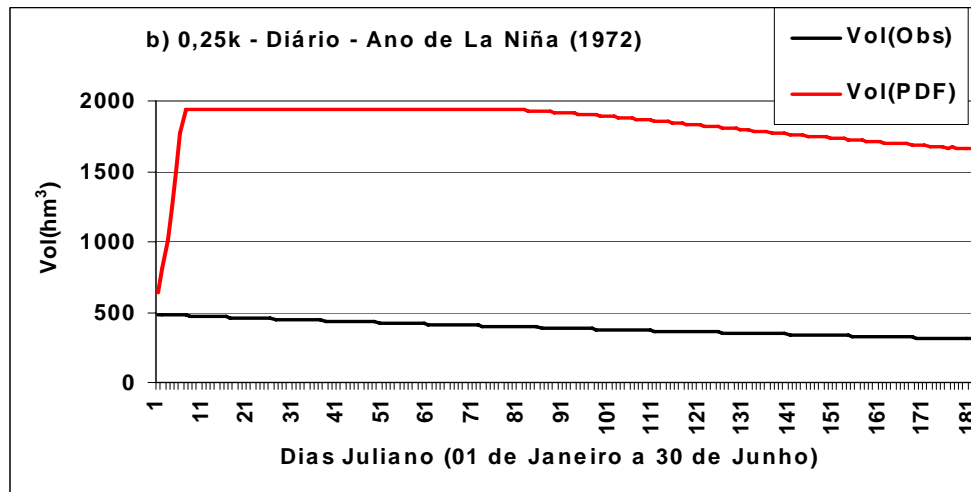
Nos anos de La Niña (figura 37), as variações de volume simulado se aproximaram do volume observado principalmente entre os meses de janeiro a abril nos anos de 1971, 1975 e 1999. Nestes anos a partir do mês de maio e junho, como as precipitações simuladas foram bem mais intensas do que nas observações, esta característica refletiu-se nas vazões simuladas e no volume simulado do reservatório, cujas curvas se afastam do volume observado. Nos anos de 1972 e 1976, os volumes simulados superestimaram os observados desde o mês de janeiro, com valores bem superiores aos observados, com um fraco desempenho na simulação do volume do reservatório.

Nos anos Normais (1978 e 1979), a simulação do volume do reservatório foi mais aproximada à realidade em 1979 (figura 38), mantendo as características observadas nos anos de La Niña, com os dias dos meses de janeiro a abril, principalmente com valores simulados mais próximos do observado. A partir dos meados de abril, os valores simulados se afastam do observado, como citado anteriormente devido a um erro sistemático de superestimativa da simulação de precipitação pelo MRE, cuja correção não conseguiu melhor desempenho em alguns anos, cujo efeito é repassado ao cálculo da vazão. Embora, que em média, na precipitação este erro sistemático tenha diminuído como pode ser visto na figura 3. Em 1978, as simulações do volume foram muito intensas comparadas às observações, refletindo um excesso em cascata de chuva/vazão a partir de janeiro, característica também já observada em alguns anos de La Niña.

No ano de El Niño de 1977 (figura 39), as simulações do volume estiveram muito próximas do valor simulado com a vazão observada entre 01 de janeiro e início de março. A partir deste dia, os volumes simulados com as vazões observadas tiveram um incremento significativo que não foi acompanhado pelo volume simulado.

Relacionadas às configurações de ADIPs (ANDENBERG, 1979) não foi observada uma configuração típica como mostrada em Sólón (2005). Faz-se uma observação, nas ADIPs teóricas do estudo de Andenberg, (1979), cuja a simulação do reservatório tem período anual, enquanto neste estudo este foi diário. Para as simulações com $V_0=0,25K$ e $0,50K$ para todos os anos e anos de contrastes, em geral, a configuração de ADIP mais próxima foi da ADIP tipo V, não evidenciando nenhum ponto de excesso nem déficit de volume. Na variabilidade interanual, vale destacar períodos de excesso com o volume do reservatório simulado e observado atingindo a capacidade máxima em alguns anos (1977 e 1999). Além disso, o número de anos com vazão observada sem falhas diárias de janeiro a junho foi muito pequeno (oito anos) para se extrair conclusões mais categóricas sobre as configurações destas ADIPs.





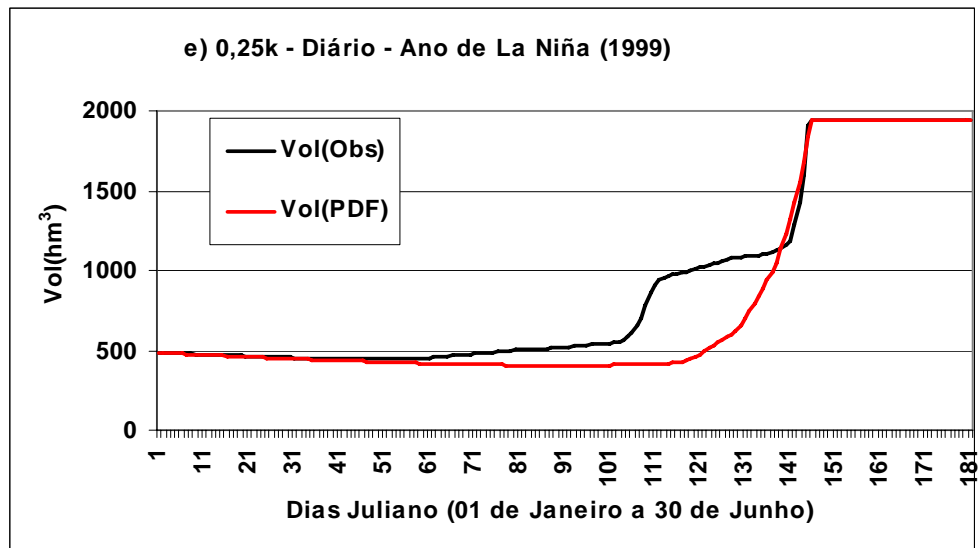


FIGURA 37 - Volumes diários simulados no reservatório com $V_0=0,25k$ em anos de La Niña a) 1971, b) 1972, c) 1975, d) 1976 e, e) 1999.

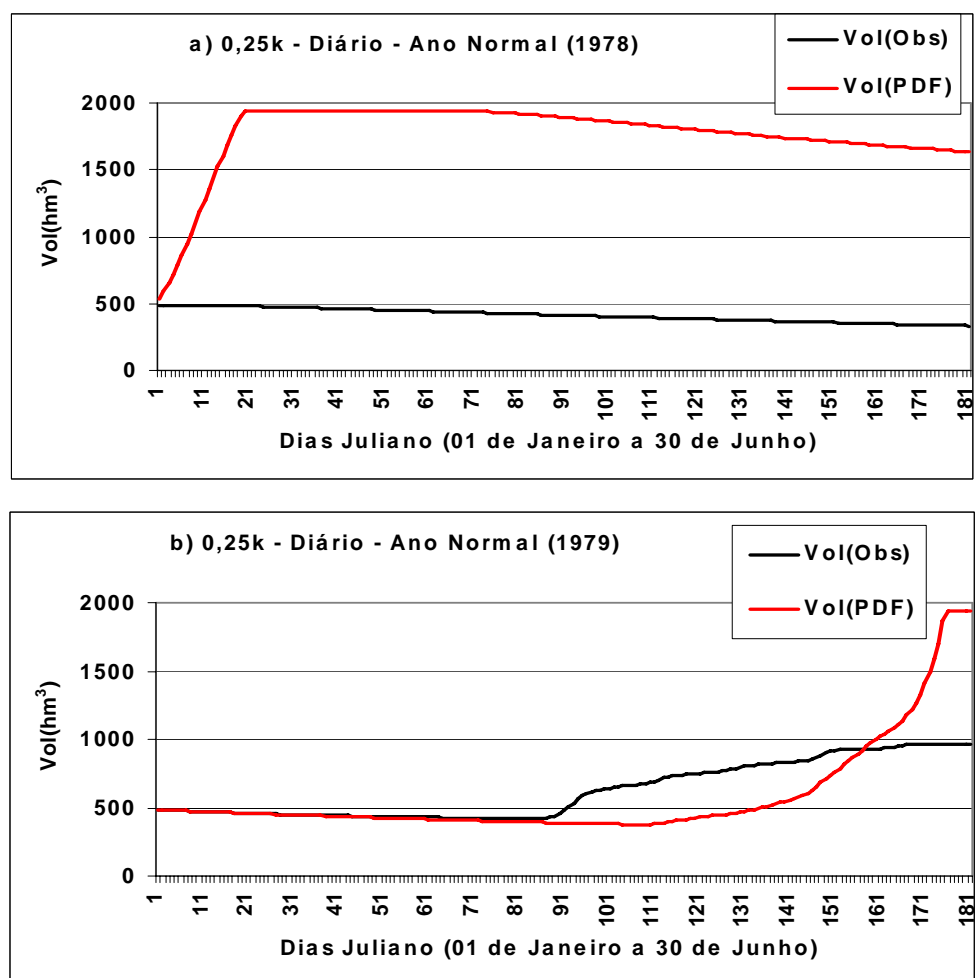


FIGURA 38 - Volumes diários simulados no reservatório com $V_0=0,25k$ em anos Normais a) 1978 e b) 1979.

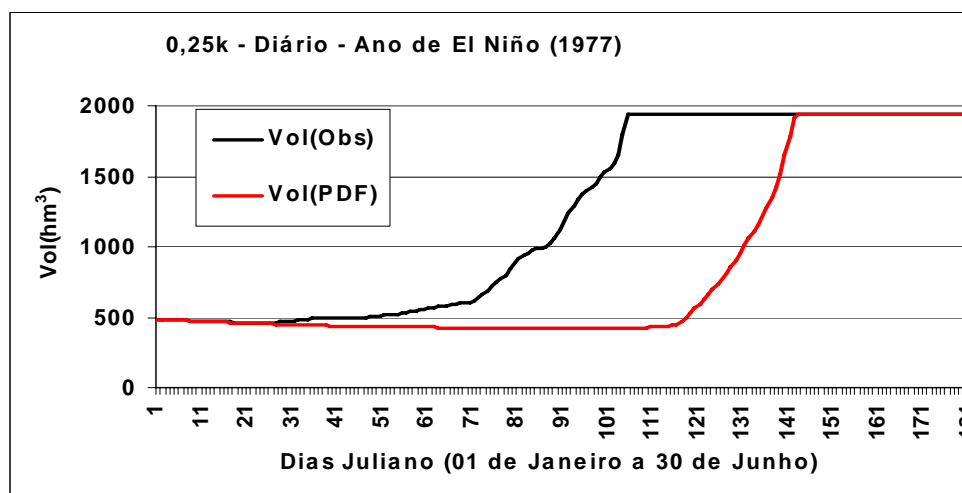


FIGURA 39 - Volumes diários simulados no reservatório com $V_0=0,25k$ em ano de El Niño (1977).

As tabelas 9, 10 e 11 mostram um sumário mensal de alguns dos índices de desempenho entre os Vol(simul) e o Vol(Obs) no reservatório hipotético com volumes iniciais de 0,25k, 0,50k e 0,75k. Estas simulações tiveram como dados de entrada as vazões simuladas pelo modelo SMAP e as observadas para períodos diários para cada mês de janeiro a junho. No modelo SMAP foram usados dados de entrada da precipitação simulada pelo modelo MRE corrigidos pelas PDFs para todo o período (1971-2000), considerando somente os oito anos com dados observados sem falhas diárias nas vazões, para os anos de La Niña e Normais. Não foram calculados esses índices para os anos de El Niño, por que, na escolha dos anos com vazões observadas sem falhas diárias de janeiro a junho entre 1971-2000 somente o ano de 1977 foi selecionado por este critério.

Pode-se notar que as correlações são negativas na maioria dos meses, exceto janeiro, para o período de 1971-2000 e para os anos de contrastes climáticos. A exceção são os anos Normais, cujos meses de janeiro, fevereiro e março mostraram correlações positivas, com valores que excedem a 0,70 chegando a valores acima de 0,90 significativos estatisticamente a 95%. Esta característica foi observada em todas as simulações com volumes iniciais de 0,25k, 0,50k e 0,75k.

Analisando-se os *bias*, nota-se que em função do volume inicial da simulação estes aumentam de valores oscilando de 275 hm^3 em abril para todo o período de 1971-2000 para 727 hm^3 nos anos de La Niña para $V_0=0,25k$. Esta amplitude no erro foi a maior comparado a observada quando as simulações foram feitas para os $V_0=0,50k$ e $V_0=0,75k$.

Conclusões categóricas entre os volumes do reservatório simulado com os dados observados e os estimados devem ser feitas com cautela, pois o número de anos no período total 1971-2000 (oito anos) é muito pequeno, incluindo cinco de La Niña (1971, 1972, 1975, 1976 e 1999), dois Normais (1978 e 1979) e um de El Niño (1977).

Nesta seção são analisados os resultados da tabela de contingência somente para os dados diários dos volumes simulados para o reservatório com $V_0=0,25k$, $V_0=0,50k$ e $V_0=0,75k$. Os resultados para os períodos de cinco dias (pêntadas) e quinzenas não são mostrados, pois apresentaram resultados semelhantes. Nesta estatística foram usados os anos sem falhas na vazão diária observada no período de estudo (1971-2000).

TABELA 9 - Índices estatísticos usados na avaliação de desempenho do volume do reservatório para períodos diários (janeiro a junho) para as simulações com $V_0=0,25k$ para todo o período de estudo (1971-2000) em anos de La Niña e Normais. *ttab* e *tcal* indicam os valores da estatística de prova e *sig.* a sua significância. As outras siglas estão definidas na seção de metodologia. Um asterisco na tabela indica correlação não significativa a 95%.

Diário - 1971-2000 (0,25k)						
	r	ttab	tcal	sig(%)	bias	ra
JAN	0,24	1,82	0,65	*	425,45	0,01
FEV	-0,18	1,82	-0,48	*	482,01	0,03
MAR	-0,25	1,82	-0,67	*	490,62	0,11
ABR	-0,28	1,82	-0,76	*	449,63	0,33
MAI	-0,21	1,82	-0,56	*	437,47	0,48
JUN	-0,12	1,82	-0,32	*	479,97	0,62
Diário - La Niña - (0,25k)						
	r	ttab	tcal	sig(%)	bias	ra
JAN	-0,17	1,69	-0,30	*	615,10	0,01
FEV	-0,29	1,69	-0,53	*	686,11	0,02
MAR	-0,31	1,69	-0,57	*	716,94	0,02
ABR	-0,34	1,69	-0,63	*	727,97	0,03
MAI	-0,27	1,69	-0,49	*	712,23	0,13
JUN	-0,27	1,69	-0,48	*	698,59	0,21
Diário - Normais - (0,25k)						
	r	ttab	tcal	sig(%)	bias	ra
JAN	0,99	1,65	6,79	95,0	501,41	0,02
FEV	0,98	1,65	5,56	95,0	613,33	0,01
MAR	0,75	1,65	1,15	*	655,86	0,01
ABR	-0,42	1,65	-0,46	*	639,46	0,10
MAI	-0,53	1,65	-0,63	*	620,77	0,17
JUN	-0,43	1,65	-0,48	*	657,34	0,26

TABELA 10 - Índices estatísticos usados na avaliação de desempenho do volume do reservatório para períodos diários (janeiro a junho) para as simulações com $V_0=0,50k$ para todo o período de estudo (1971-2000) em anos de La Niña e Normais. *ttab* e *tcal* indicam os valores da estatística de prova e *sig* a sua significância. As outras siglas estão definidas na seção de metodologia. Um asterisco na tabela indica correlação não significativa a 95%.

Diário - 1971-2000 (0,50k)						
	r	ttab	tcal	sig(%)	bias	ra
JAN	0,30	1,82	0,84	*	334,81	0,03
FEV	-0,16	1,82	-0,42	*	347,69	0,06
MAR	-0,24	1,82	-0,66	*	331,02	0,26
ABR	-0,35	1,82	-0,99	*	285,73	0,47
MAI	-0,30	1,82	-0,82	*	279,05	0,66
JUN	-0,21	1,82	-0,57	*0	306,24	0,83
Diário - La Niña - (0,50k)						
	r	ttab	tcal	sig(%)	bias	ra
JAN	-0,16	1,69	-0,28	*	483,99	0,02
FEV	-0,32	1,69	-0,57	*	516,26	0,04
MAR	-0,35	1,69	-0,64	*	536,36	0,05
ABR	-0,37	1,69	-0,70	*	545,90	0,07
MAI	-0,27	1,69	-0,49	*	519,76	0,34
JUN	-0,19	1,69	-0,33	*	501,63	0,56
Diário - Normais - (0,50k)						
	r	ttab	tcal	sig(%)	bias	ra
JAN	0,99	1,65	7,01	95,0	424,72	0,04
FEV	0,99	1,65	6,88	95,0	461,63	0,03
MAR	0,76	1,65	1,18	*	477,27	0,03
ABR	-0,41	1,65	-0,44	*	427,33	0,23
MAI	-0,46	1,65	-0,52	*	389,96	0,43
JUN	-0,24	1,65	-0,24	*	411,52	0,64

TABELA 11 - Índices estatísticos usados na avaliação de desempenho do volume do reservatório para períodos diários (janeiro a junho) para as simulações com $V_0=0,75k$ para todo o período de estudo (1971-2000) em anos de La Niña e Normais. *ttab* e *tcal* indicam os valores da estatística de prova e *sig* a sua significância. As outras siglas estão definidas na seção de metodologia. Um asterisco na tabela indica correlação não significativa a 95%.

Diário - 1971-2000 (0,75k)						
	r	ttab	tcal	sig(%)	bias	ra
JAN	0,31	1,82	0,87	*	183,54	0,07
FEV	-0,16	1,82	-0,42	*	181,54	0,16
MAR	-0,31	1,82	-0,85	*	163,57	0,40
ABR	-0,45	1,82	-1,32	*	132,88	0,63
MAI	-0,35	1,82	-0,98	*	141,96	0,86
JUN	-0,19	1,82	-0,51	*	165,02	1,06
Diário - La Niña - (0,75k)						
	r	ttab	tcal	sig(%)	bias	ra
JAN	-0,23	1,69	-0,41	*	287,46	0,07
FEV	-0,42	1,69	-0,81	*	310,95	0,12
MAR	-0,46	1,69	-0,91	*	331,44	0,14
ABR	-0,48	1,69	-0,94	*	344,57	0,17
MAI	-0,33	1,69	-0,60	*	328,27	0,61
JUN	-0,13	1,69	-0,24	*	329,32	0,86
Diário - Normais - (0,75k)						
	r	ttab	tcal	sig(%)	bias	ra
JAN	0,98	1,65	4,55	95,0	234,48	0,09

FEV	0,98	1,65	5,09	95,0	249,96	0,08
MAR	0,74	1,65	1,10	*	259,02	0,07
ABR	-0,41	1,65	-0,46	*	191,82	0,51
MAI	-0,36	1,65	-0,39	*	174,62	0,79
JUN	-0,14	1,65	-0,14	*	193,62	1,01

As tabelas 12, 13, e 14 mostram a frequência em percentual de acerto em cada categoria de intervalos de volume entre o observado e o simulado, e os erros condicionais quando foi volume observado esteve em uma dada categoria e o volume simulado ocorreu em uma outra categoria (faixa). Pode ser observado que o maior percentual de acerto nas categorias entre os volumes observados e simulados foi da ordem de 30%, independentemente do volume inicial da simulação. Estes ocorreram quando o volume do reservatório esteve com valores $\leq 0,25k$, $>0,25k$ e $\leq 0,50k$ e $>0,50k$ e $\leq 0,75k$. Maiores erros condicionais ocorreram quando o volume do reservatório observado esteve nas categorias acima, porém o volume simulado diário do reservatório apresentou um percentual da ordem 40% com valores acima de 0,75k. Erros percentuais aproximados de 10% ou inferiores foram observados nas outras relações nas tabelas de contingências mostradas nas tabelas 12, 13 e 14.

TABELA 12 – Tabela de contingência de avaliação entre o volume diário observado e o simulado no reservatório (janeiro a junho) para as simulações com $V_0=0,25k$ para os anos sem falhas na vazão diária observada no período de estudo (1971-2000).

Observado	Simulado (PDF)			
	$V \leq 0,25k$	$V > 0,25k$ e $V = 0,50k$	$V > 0,50k$ e $V \leq 0,75k$	$V > 075k$
$V \leq 0,25K$	29,28	3,38	0,90	37,43
$V > 025K$ e $V \leq 0,50k$	10,64	2,21	1,31	0,83
$V > 05k$ e $V = 0,75k$	2,69	2,14	0,76	0,07
$V > 075k$	1,31	0,90	0,55	5,59

TABELA 13 – Tabela de contingência de avaliação entre o volume diário observado e o simulado no reservatório (janeiro a junho) para as simulações com $V_0=0,50k$ para todo o período de estudo (1971-2000).

Observado	Simulado (PDF)			
	$V \leq 0,25k$	$V > 0,25k$ e $V \leq 0,50k$	$V > 0,50k$ e $V \leq 0,75k$	$V > 075k$
$V \leq 0,25K$	0,00	0,00	0,00	0,00
$V > 025K$ e $V \leq 0,50k$	0,00	29,28	2,62	39,09
$V > 05k$ e $V \leq 0,75k$	0,00	8,70	0,28	0,76
$V > 075k$	0,00	5,94	3,25	10,08

TABELA 14 – Tabela de contingência de avaliação entre o volume diário observado e o simulado no reservatório (janeiro a junho) para as simulações com $V_0=0,75k$ para todo o período de estudo (1971-2000).

Observado	Simulado (PDF)			
	$V \leq 0,25k$	$V > 0,25k$ e $V \leq 0,50k$	$V > 0,50k$ e $V \leq 0,75k$	$V > 0,75k$
$V \leq 0,25k$	0,00	0,00	0,00	0,00
$V > 0,25k$ e $V \leq 0,50k$	0,00	0,00	0,00	0,00
$V > 0,50k$ e $V \leq 0,75k$	0,00	0,00	29,28	41,71
$V > 0,75k$	0,00	0,00	14,64	14,36

A figura 40 resume, em termos de explicação da variância, analisando-se valor do coeficiente de correlação ao quadrado a proposta do estudo no período de 1971-2000 e nos anos de contrastes climáticos. Essa figura mostra a correlação na escala diária, pentadal e quinzenal para a variável precipitação e vazão. Nesta figura pode-se observar um ganho de explicação da variância à medida que os dados passam de diários a acumulados por pântadas e quinzenas, sendo crescente esta explicação da precipitação para a vazão (mais de duas ou mais vezes a explicação da variância nos dados de vazão do que para a precipitação). Como, exemplo, para o período de 1971-2000, pode-se notar que para a precipitação o $r=0,12$ (explicando menos de 2% da variabilidade da precipitação entre 01 de janeiro a 30 de junho), enquanto para vazão o $r=0,55$ (explicando mais de 30% da variabilidade das vazões observadas neste mesmo período). Análises similares podem ser feitas para a composição dos demais anos e para as escalas pentadais e quinzenais.

Uma análise como acima não foi feita para a variabilidade do volume do reservatório, por que a característica de aumento da explicação da variância não foi observada. A maioria dos coeficientes de correlação foi negativa, com exceção para a composição de anos Normais.

Esses resultados sugerem que a simulação de precipitação, quando usada em escala de bacia hidrográfica, com efeito, cascata modelo chuva-vazão e operação de reservatório, por exemplo, para anos específicos como Normais, sempre lembrando que esses resultados não devem ser generalizados, têm potencial para gerenciamento e otimização de recursos hídricos. Pode ser observado que explicação da variância do volume mensal diários na maioria dos meses simulado no reservatório, em relação ao estimado com os dados observados, foi acima ou em torno de 80%, neste caso específico dos anos Normais (tabelas 9, 10 e 11), embora devido à amostra de anos

Normais, como citado anteriormente, ser pequena para se extrair conclusões mais categóricas.

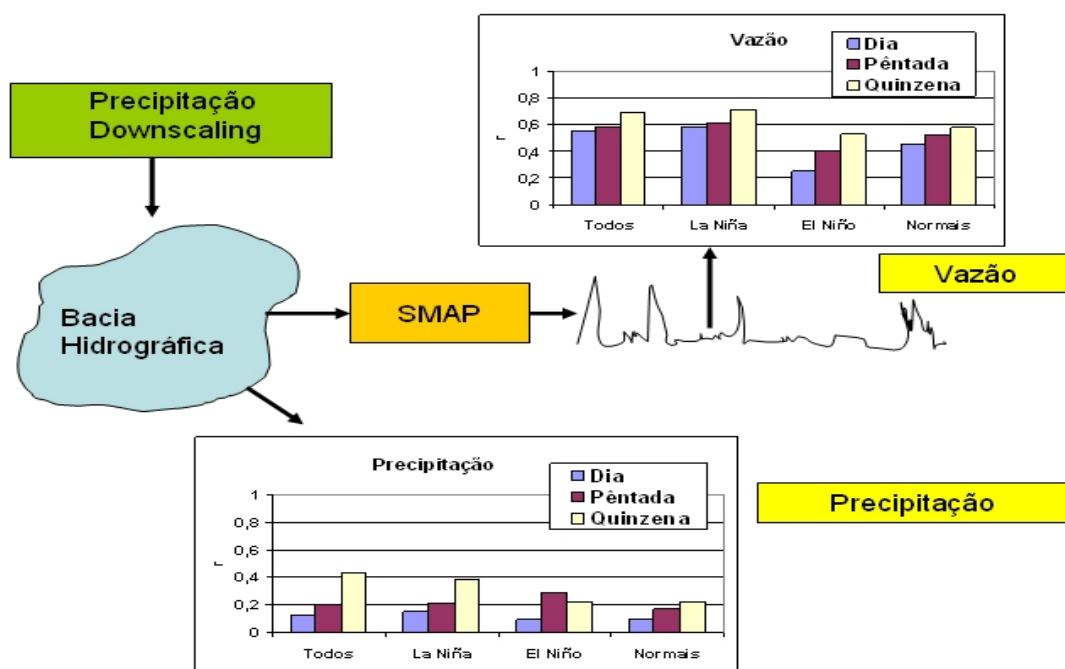


FIGURA 40 - Diagrama esquemático mostrando uma síntese (avaliação em função do coeficiente de correlação) dos resultados em cascata (precipitação e vazão) na bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu. Todos na legenda significam (1971-2000).

9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Entre as principais conclusões do estudo citam-se: o MRE apresentou erro sistemático com predomínio de subestimativa da precipitação pluviométrica na bacia do posto fluviométrico de Iguatu nas escalas de tempo pentadal, quinzenal e mensal nos meses de fevereiro a maio, e superestimativa nos meses de janeiro e junho. Após a correção pela técnica das PDFs, os dados simulados pelo MRE, conseguiu capturar melhor a variabilidade diária da precipitação no posto fluviométrico de Iguatu, média entre 01 de janeiro e 30 de junho. A explicação da variância antes da correção foi de menos de 5%, passando a em torno de 40% após as correções pelas PDFs. Quantitativamente nas escalas diária, pentadal e quinzenal o MRE e sua correção apresentou valores mais próximos do observado a partir da segunda metade da década de 80, período que foi climatologicamente mais seco sobre o NEB, em particular os anos 90. Entretanto, desvios diários (janeiro a junho) mostraram que 80% dos dias 1971-2000 tanto com os dados brutos como os corrigidos pelas PDFs apresentaram valores de mais ou menos 40% do valor observado, tendo somente em torno de 20%

desses desvios com valores de $\pm 10\%$. O MRE corrigido pelas PDFs foi capaz de capturar, em grande parte, o sinal das anomalias positivas (negativas) ou nulas de precipitação na bacia do posto fluviométrico de Iguatu intrasazonalmente que predominaram nos anos de contrastes climáticos de La Niña, El Niño e Normais observados no Pacífico Tropical. A explicação da variância dos totais de precipitação diária, pentadal e quinzenal foi da ordem de menos de 2%, 4% e 18%, respectivamente.

Histogramas de frequências com várias intensidades de precipitação diária mostraram que a simulação do MRE corrigida teve um bom desempenho na simulação intrasazonal da frequência de ocorrência de chuva em várias intensidades comparadas as frequências observadas. Os resultados mostraram que as frequências simuladas e observadas tiveram valores em magnitudes muito próximas. Vale mencionar, que se suspeita, que correções com dados acumulados de cinco e quinze dias, diminuem mais o erro sistemático dos dados brutos simulados pelo MRE em relação ao observado, do que corrigir diariamente e usar esses para inferências de totais acumulados pentadais e quinzenais, como foi feito neste estudo.

As simulações de vazão mostraram que os dados de precipitação usados como entrada no modelo SMAP conseguiu reproduzir o aumento das vazões de janeiro a abril, embora superestimando esses totais, com valores mais consistentes com observado na composição de anos de La Niña e de El Niño. Nos meses de maio e junho foi observado um aumento de vazão nos dados simulados, não verificados nas observações. As simulações de vazão, analisadas pela explicação da variância, coeficiente de correlação ao quadrado, mostraram que há um ganho de explicação da variância de duas ou mais vezes, quando se compara esta explicação para vazão em relação à precipitação. Este ganho foi observado tanto para períodos diários, pentadais e quinzenais para todo o período (1971-2000).

A simulação de vazão diária pelo modelo SMAP, tendo como dados de entrada a precipitação simulada pelo MRE corrigida pela técnica das PDFs, foi capaz de capturar com um bom desempenho a frequência das vazões observadas em várias intensidades. Não foi observada diferença significativa na magnitude destas frequências simuladas e as observadas na vazão afluente diária do posto fluviométrico de Iguatu. Igualmente, os resultados mostraram boa acurácia na frequência de acerto do sinal positivo (negativo) ou neutro da anomalia pentadal (janeiro a junho) das vazões observadas e estimadas pelo modelo SMAP. Mais de 70% do sinal das anomalias pentadais de vazão foram bem simulados.

Simulações diárias de volume de um reservatório hipotético (com as características do Açude Orós), com $V_0=0,25k$, $0,50k$ e $0,75k$, mostraram que há potencial do uso dessa informação de precipitação em cascata com o modelo chuva-vazão, em particular para os anos classificados como Normais. A explicação da variância entre os volumes simulados e observados diários, para os meses de janeiro a junho, para estes anos Normais tiveram resultados mais expressivos. A explicação da variância ficou torno ou mais de 80%, embora se ressaltando que a amostra de anos analisados, apenas dois anos Normais com vazões observadas sem falhas diárias de janeiro a junho, é pequena para se extrair conclusões mais categóricas a esta questão. Há necessidade de um maior número de anos para análises mais consistentes.

Para os anos de La Niña e de El Niño, as correlações entre os volumes diários do reservatório simulado e o observado foram negativas. Os meses de janeiro e fevereiro em grande parte dos anos os volumes simulados e observados apresentaram-se mais próximos em magnitude. Exceção foram os anos com precipitação simulada mais intensa que a observada em janeiro, fato que influenciou na estimativa de vazões pelo modelo SMAP bem mais altas do que as observadas.

Comparado as ADIPs propostas por Andenberg (1979) as simulações do reservatório com os três volumes iniciais ($V_0=0,25k$, $V_0=0,50k$ e $V_0=0,75k$) mostraram, em média, para os oito anos de contrastes climáticos, que a configuração de ADIP mais similar as propostas por este autor foi para ADIP tipo V (onde não é observado nenhum período de excesso nem de déficit no volume armazenado). Na questão da variabilidade interanual, vale mencionar períodos de excesso, com o volume simulado do reservatório atingindo a capacidade máxima em alguns anos (1977 e 1999). Resultados das tabelas de contingência mostraram que independente do V_0 do reservatório no início de janeiro, as simulações diárias (janeiro a junho), indicaram um acerto de aproximadamente 30% dos volumes observados e simulados no reservatório quando estes estiveram nas seguintes categorias de volumes: $V_0 < 0,25k$, $V_0 > 0,25$ e $\leq 0,50$ e $V_0 > 0,50$ e $\leq 0,75$. Erros condicionais, da ordem de 40% foram observados quando o volume observado esteve inserido nestas categorias e o volume estimado do reservatório esteve com um volume acima de $0,75k$.

É importante ressaltar, que a despeito das incertezas associadas ao processo chuva-deflúvio em uma bacia hidrográfica (desde a escassez de dados observados de precipitação e vazão, erros em suas medidas; além da não representatividade de todos os processos físicos da natureza nos modelos atmosféricos e hidrológicos que

simulam/prevêm precipitação e vazão) que os resultados apresentados sugerem o potencial de uso dessa informação de previsão climática hidrometeorológica, para escalas inferiores a sazonal (um mês ou acima).

Esta perspectiva deve-se, principalmente, porque, os modelos hidrológicos chuva-vazão, são integrados na escala espacial de uma bacia hidrográfica, fato que tende a reduzir incerteza da precipitação advinda da modelagem dinâmica da atmosfera; posteriormente melhorando as estimativas de vazão afluente (processo físico do escoamento também integrado de toda água precipitada) na bacia ou reservatório hídrico contribuindo para dar mais subsídio ao planejamento mais otimizado entre a oferta e demanda de água na bacia.

Mais uma vez vale destacar, que resultados para outras bacias hidrográficas devem ser diferentes, bem como com o uso de dados oriundos obtidos de outros modelos atmosféricos e hidrológicos.

Para estudos futuros, principalmente, no que diz respeito em melhorar o desempenho quantitativo do MR na variabilidade interanual nas escalas, diária, pentadal e quinzenal, sugerem-se rodadas com assimilação de dados ao longo da simulação (dados de re-análises ou médias climatológicas pentadais, por exemplo, de vento, temperatura, umidade específica, etc). Além de testar também o MRE aninhado a outros MCGAs e roda-los com TSMs previstas ou persistidas. Estudos em outras bacias hidrográficas com esse tipo de efeito cascata precipitação-vazão-simulação do reservatório devem ser encorajados no NEB para comparar os resultados com os obtidos neste estudo. Pode-se também fazer uma avaliação por conjuntos, tanto dos dados brutos do MRE, como os seus dados corrigidos, tendo um total de 20 membros. Uma análise estatística sobre esse conjunto de simulações poderia resultar no conceito de incertezas, e os resultados das vazões e volume dos reservatórios se associariam a este conceito. Com este conceito introduzido, ao invés de serem gerados um hidrograma ou uma curva de volume, seria gerado uma zona possível de vazões e volumes do reservatório. Esse tipo de informação foi implementado no *National Weather Service River Forecast* (Andreolli, 2003). Métodos estatístico-estocásticos de reamostragens (nearest K-neighbors – análogos) e os chamados *weather generator* que possibilitam geração de precipitação diária e seu acoplamento com modelagem hidrológica também são metas de estudos futuros, para serem comparados com o estudo desenvolvido.

REFERÊNCIAS

ALEXANDRE, A. M. B. **Regionalização de vazões máximas, médias e parâmetros de modelos hidrológicos no Estado do Ceará**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, área de concentração em Recursos Hídricos. Universidade Federal do Ceará. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Fortaleza, Ceará. 101p. 2005.

ALVES, J. M. B. *et. al.* Mecanismos atmosféricos associados à ocorrência de precipitação intensa sobre o Nordeste do Brasil em janeiro/2004. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.21, n.1, Abril, p.56-76, 2006.

ALVES, J. M. B. *et. al.* Uma avaliação preliminar entre simulações climáticas de um modelo global (*ECHAM4.5*) e um *downscaling* dinâmico para o setor norte da Região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.20, n.2, p.40-55, 2005.

ALVES, J. M. B. *et. al.* Uma aplicação da técnica de *downscaling* dinâmico no setor norte da Região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.18, n.2, p.161-180, 2003.

ALVES, J. M. B. Reanálise de índices de temperatura da superfície do mar no Atlântico e Pacífico tropicais potenciais indicadores da qualidade da estação chuvosa do setor norte do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, n.1 p.179-187. 2002.

ALVES, J. M. B.; REPELLI, C. A. e MELLO, N. G. A pré-estação chuvosa no Nordeste Brasileiro e sua relação com a temperatura dos oceanos adjacentes. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.8, n.1, p.22-30, 1993.

ALVES, J. M. B.; REPELLI, C. A. A variabilidade pluviométrica no setor norte do Nordeste e os eventos El Niño/Oscilação Sul (ENOS). **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.7, n.2, p.583-592, 1992.

ANDENBERG, L. A. W. **The anticipated decision influence period in real time reservoir operation**. Phd Thesis. Fort Collins, Colorado State University. 1979.

ANDERSEN, J. DYBKJAER, G.; JENSEN, K. H. RASMUSSEN, K. Use of remotely sensed precipitation and leaf area index in a distributed hydrological model. **Journal of Hydrology**. Londres, v.264, p. 34-50, 2004.

ANDRADE, P. R. G. S.; CURI, W. F.; CURI, R. C. Otimização da operação do sistema hídrico Jucazinho-Carpina, para múltiplos usos, via modelo de programação não linear. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, **Anais** 2001.

ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. Previsões de temperatura da superfície do mar no Atlântico Tropical usando análises de correlações canônicas. In: XII. Congresso Brasileiro de Meteorologia. Foz do Iguaçu-PR, Brasil, 2002. [CD ROM].

ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. Previsões de temperatura da superfície do mar no Atlântico Tropical usando análises de correlações canônicas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.20, n.1, p.84-93. 2005.

ANDREOLLI, I. **Previsão de Vazão em Tempo Real no Rio Uruguai com Base na Previsão Meteorológica**. 2003, 182f (Mestrado em Engenharia, área de concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

ARAÚJO, J. C.; JAEGER, A. e KROL, M. Possible climate change impacts on water resources availability in a large semiarid catchments in Northeast Brazil. In: REGIONAL HIDROLOGICAL IMPACTS OF CLIMATIC CHANGE – IMPACT ASSESSMENT AND DECISION MAKING (ed. By Thorsten Wagener, Stewart Franks, Hoshin V. Gupta, Eva Bøgh, Luis Bastidas, Carlos Nobre e Carlos De Oliveira Galvão), p.221-230. IAHS, n.295, British Library, Wallingford, Oxfordshire, UK, 2005.

ASHKAR, F.; ROUSSALE, J. Some remarks on the truncation used in partial flood series models. **Water Resources Research**, Boston, v.19, n.2, p. 477-480. 1993a.

AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B.; RODRIGUES, M. F. G. Previsão Estatística das chuvas de outono no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.13, n.1, p.19-30. 1998.

BARBOSA, D. L.; CURI, R. C.; CURI, W. F. **Um estudo de caso da operação integrada ótima de três reservatórios em paralelo com usos múltiplos**. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2001. [CD-ROM].

BARDOSSY, A.; DUKSTEINS, L. **Fuzzy rule-based modeling in geophysical economic, and engineering systems**. Boca Raton: CRC Press, 1995.

BARNSTON, A. G.; ROPELEWSKI, C. F. Prediction of ENSO episodes using canonical correlation analysis. **Journal of Climate**, Boston, v.5, n.11, p.1316-1345. 1992.

BARROS, V.; DOYLE, M. e CAMILLONI, I. Potential impacts of climate change in the plata basin. In: REGIONAL HIDROLOGICAL IMPACTS OF CLIMATIC CHANGE – IMPACT ASSESSMENT AND DECISION MAKING (ed. By Thorsten Wagener, Stewart Franks, Hoshin V. Gupta, Eva Bøgh, Luis Bastidas, Carlos Nobre e Carlos De Oliveira Galvão), p.11-18. IAHS, n.295, British Library, Wallingford, Oxfordshire, UK, 2005.

BARREIRO, M.; CHANG, P.; JI, L.; SARAVANAN, R.; GIANNINI, A. Dynamical elements of predicting borel spring tropical sea-surface temperatures. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**. Boston, Doi:10.1016/j.dynatmoce.2004.10.013.

BERBERY, E. H. ; BARROS, V. R. The hydrologic cycle of the La Plata Basin in South America. **Journal of Hydrometeorology**., Boston, v.3., n.6, p.630-645. 2003.

BERRY, G. J.; GHIETTO, M. A.; GARCIA, N. O. The influence of ENSO in the flows of the Upper Paraná River of South America over the past 100 years. **Journal of Hydrometeorology**, Boston, v.2, n.1, p.57-65. 2002.

BISCHOFF, S. A.; GARCIA, N. O.; VARGAS, W. M.; JONES, P. D.; CONWAY, D. Climatic variability and Uruguai river flows. **International Journal of Water**, Suécia, v.25, n.3, p446-456. 2002.

BJERKNES, J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. **Monthly Weather Review**, Boston, v.97, p.163-172. 1969.

BLACK, T. The new NMC mesoscale ETA model: Description and forecast examples. **Weather and Forecasting**., Boston, v.9, n.2, p.265-267. 1995.

BOLETIM da SOCIEDADE BRASILEIRA de METEOROLOGIA. **A Meteorologia e a Gestão de Energia**, São José dos Campos, v.26, n.2, 2002.

BÖHM, U. A.; PODZUM, R. B.; JACOB, D. C. Surface water balance estimation for a semi-arid region using a regional climate model and comparison of water balance components with global circulation model output and analysis data. **Physics Chemistry of Earth**, Londres, v.23. n.4, pp.405-411. 1998.

BRAGA JUNIOR, B. P. F. **Técnicas de otimização e simulação aplicadas em Sistemas de Recursos Hídricos**. In: Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos. São Paulo: Noble: ABRH. Cap.5, p427-517. 1987.

- BUCKLEY, R.; WEBER, A.; WEBER, J. Statistical comparison of regional atmospheric modeling system forecast with observations. **Meteorological Applications**, Cambridge Univ., Press, v.11, n.01, p.67-82. 2004.
- CANE, M. A. ZEBIAK, S. E. A theory for El Niño and Southern Oscillation, **Science**, Londres, v. 228, p. 1084-1087. 1985.
- CARDOSO, G. B. B. 2003. **Uso de otimização/simulação e previsão de aflúências na operação tática dos reservatórios do sistema Jaguaribe-Metropolitano**. 141f, 2003 (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Fortaleza, 2003.
- CARDOSO, A. O.; CLARKE, R. T.; DA SILVA DIAS, P. L. **A case of the use of sea-surface temperatures (SSTs) to obtain predictors of river flows**. In: REGIONAL HYDROLOGICAL IMPACTS OF CLIMATIC CHANGE – IMPACT ASSESSMENT AND DECISION MAKING (ed. By Thorsten Wagner, Stewart Franks, Hoshin V. Gupta, Eva Bøgh, Luis Bastidas, Carlos Nobre e Carlos De Oliveira Galvão), p.231-238. IAHS, n.295, British Library, Wallingford, Oxfordshire, UK, 2005.
- CLAUSSEN, M. U. *et. al.* **A global data set of land-surface parameters**. Max Planck Institut für Meteorologie, Report n.135, Hamburg, Germany, 23pp. 1994.
- CHARNEY, J. G.; FJØRTOFT, R.; VON NEUMANN, J. Numerical integration of the barotropic vorticity equation. **Tellus**, Estocolmo, vol.2, p.237-254. 1950.
- CHIANG J. C. H., KUSHNIR, Y.; ZEBIAK, E. Interdecadal changes in eastern Pacific ITCZ variability and its influence on the Atlantic ITCZ, **Geophysical Research Letters**, Boston, v.27, n.22, p.3687-3690 NOV 15, 2000.
- CHEN, C.; COTTON, W. R. A. **One-dimensional simulation of the stratocumulus-coupled mixed layer**. *Boundary Layer Meteorology*, Holanda, v.25, p.289-321. 1983.
- CHOU, S. C.; NUNES, A. M. B.; CAVALCANTI, I. F. A. Extend range forecast over South America using the regional eta model. **Journal of Geophysical Research**, Boston, v.105, d8, 10.147-10160. 2000.
- CRANMER, A. J.; KOUVEN, N.; MOUSAVI, S. F. Providing WATFLOOD modeling the nonlinearities of hidrologic response to storm intensities. **Canadian Journal of Civil Engineering**, Vancouver, v.28, p.837-855. 2001.

COX, E. The fuzzy systems handbook. Boston: AP Professional, 1994.

CURI, W. F.; CURI, R. C. ORNAP: **Optimal Reservoir Network Analysis Program**. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2001. [CD-ROM].

DA SILVA, A. A. M.; YOUNG, C. C.; LEVITUS, S. **Atlas of surface marine data vol. 1: Algorithms and procedures**, NOAA ATLAS NESDIS 6, U.S. Department of Commerce, NOAA, NESDIS, 83pp. 1994.

DEPETRIS, P. J. *et. al.* ENSO controlled flooding in the Paraná river 1904-1991, **Naturwissenschaften**, v.83, p.127-129, 1996.

DETTINGER, M. D. *et. al.* United States streamflow probabilities based on forecasted La Niña, Winter-Spring 2000. **Experimental long-Lead Forecast Bulletin**, Carvelton v.8, n.4, p.57-59. 2000.

DIAZ-NIETO, J.; WILBY, R. A comparison of statistical of downscaling and climate change factors methods: impacts on low flows in the river Thames, United Kingdom. **Climate Change**, Londres, v.69, p. 245-268. 2005.

DIBIKE, Y.B., COULIBALY, P. Hydrologic impact of climate change in the Saguenay Watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models **Journal of Hydrology**, Londres, v. 307, p.145-163. 2005.

DICKINSON, R. E.; ERRICO, R. M. *et. al.* A regional climate model for the western U.S. **Climate Change**, Holanda, v.15, p.383-422. 1989.

DILON, W.R.; GOLDESTEIN, M. **multivariate analyses**. P. 246-248. John Wiley e sons. 1984.

DUKSTEIN, L; BOGARDI, I. **Reliability with fuzzy elements in water quantity an problems**. In: GANOULIS, J. (ED). Water Resources engineering risk assessment. Berlin: Springer-Verlag, 1991.

DRUYAN, L. M.; FULAKEZA, M.; LONERGAN, P. Dynamic downscaling of seasonal climate predictions over Brazil. **Journal of Climate**, Boston, vol.15, no.23, p.3411-3426. 2002.

ENFIELD, D. B.; MESTAS-NUÑES, A. M.; TRIMBLE, P. J. The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U. S. J. **Geophysical Research Letter**, Boston, vol.28, n.10. p.2077-2080, 2001.

FEDDERSEN, H.; NAVARRA, A.; WARD, M. N. Reduction of model systematic error by statistical correction for dynamical seasonal predictions. **Journal of Climate**, Boston, v. 12, n.7, p. 1974-1989. 1999.

FOUFOULA-GEORGIU, E.; GEORGAKAKOS, K. P. **Hydrologics advances in space-time precipitation modeling and forecasting**. In: Recent Advances in the Modelling of Hydrologic Systems, Bowles DS, O' Connel PE (eds). Kluwer Academic: Dordrecht; p.47-65. 1991.

FINNERTY, B. D.; SMITH, M. B.; SEO, D. J.; KOREN, V.; MOGLEN, G. E. Space-time scale sensitivity of the Sacramento model to radar-gauge precipitation inputs. **Journal of Hydrology**, Londres, v.203, p.21-58, 1997.

FULAKEZA, M.; DRUYAN, L.; KRISHNAMURTY, T. A simple soil moisture scheme for climate simulations in the tropics. **Meteorology and Atmospheric Physics**, Viena, v.79, n.34, p.105-126. 2002.

FREITAS, M. A. S.; PORTO, A. S. Considerações sobre um modelo determinístico chuva-vazão aplicado às bacias do semi-árido Nordeste. **Revista Tecnologia**, UNIFOR, Fortaleza, vol. 11, p.45-49. 1990.

GALVÃO, C. O. **Introdução a Teoria dos Conjuntos Difusos**. Sistemas Inteligentes. (ed. Carlos de Oliveira Galvão, Mêuser Jorge Silva Valença, Vicente P. P. B. Vieira, Estefâne G. M. de Lacerda, André C. P. L. F. de Carvalho e Tereza Bernarda Ludermir), p.60-96. Editora da Universidade, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ABRH. 1999.

GALVÃO, C. O. *et. al.* **Evaluation of seasonal forecasting methods for water resource management in northeast Brazil**. Hydrological Extremes: Understanding, Predicting, Mitigating, Lars Gottschalk, Ed., International Association of Hydrological Sciences Press, 289-295. 1999.

GALVÃO, C. O.; NOBRE, P.; BRAGA, A. C. F. M.; DE OLIVEIRA, K. F.; MARQUES, R.; DA SILVA, S. R.; FILHO, M. F. G.; SANTOS, C. A. G.; LACERDA, F. e MONCUNNIL, D. **Climate predictability, hydrology and water resources over Nordeste Brazil**. In: REGIONAL HIDROLOGICAL IMPACTS OF CLIMATIC CHANGE – IMPACT ASSESSMENT AND DECISION MAKING (ed. By Thorsten Wagener, Stewart Franks, Hoshin V. Gupta, Eva Bøgh, Luis Bastidas, Carlos Nobre e

Carlos De Oliveira Galvão), p.211-220. IAHS, n.295, British Library, Wallingford, Oxfordshire, UK, 2005.

GARCIA, N. O. **Anthropic impacts over hydrology of Rio de La Plata basin.** Extended abstract in: Preprints 15 th Conf. on Hydrologic (AMS Annual Meeting, Long Beach, California, 9-14 January), p. 138-141. American Meteorological Society. 2000.

GIANNINI, A.; SARAVANAN, R.; CHANG, P. The preconditioning role of Tropical Atlantic Variability in the development of the ENSO teleconnection: implications for the prediction of Nordeste rainfall. **Climate Dynamics**, Berlin, v.22, p.839-855. 2004.

GIORGI, F.; BATES, G. T. On climatological skill of a regional model over complex terrain. **Monthly Weather Review**, Boston, v.117, 2325-2347. 1989.

GIORGI, F. On simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. **Journal of Climate**, Boston, v.3, p.941-963. 1990.

GIORGI, F.; MARINUCCI, M. An investigation of the sensitivity of simulate precipitation to model resolution and its implication for climate studies. **Monthly Weather Review**, Boston, v.124, n.34, p.148-146. 1996.

GIORGI, F.; MEARNNS, L. Introduction to special section: regional climate modeling revisited. **Journal of Geophysical Research**, Boston, v.104, n.15, p.6335-6352. 1999.

GODDARD, L.; BARNSTON, A. G.; MASON, S. J. "Evaluation of the IRI's "net assessment" seasonal climate forecasts 1997-2001. **Bulletin of American Meteorological Society**, Boston, v.84, p.1761-1781. 2003.

GOTTSCHALK, L.; MOTOVILOV, Y. **Macro-scale hydrological modeling – a Scandinavian experience, International Symposium on: 'Can science and society save the water crisis in the 21st century** – Reports from the world', Japan Society of Hydrology and Water Resources, Tokyo, Pp, 38-45, 2000,

HAY, L. CLARK, M. P. Use of statistically and dynamically downscaled atmospheric model outfor hydrologic simulation in three mountainous basins in the western United States. **Journal of Hydrology**, Londres, v.282, p. 56-75. 2003.

HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. **Quartely Journal Royal Meteorological Society**, Londres, v.103, p.77-92, 1977.

HASTENRATH, S. Prediction of Northeast Brazil rainfall anomalies. **Journal of Climate**, Boston, v.3, p. 893-904, 1990.

HASTENRAH, S. Diagnostic and prediction of anomalous river discharges in northern South America. **Journal of Climate**, Boston, v.3, p. 1069-1090. 1990.

HASTENRATH, S.; GREISCHAR, L. Circulation mechanisms related to Northeast Brazil rainfall anomalies. **Journal of Geophysical Research**, Boston, 98(D3): 5093-5102, 1993.

HARRISON, D. E.; LARKIN, N. K. El Niño-Southern Oscillation sea surface temperature and wind anomalies, 1946-1993. **Reviews of Geophysics**, Boston, v. 36, n.3, p. 353-399. 1998.

HEWITSON, B. C.; CRANE, R. G. Climate downscaling techniques and applications. **Climate Research**, Nordbunte-Alemnha, v.7, p.85-95. 1996.

HOLTON, J. R. **An introduction to dynamic meteorology**. International Geophysics Series, v. 23, sec. Ed. Academic Press. 1979.

HONG, S. -Y.; PAN, H. -L. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. **Monthly Weather Review**., Boston, v.124, p.2322-2339. 1996.

HOPKINS, W. G. **Correlation coefficient**. Disponível em: <http://www.sportsci.org/recursos/stats/correl.html>. Acesso: 05/06/2007.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **The Scientific Basis**, chap.2. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2001.

IREDELL, M.; PURSER, J. **A local diffusion to control advective numerical instability in the NMC global spectral model**. Preprints, 11th Conf. on Numerical Weather Prediction, Norfolk, VA, Amer. Meteor. Soc., p.22-23. 1994.

JI, Y; VERNEKAR, A. Simulation of the Asian summer Monsoons of 1987 and 1988 with a Regional Model nested in a global GCM. **Journal of Climate**, Boston, v.8, n.10, p.1965-1979. 1997.

JOLLIFFE, I.; STEPHENSON, D. **Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science**. [S.l.]: John Wiley and Sons. 2003.

JUANG, H.-M. H.; KANAMITSU, M. The NMC nested regional spectral model. **Monthly Weather Review**, Boston, v.122, p.3-26. 1994.

KANAMITSU, M. Description of the NMC global data assimilation and forecast system. **Weather and Forecasting**, Boston, v.6, p.425-435. 1989.

KANAMITSU, M. *et. al.* 1991. Recent changes implemented into the global forecast system at NMC. **Weather and Forecasting**, Boston, v.6, p.455-435. 1991

KANAMITSU, M.; HONG, S-Y. The NCEP regional spectral model: An update. **Bulletin of Amererican Meteorological Society**, Boston, v.78, n.10, p.2125-2143. 1997.

KANAMITSU, M. *et. al.* NCEP dynamical seasonal forecast system 2000. **Bulletin of Amererican Meteorological Society**, Boston., v.83, p.1019-1037. 2002.

KAUFMANN, A; GUPTA, M. M. **Introduction to fuzzy aritthmetic-theory and applications**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

KARUNANITHI, N.; GRENNEY, W. J.; WTHITLEY, D.; BOVEE, K. **Neural networks for river flow prediction**. J. Vomp. In. Civ. Engrg., ASCE, v.8, n.2, p.201-20. 1994.

KEYSER, D.; ANTHES, R. The applicability of a mixed-layer model of planetary Boundary Layer to real-data forecasting. **Monthly Weather Review**, Boston, v.105, n.11, p. 1351-1371. 1977.

KILLADIS, G. N.; DIAZ, H. F. Global climatic anomalies associated with extremes in the Southearn Oscillation. **Journal of Climate**, Boston, v.2, p.1069-1090. 1989.

KOUSKY, V.E., Frontal Influences on Northeast Brazil, **Monthly Weather Review**, Boston, v.107, p.1140-1153, 1979.

KOSKO, B. Neural networks and fuzzy systems. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1992.

KOSKO, B. **Fuzzy thinking**. London: Flamingo, 1994.

KUHN, H. W.; TURCKER, A. W. **Nonlinear Programming**. Proc. 2nd. Berkely Symp. Math. Statistics Probabilities. J. Neyman (ed.), University of California Press, Berkeley, 1951.

KUO, H. L. Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large scale flow. **Journal of Atmospheric Science**, Boston, v.31, p.1232-40. 1974.

LABADIE, J. W. **Otimização da operação de projetos agrícolas**. Brasília: PRONI. 1987.

LACERDA, G. M. E; CARVALHO, A. F. **Introdução aos algoritmos genéticos**. (ed. Carlos de Oliveira Galvão, Mêuser Jorge Silva Valença, Vicente P. P. B. Vieira, Estefâne G. M. de Lacerda, André C. P. L. F. de Carvalho e Tereza Bernarda Ludermir), p.60-96. Editora da Universidade, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ABRH. 1998.

LEMES, M. A. M. e MOURA, A. D. **Fundamentos da Dinâmica Aplicada à Meteorologia e Oceanografia**. Ribeirão Preto. Holos, 2002. 296p.

LEUNG, L. R. *et al.*. Simulations of the ENSO hydroclimate signals in the pacific Northwest Columbia River basin. **Bulletin of American Meteorological Society**, Boston, v.80, p.2313-2329. 1999.

LIMA, H. V. C. **Operação ótima de sistemas de reservatórios com aplicação ao sistema da Região Metropolitana de Fortaleza**. Dissertação de Mestrado, IPH/UFRGS, Porto Alegre, 2000.

LOPES, J. E. B.; BRAGA JR., B. P. F. CONEJO, J. G. L. **“Simulação hidrológica: Aplicações de um modelo simplificado”**: In: Anais do III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, v.2, p.42-62, Fortaleza-Ce. 1981.

LOUCKS, D. P.; STEDINGER, J. R.; HAITH, D. A. **WATER Resource Systems Planning and Management**, Prentice Hall, N. J., v.118, n.2, p.356-370. 1981.

LOUIS, J. -F.; J. TIEDTKE; -F. GELEYN. **A short history of the PBL parameterization at ECMWF**. Proceedings of the ECMWF Workshop on Planetary Boundary Layer Parameterization. November. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, England, 59-80. 1981.

MACEIRA, M. E. P.; DAMÁZIO, J. M. **Periodic auto-regressive stream flow models applied to operation planning for the Brazilian hydroelectric system** *In: Regional Hydrological Impacts of Climatic Change – Impact Assessment and Decision Making* (ed. By Thorsten Wagener, Stewart Franks, Hoshin V. Gupta, Eva Bøgh, Luis Bastidas, Carlos Nobre e Carlos De Oliveira Galvão), p.239-248. IAHS, n.295, British Library, Wallingford, Oxfordshire, UK, 2005.

MACMAHON, T. A.; MEIN, R. G. **River and reservoir yield**. Water Resources Publication. Littleton, Colorado. 1986.

MAMDANI, E. H., ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. **International Journal of Man-Machine Studies**, v.7, p.1-13, 1975.

MARENGO, J. A. Variations and change in South America streamflow. **Climate Change**, Amsterdam, v.31, p.99-117. 1995.

MARENGO, J. A. **Observed and modeled historical hydro climatic variability in South America: cases of the Amazon, São Francisco and Paraná-La Plata rivers**, In: Regional hydrological Impacts of Climatic Change-Hydroclimatic Variability. Proceedings of Symposium S6 held during Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu. Brazil, April 2005, IAHS –publ, 296, p.7-20, 2005.

MARENGO, J. A.; SAMPAIO, G.; CHOU, S. C.; SILVA DIAS, P. L. et al, Previsão de vazões de longo prazo na bacia do Rio São Francisco I: Previsão da precipitação, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Submetido, 12p, 2005.

MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; UVO, C. R. Trends in stream flow and rainfall in tropical South America: Amazonia, eastern Brazil, and northwestern Peru, **Journal of Geophysical Research**, Boston, 103(D2), 1775-1783, 1998.

MARIA, P. H. S. **Modelagem numérica em alta resolução para previsão de geração de energia eólica no Ceará**. 121f, 2007 (Mestrado em Ciências Físicas e Aplicadas) -. Universidade Estadual do Ceará. Fortaleza, Ceará. 2007.

MAWER, P.; THORN, D. Improved dynamic programming procedures and their practical application. **Water Resources Research**, Boston, v.10, n.2, p.183-190. 1974.

MATALAS, N. C. Mathematical assesment of synthetic hydrology. **Water Resources Research**, Boston, v.3 n.4, p.937-945. 1967.

MECHOSO, C. R.; PÉREZ, IRIBARREN, G. Stream flow in Southeastern America and the Southern Oscillation. **Journal of Climate**, Boston, v.5, p.1535-1539. 1992.

MÊUSER, J. S. V. **Aplicação de redes neurais. In: Sistemas Inteligentes – Aplicações a Recursos Hídricos e Ciências Ambientais** (ed. Carlos de Oliveira Galvão, Mêuser Jorge Silva Valença, Vicente P. P. B. Vieira, Estefâne G. M. de Lacerda, André C. P. L. F. de Carvalho e Tereza Bernarda Ludermir), p.60-96. Editora da Universidade, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ABRH. 1998.

MOURA A. D., SHUKLA, J. On the dynamics of droughts in Northeast Brazil: Observation, theory and numerical experiments with a general circulation model, **Journal of Atmospheric Science**, Boston, v.38, 2653-2675, 1981.

NASCIMENTO, L. S. V.; REIS, D. S.; MARTINS, E. S. P. R. **Aplicação do algoritmo de otimização multiobjetivo MOPSO na calibração de modelos hidrológicos.** In: VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2006, Gravatá. [CD-ROM].

NASH, J. E.; SUCTCLIFFE, J. River flow forecasting through conceptual models. **Journal of Hydrology**, Londres, v.10, p.282-290. 1970.

NEW, M. G.; HULME, M; JONES. P. D. Representing twentieth century space time climate variability. Part II: Development of a 1901-1996 monthly terrestrial climate fields. **Journal of Climate**, Boston, v.13, p.2217-2238. 2000.

NOBRE, P.; A. D. MOURA.; L. SUN. 2001. Dynamical downscaling of seasonal climate prediction over Nordeste Brazil with ECHAM3 and NCEP'S Regional Spectral Model at IRI. **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 82, p. 2787-2796.

NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America, **Journal of Climate**, Boston, v. 9 n.10, p.2464-2479, 1996.

NOBRE, C. A.; YANASSE, C. C.; YANASSE, C. F. **Previsão de secas no Nordeste pelo método de periodicidades: uso e abusos.** INPE 2344-RPE/407. 47p. 1982.

PAN, H. -L.; L. MART. Interaction between soil hydrology and boundary layer development. **Boundary Layer Meteorology**, Amsterdam, v.38, p.185-202. 1997.

PAN, H. -L.; WU, -S. WU. **Implementation a mass flux convective parameterization package for the NMC medium-range forecast model.** Preprints, 10th Conf. on Numerical Weather Prediction, Portland, OR, Amer. Meteor. Soc., p.96-98. 1994.

PENLAND, S.; MATROSOVA, L. Prediction of Tropical Atlantic sea surface temperatures using canonical correlation analysis. **Journal of Climate**, Boston, v.11, p.483-496. 1998.

PHILANDER, S. G. ***El Niño, La Niña, and Southern Oscillation.*** Academic Press, Londres, 289pp. 1990.

PHILLIPS, N. A. The general circulation of the atmosphere: A numerical experiment. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, Londres, v.2, p.123-164, 1956.

PIELKE, R. A. *et. al.* A comprehensive meteorological modeling system RAMS. **Meteorological Atmospheric Physics**, Austria, p. 69-91. 1992.

PIELKE, R. A. Meso-scale Meteorological Modeling: an introduction survey. [S.I]: **Ademic, 2001.**

POVEDA, G. ; MESA, O. J. Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale Ocean-Atmospheric phenomena. **Journal of Climate**, Boston, v.10, p.2690-2702.

POVEDA, G.; RAVE HERRERA, C. C.; MANTILLA, R. I. Tendências em la distribución de probabilidades de illuvias y caudales em Antioquia. **Meteorologia Colombiana**, v.3, p.92-103. 2001.

QUERNER, E.; JONKER, R.; PADOVANNI, C.; SORIANO, B.; GALDINO, S. **Impact of climate change and agricultural developments in the Taquari River basin.** *Regional Hidrological Impacts of Climatic Change – Impact Assessment and Decision Making* (ed. By Thorsten Wagener, Stewart Franks, Hoshin V. Gupta, Eva Bøgh, Luis Bastidas, Carlos Nobre e Carlos De Oliveira Galvão), p.19-25. IAHS, n.295, British Library, Wallingford, Oxfordshire, UK, 2005.

QUIAN, J. -H.; SETH, A. ZEBIAK, S. Reinitialized versus continuous simulations for regional climate downscaling local climate, **Monthly Weather Review**, Boston, v,131, p.2857-2874, 2003.

- RAMAN, H.; CHANDRAMOULI, V. Deriving a general operating policy for reservoirs using Neural Network. **Journal of Water Resources Planning and Management**, EUA, v.122, n.5, ASCE, ISSN 0733-9496/96/0005-0342-0347. 1996.
- RASMUSSEN, F. M.; CARPENTER, T. H. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 110, n.5, p.354-384. 1982.
- RASHID, A. A.; WONG, K. V. A Neural network approach to the determination of aquifer parameters. **Ground Water**, EUA, v.30, p.164-166. 1992.
- REIS JUNIOR, D. S.; MARTINS, E. S.; NASCIMENTO, L. S. V. COSTA, A. A. **Previsão sazonal de vazões no Estado do Ceará**. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE. João Pessoa – PB. 2006. [CD-ROM].
- REYNOLDS, R. W.; SMITH, T. M. Improved global sea surface temperatures analysis using optimum interpolation. **Journal of Climate**, Boston, v.7, p.929-948. 1994.
- REPELLI, C. A.; ALVES, J. M. B. O uso de Análise de Correlações Canônicas para Prognosticar a Variabilidade Espacial da Precipitação sobre o Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira Meteorologia**, São José dos Campos, v.11, p.67-75. 1996.
- REPELLI, C. A.; NOPRE, P. Statistical prediction of sea-surface temperature over the tropical Atlantic. **International Journal of Climatology**, Londres, v.24, p.45-55, 2004.
- ROECKNER, E. *et. al.* 1996. **The atmospheric general circulation model ECHAM4: model description and simulation of the present-day climate**. Max Planck Institute für Meteorologie, Report n.28, Hamburg, Germany, 90p. 1996.
- ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. **Monthly Weather Review**, Boston, v.115, p.1606-1626. 1997.
- ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. Quantifying Southern Oscillation-precipitation relationships. **Journal of Climate**, Boston, v.9, p.1043-1059. 1996.
- ROBERTSON, A. W.; MECHOSO, C. R. Interannual and decadal cycles in river flows of the Southeastern South America. **Journal of Climate**, Boston, v.11, p.2570-2581, 1998.

ROBERTSON, A. W.; MECHOSO, C. R. Interannual and interdecadal variability of the South Atlantic Convergence Zone. **Monthly Weather Review**, Boston, v.128, p.2947-2957, 2000.

ROBERTSON, A. W.; MECHOSO, C. R. Interannual prediction of the Paraná river. **Geophysical Research Letter**, Boston, v.28, n.10. p.2081-2090, 2001.

SARAVANAN, R.; CHANG, P. Interaction between tropical Atlantic variability and El Niño-Southern Oscillation, **Journal of Climate**, Boston, v.13, n.13, p.2177-2194, 2000.

SANSIGOLO, C. A. Verificação de um modelo discriminante de previsão das precipitações sazonais no nordeste. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.14, p.29-36. 1999.

SEOANE, R. S.; VALDÉS, J. B.; MATA, L. Climate variability and climate change in Patagonian Rivers. **In: REGIONAL HYDROLOGICAL IMPACTS OF CLIMATIC CHANGE – IMPACT ASSESSMENT AND DECISION MAKING** (ed. By Thorsten Wagener, Stewart Franks, Hoshin V. Gupta, Eva Bøgh, Luis Bastidas, Carlos Nobre e Carlos De Oliveira Galvão), p.26-36. IAHS, n.295, British Library, Wallingford, Oxfordshire, UK, 2005.

SERVAIN, J. Simple climate indices for the tropical Atlantic Ocean and some applications. **Journal of Geophysical Research.**, Boston, v.96, p.15137-15146. 1991.

SERVAIN, J. *et. al.* A pilot research moored array in the tropical Atlantic (PIRATA). **Bulletin of American Meteorological Society**, Boston, v.79, n.10, p.2019-2031.1998.

SETH, A.; ROJAS, M.; LIEBMAN, B.; QUIAN, J. –H, Daily rainfall analysis for South America from a regional climate model and station observations. **Geophysical Research Letters**, Boston, vol. 31, L077213,doi:10.1029/2003GL019220, 2004.

SHRESTHA, B.; DUCKSTEIN, L. **A fuzzy reliability measure for engineering applications.** In: Uncertainty modeling and analysis in civil engineering. Boca Raton: CRC Press, 1989.

SHUKLA, J. S.; MARX, L; PAOLINO, D.; SRAUS, D.; ANDERSON, J.; PLOSHAY, J.; BAUMHEFNER, D.; TRIBBIA, J.; BRANKOVIC, C.; PLAMER, T.; CHANG, Y.; SCHUBERT, S.; SUAREZ, M; KALNAY, E. Dynamical seasonal prediction. **Bulletin of American Meteorological Society**, Boston, v.81, p.2593-2505. 2000.

SIMONOVIC, S. P. Reservoir systems analysis: closing gap between theory and practice. **J. Water Resources Plang. Snd. Mgmt.** ASCE, v.118, n.3, p.262-280. 1992.

SILVA FILHO, V. P. **Previsão de vazão no Semi-Árido Nordestino, utilizando modelos atmosféricos: Um estudo de Caso.** 105f, 2005 (Doutorado em Engenharia Civil – Recursos Hídricos) - Universidade Federal do Ceará. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Fortaleza-Ce. 2005.

SOLON, A. O. **Estimativa da duração do tempo de influência das condições iniciais do reservatório e critério de decisão de vazão de liberação nos períodos críticos de abastecimento utilizando os fundamentos da teoria do ADIP.** 122f, 2005 (Doutorado em Engenharia Civil – Recursos Hídricos) - Universidade Federal do Ceará. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Fortaleza-Ce. 2005.

SOUZA FILHO, F. A.; PORTO, R. L. L. Acoplamento de modelo climático e modelo hidrológico. In: **CD-ROM do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, p.1-10, Curitiba-Pr. 2003.

SOUZA FILHO, F. A.; LALL, U. Multi-Scale, Multi-site, Seasonal to Interannual Probabilistic Ensemble Stream flow Forecasts for Ceará, Brazil: Applications of a Multivariate, Semi-Parametric Algorithm. **Water Resources Research**, vol. 39, n. 11, 1307, doi:10.1029/2002WR001373, 2003.

SOUZA, E. B. **Um estudo observacional sobre o Padrão de Dipolo de anomalias de TSM no Oceano Atlântico Tropical.** 138f. 1997 (Mestrado em Meteorologia) -.INPE, São José dos Campos -SP, 1997 (INPE-6392-TDI/608).

SUGENO, M. (ed). **Industrial applications of fuzzy control.** Boston: North-Holland, 1995.

SUN, L.; MONCUNILL, D.; HUILAN, L.; MOURA, A. D.; FILHO, F. A. S. Climate downscaling over Nordeste, Brazil, using the NCEP RSM97. **Journal of Climate**, Boston, v18, n.4, p..551-567. 2005.

SUN, L.; MONCUNILL, D.; HUILAN, L.; MOURA, A. D.; FILHO, F. A. S.; ZEBIAK, E. An operational dynamical downscaling prediction system for Nordeste Brazil and the 2002-04 real time forecast evaluation. **Journal of Climate**, Boston, v19, n.10., p.1990-2007. 2006.

SUN, L.; GRAHAM, N. Climate simulation over East Africa using the NCEP Regional Spectral Model. **Submitted to J. Geophys (in press).** 2001.

STEIN, D.; MCKENDRY, I. Quantitative and qualitative evaluation of a three-dimensional mesoscale numerical model simulation of a sea breeze in complex terrain. **Monthly Weather Review**, Boston, v.116, n.10, p.1914-1926. 1988.

STUDART, T. M. C.; CAMPOS, J. N. B. **A escolha do volume inicial assumido para um reservatório: Uma questão irrelevante?** In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. 2001. [CD-ROM].

TASCHNER, S.; LUDWIG, R.; MAUSER, W. Mukti-scenario flood modeling in a mountain watershed using data from a NWP model, rain radar and rain gauges. **Physics and Chemistry of the Earth. Part B: Hydrology, Ocean and Atmosphere**, Londres, v.26, p.509-515.

TIEDTKE, M. A. comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. **Monthly Weather Review**, Boston, v.117, p.1779-1800. 1989.

TOMASELLA, J.; NOBRE, C. A. O papel do CPTEC no enfrentamento da crise energética. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.26, n.2, p.23-28. 2002.

TRENBERTH, K. E. The definition of El Niño. **Bulletin of American Meteorological Society**, Boston, n.78, p.2771-2777. 1997.

TREMBACK, C. J. **Numerical simulation of a mesoscale convective complex: model development and numerical results**. Dissertation (Ph.D.), Colorado State University, Colorado, USA. 1990.

TUCCI, C. E. M.; CLARK R. T.; COLLISCHONN, W.; SILVA DIAS, P. L. COLLISCHONN, W. **Previsão de médio prazo da afluência de reservatórios com base na previsão climática**. Relatório Final. Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 130p. 2002.

TUCCI, C. E. M.; CLARK R. T.; COLLISCHONN, W.; SILVA DIAS, P. L.; OLIVEIRA, G. S. Long-term flow forecasts base don climate and hydrological modeling: River Uruguai Basin. **Water Resources Research**. Boston, v.39, n.7, DOI 1029/2003WR002074. 2003.

UVO, C. B.; GRAHAM, N. E. Seasonal runoff forecast for northern South America: A statistical model. **Water Resources Research**, Boston, v.34, n.12, p.3515-3524, 1998.

UVO, C. B.; REPELLI, C. A.; ZEBIAK, S. E.; KUSHNIR, Y. The relationship between Tropical Pacific and Atlantic SST and Northeast Brazil Monthly Precipitation, **Journal of Climate**, Boston, v.11, n.4, p.551-562, 1998.

UVO, C. B.; TOLLE, U.; BERNDTSSON, R. Forecasting discharge in Amazonia using artificial neural networks. **International Journal of Climatology**, Londres, v.20, n.12, p.1495-1507, 2000.

UVO, C. R. B. **A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação da Região norte do Nordeste Brasileiro**. 79f, 1989 (Mestrado em Meteorologia) São José dos Campos - Instituto de Pesquisas Espaciais. 1989.

VALDÉS, J. B. *et. al.* **An evaluation of the impact of ENSO on the discharges of the Salt River, Arizona**, *Proc. 26th Ann. Conf. ASCE Water Resources Planning and Management Division*, Temp AZ, 1999.

VIEIRA, V. P. P. B. Teoria dos conjuntos difusos e sua aplicação a projetos de Recursos Hídricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.1, n.1, jan./jun. 1996.

VON STORCH, H.; BÜRGER, G.; SCHNUR, R.; VON STORCH, J. S. Principal Oscillation Patterns. **Journal of Climate**, Boston, v.8, p.377-400. 1995.

VOTRUBA, L. **Analysis of water resources systems**. Amsterdam: Elsevier, 1988.

WANG, I.; LEUNG, L. R.; MCGREGOR, J. L.; LEE, F. -K.; WANG, W. -C.; DING, Y.; KIMURA, F. Regional climate Modeling: Progress, Challenges, and Prospects. **Journal of Meteorological Society of Japan**, Tóquio, v.82, v.6, p. 1599-1628. 2004.

WANG, C. Atmospheric circulation cells associated with the El Niño-Southern Oscillation. **Journal of Climate**, Boston, v.13, p.3969-3993. 2002a.

WANG, C. Atlantic climate variability and its associated atmospheric circulation cells. **Journal of Climate**, Boston, v.15, p.1516-1536. 2002b.

WANG MIAOLIN; XIA JUN. Impact of climate fluctuation and land-cover changes on runoff in the Yellow River basin. In: REGIONAL HIDROLOGICAL IMPACTS OF CLIMATIC CHANGE – IMPACT ASSESSMENT AND DECISION MAKING (ed. By Thorsten Wagener, Stewart Franks, Hoshin V. Gupta, Eva Bøgh, Luis Bastidas, Carlos Nobre e Carlos De Oliveira Galvão), p.239-248. IAHS, n.295, British Library, Wallingford, Oxfordshire, UK, 2005.

WARD, M. N.; FOLLAND, C. K. Prediction of seasonal rainfall in the north Nordeste of Brazil using eigenvectors of sea surface temperature. **International Journal of Climatology**, Londres, v.11, p.711-743. 1991.

WEBER, A.; BUCKER, M.; WEBER, J. Statistical performance of several mesoscale atmospheric dispersion models. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v.21, n.11, p.1633-1644. 1982.

WILBY, R. L.; WIGLEY, T. M. L. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. **Progress in Physical Geography**, Londres, v.21, p.530-548. 1997.

WILBY, R. L.; HASSAN, H.; HANAKI, K. Statistical downscaling of hydrometeorological variables using general circulation model output. **Journal of Hydrology**, Londres, v.205, p.1-19. 1998.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. Academic Press, 466p. 1995.

WILLMOTT, C. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v.63, n.11, p.1309-1313. 1982.

WOOD, E. F.; SIVAPLAN, M.; BEVEN, K.; BAND, L. Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling. **Journal of Hydrology**, Londres, v.102, p.29-47. 1988.

WOOD, E. F.; SIVAPLAN, M.; BEVEN, K. Similarity and scale in catchment storm response. **Reviews in Geophysics**, Boston, v.28, p.1-18, 1998.

WOOD, A.; MAURER, E. P.; KUMAR, A.; LETTENMAIER. Long-range experimental hydrologic forecasting for the Eastern United States. **Journal of Geophysical Research**, Boston, 107, NO. D20. 4429, doi: 10.1029/2001JD000659. 2002.

WOOD, A. W.; LEUNG, L. R.; SRIDHAR, V.; LETTENMAIER, D. P. Hydrological implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climatic model outputs. **Climatic Change**, Amsterdam, v.62, p.189-216. 2004.

WURBS, R. A. **Modeling and analysis of reservoir systems operations**. Englewood Cliffs:Prentice-Hall. 1996.

XAVIER, T. M. B. S. *et. al.*. Previsão regional de chuva para o Estado do Ceará através do projeto “Tempo de Chuva”: 1964-1999. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.5, p.69-92. 2000.

YANG, D. MUSIAKE, K.; KANNE, S.; OKI, T. Use of the Pfafstetter basin numbering system in hydrological modeling. In Proceeding annual Conference of Japan Society of **Hydrology and Water Resources**, Londres, p. 200-2001. 2000.

YANG, D.; HERATH, S.; MUSIAKE, K. Spatial resolution sensitivity of catchment geomorphologic properties and the effect on hydrological simulation. **Hydrological Processes**, Londres, v.15, p. 2085-2099. 2001a.

YANG, D.; MUSIAKE, K. A continental scale hydrological model using distributed approach and its application to Asia. **Hydrological Processes**, Londres v.17, p. 2855-2869. 2003b.

YANG, D.; KOIKE, T.; TANIZAWA, H. Application of a distributed hydrological model and weather radar observations for flood management in the upper Tone River of Japan. **Hydrological Process**, Londres, v. 18, n.16, p. 3119-3132, 2004.

YEH, W. W. G. **State-of-the-art review: Theories and application of systems analysis techniques to the optimal management and operation of a reservoir system**. Report UCLA-ENG-82-52, Civ, Engine. Dept., Univ. of California, Los Angeles, Calif. 1982.

YEH, W. W. G. Reservoir management and operations models: A state-of-the art review. **Water Resources Research**. Boston, v.21, n.12, p.1797-1818. 1985.

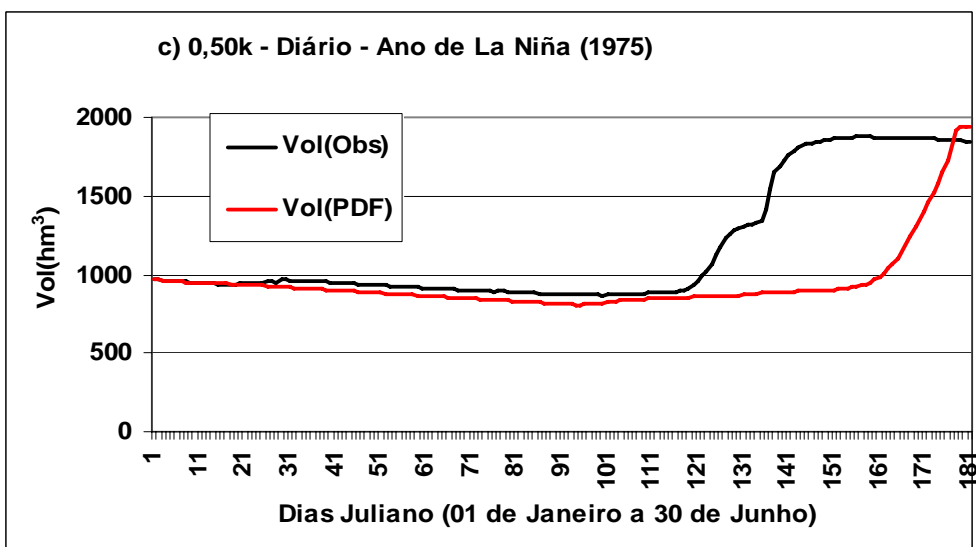
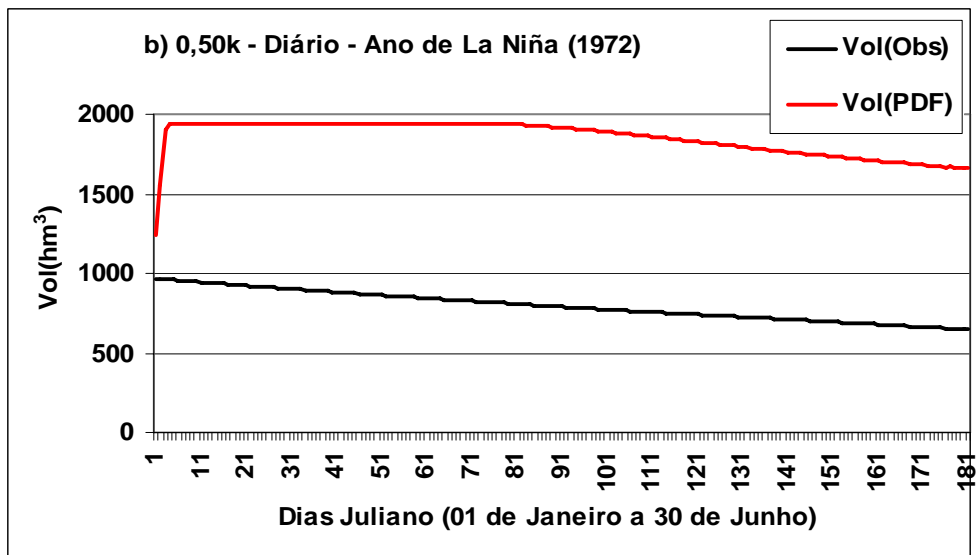
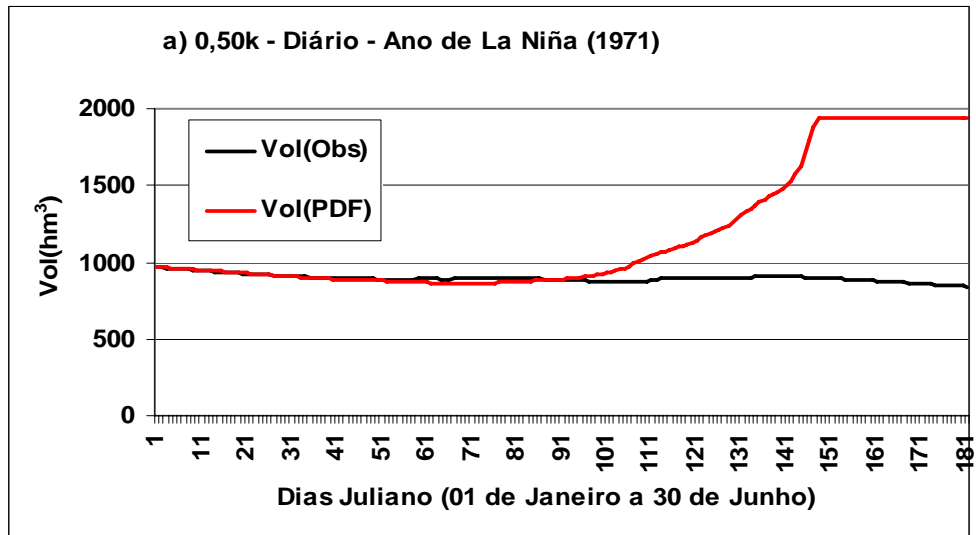
ZADEH, L. A. Fuzzy Sets, *Information and Control*, v.8. p.338-353, 1965.

ZADEH, L. Fuzzy sets as basis for theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, v.1, p.3-28, 1978.

ZEBIAK, S. E. Air-Sea interaction in the equatorial Atlantic region. **Journal of Climate**, Boston, v.6, p. 1567-1586. 1993.

ZIMMERMANN, H. J. **Fuzzy Set Theory and its Applications**. 3ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996.

ANEXO - Volumes diários simulados no reservatório com $V_0=0,25k$, $0,50k$ e $0,75k$ em anos de contrastes climáticos de La Niña, Normais e de El Niño. Postos pluviométricos usados no estudo. Códigos e coordenadas geográficas dos postos pluviométricos usados no estudo.



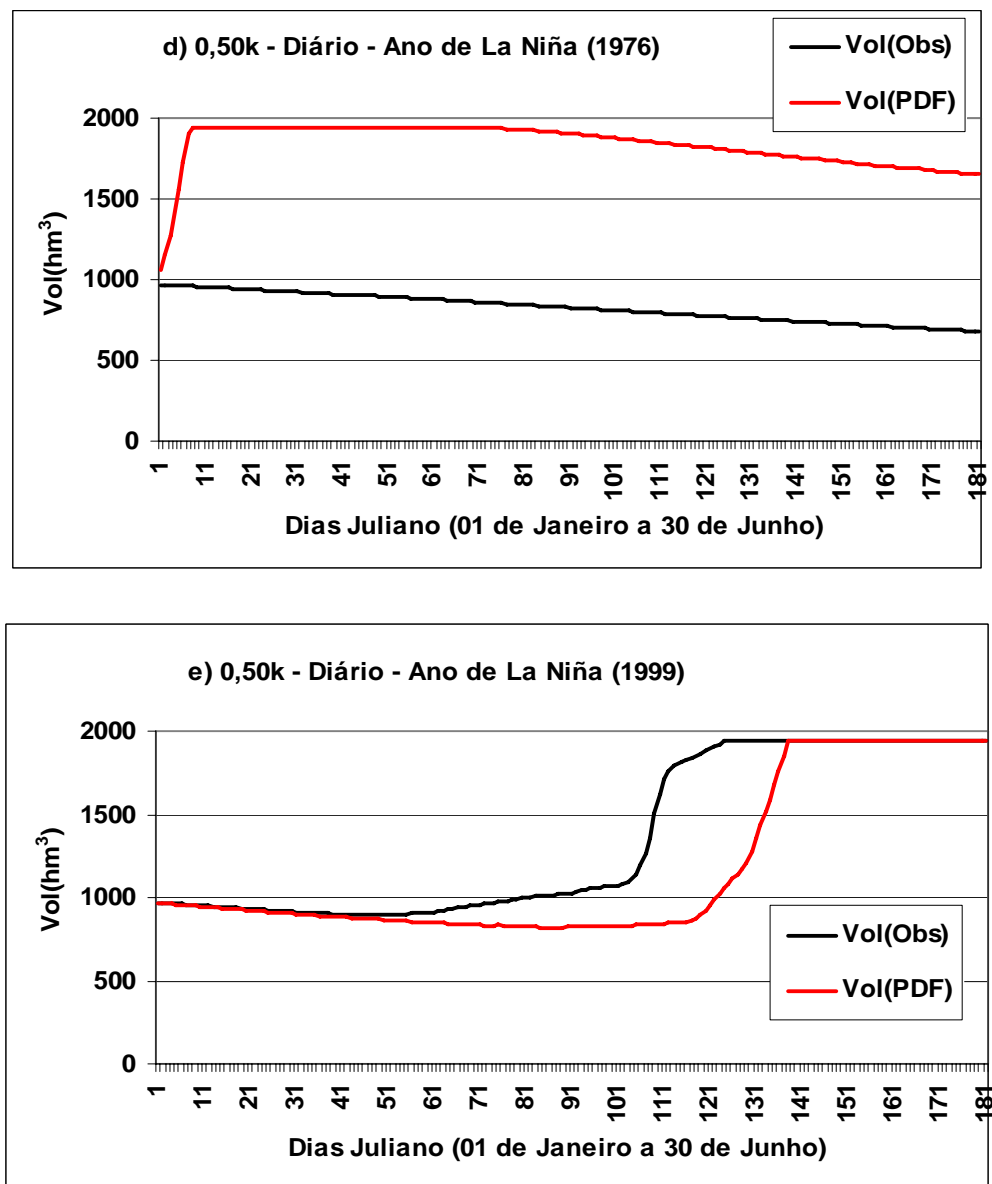


FIGURA 1 - Volumes diários simulados no reservatório com $V_0=0,50k$ em anos de La Niña a) 1971, b) 1972, c) 1975, d) 1976 e, e) 1999.

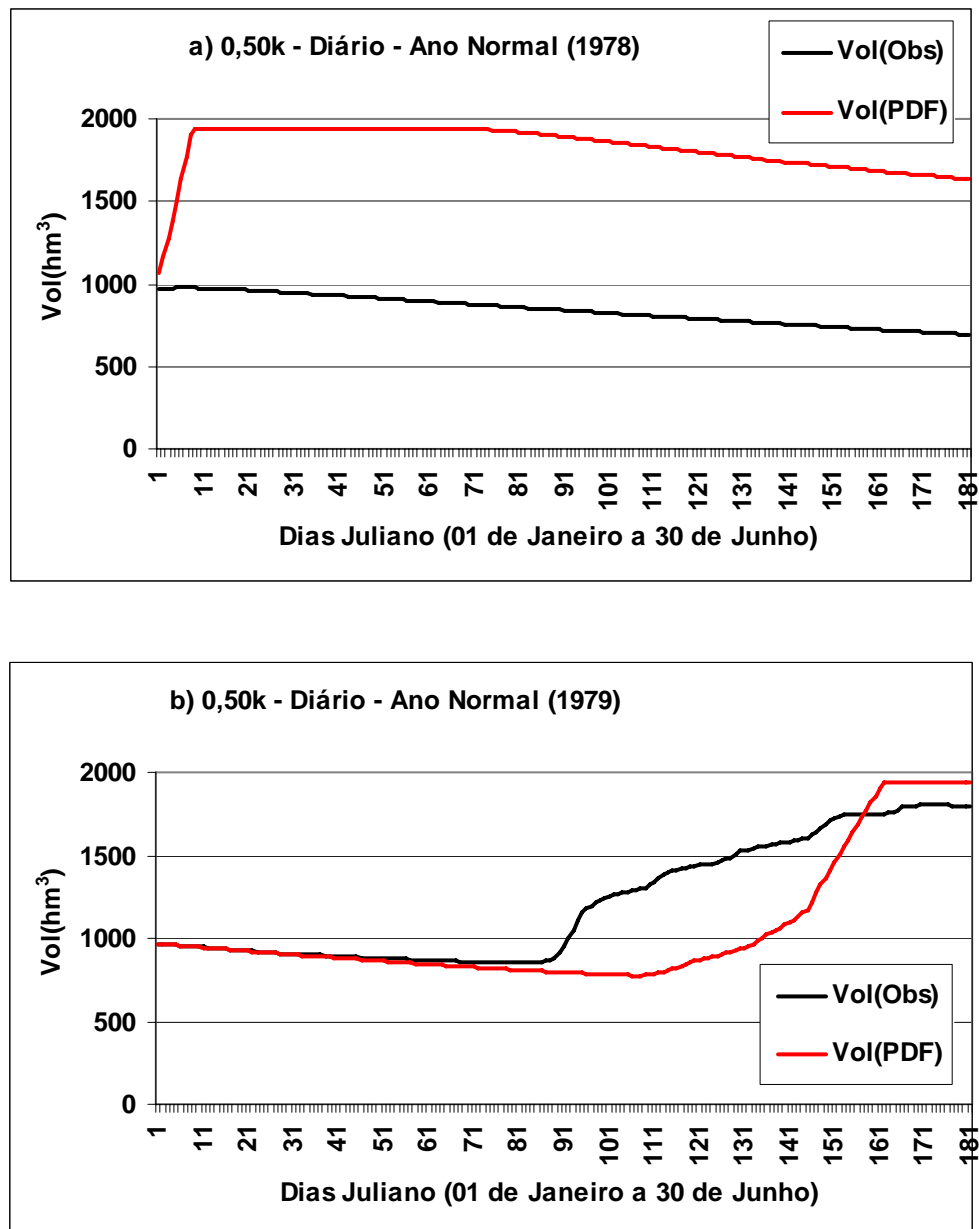


FIGURA 2 - Volumes diários simulados no reservatório com $V_0=0,50k$ em anos Normais a) 1978 e b) 1979.

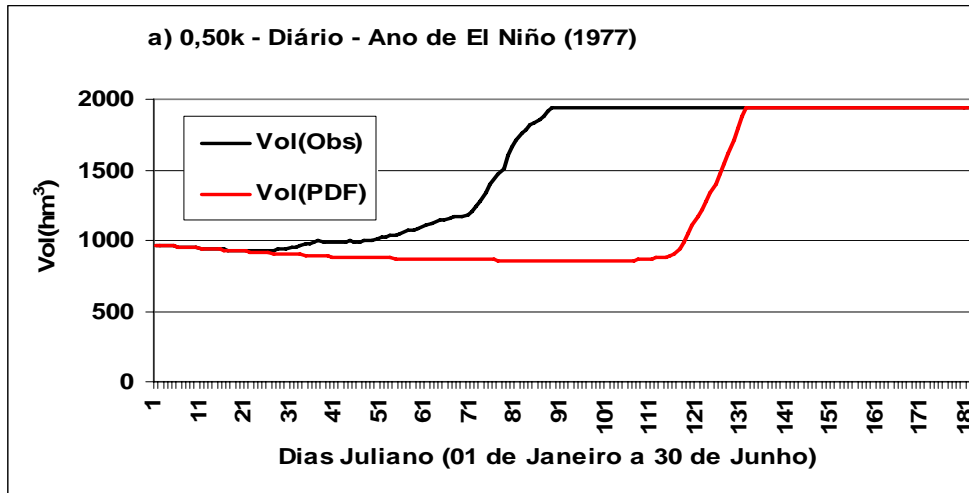


FIGURA 3 – Volumes diários simulados no reservatório com $V_0=0,50k$ em ano de El Niño (1977).

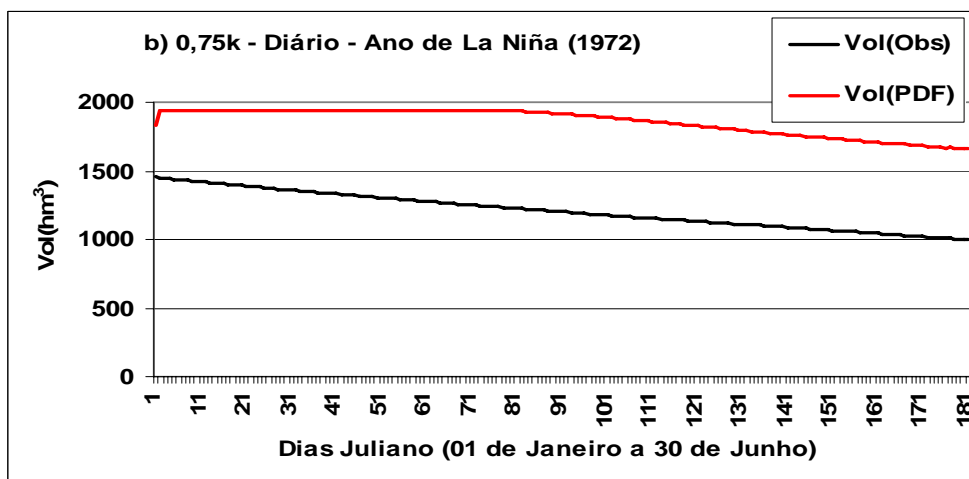
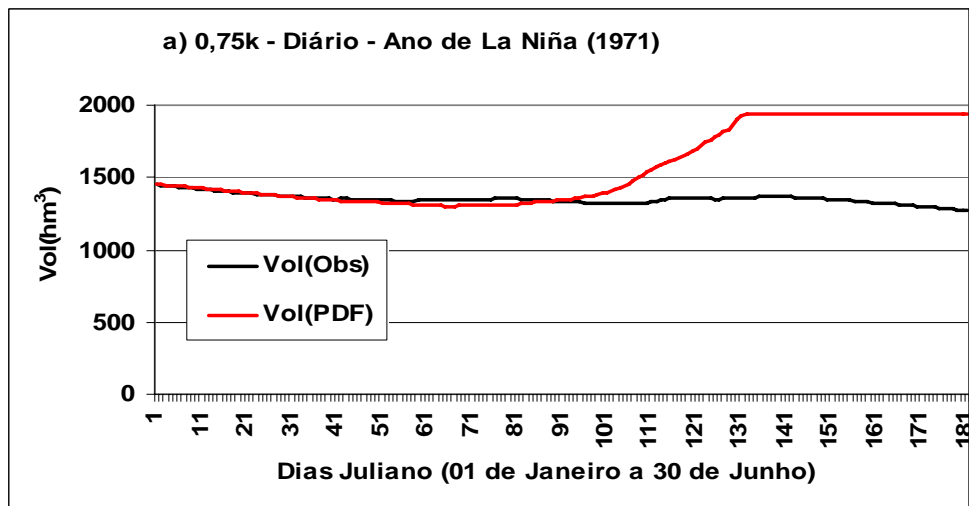


FIGURA 4 - Volumes diários simulados no reservatório com $V_0=0,75k$ em anos de La Niña a) 1971, b) 1972, c) 1975, d) 1976 e, e) 1999.

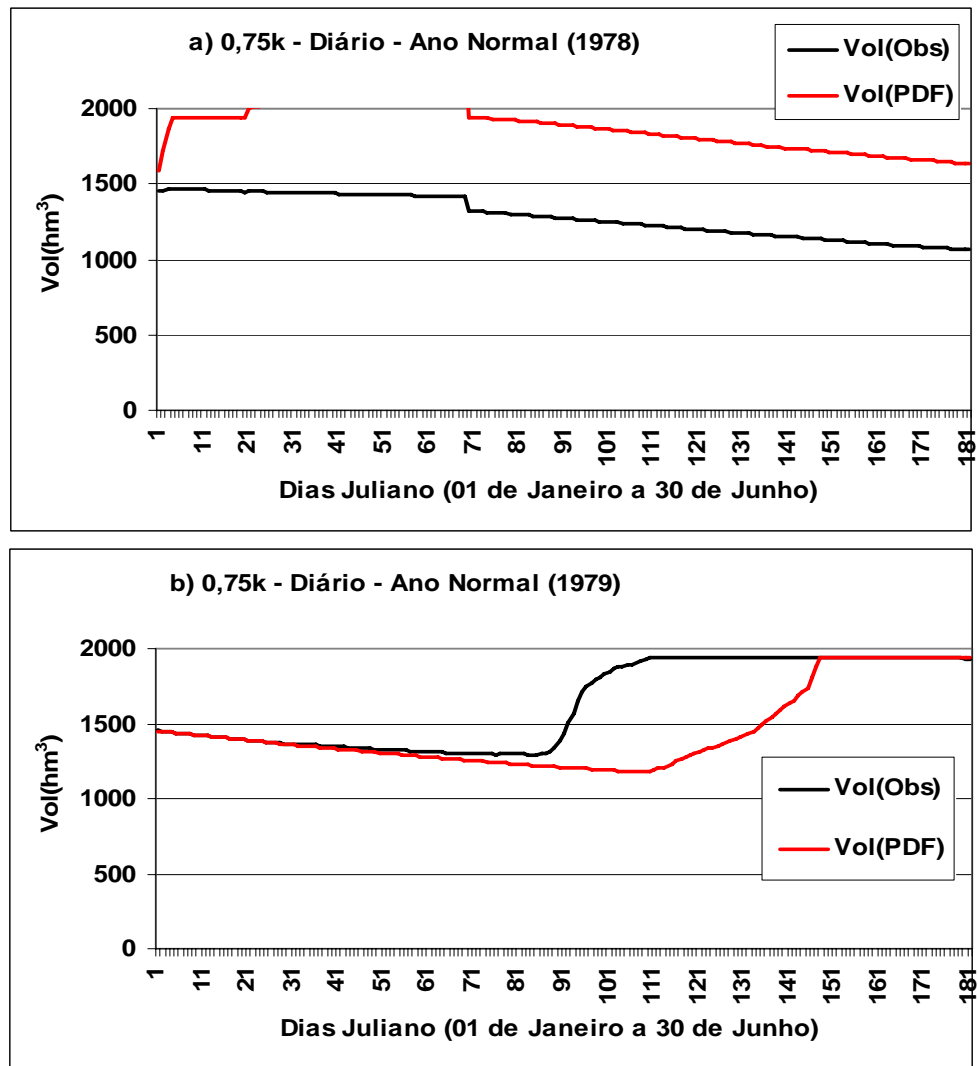


FIGURA 5 - Volumes diários simulados no reservatório com $V_0=0,75k$ em anos Normais a) 1978 e b) 1979.

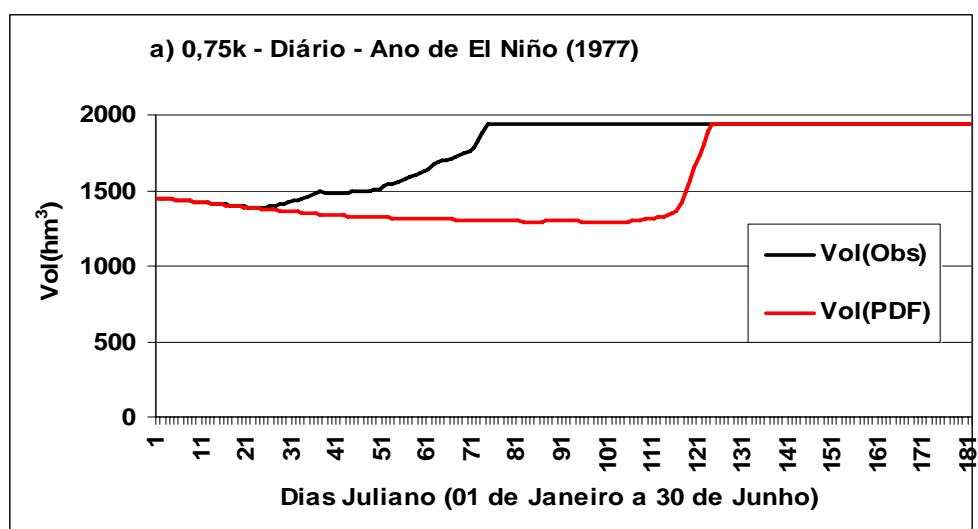


FIGURA 6 - Volumes diários simulados no reservatório com $V_0=0,75k$ em ano de El Niño (1977).

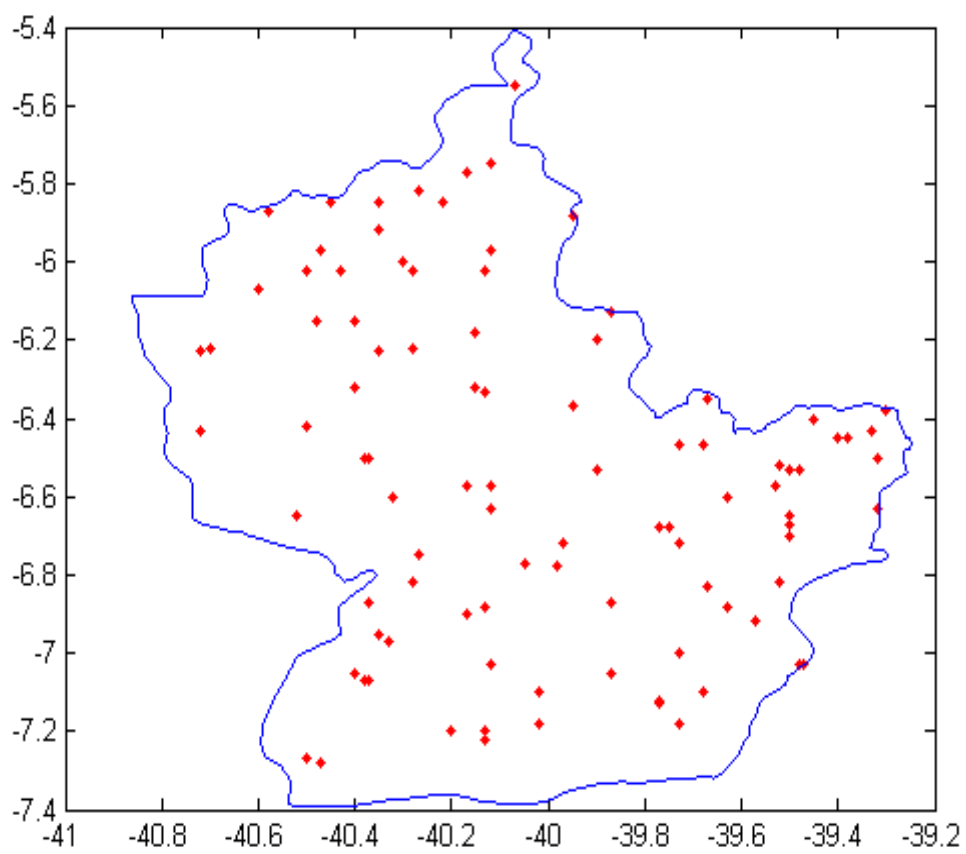


FIGURA 7 - Postos pluviométricos usados no estudo.

TABELA 1 - Códigos e coordenadas geográficas dos postos pluviométricos usados no estudo.

Posto	Longitude	Latitude	Posto	Longitude	Latitude	Posto	Longitude	Latitude
4	-40,12	-6,57	584	-39,67	-6,35	3830728	-39,87	-6,87
6	-39,73	-7,00	586	-39,33	-6,43	3830776	-39,63	-6,88
9	-39,98	-6,78	594	-39,73	-6,72	3830888	-39,57	-6,920
14	-40,13	-7,20	595	-40,05	-6,77	3831006	-39,48	-6,53
16	-40,15	-6,32	596	-40,37	-6,87	3831239	-39,32	-6,630
17	-39,87	-6,87	597	-40,27	-6,75	3840248	-39,77	-7,12
28	-40,37	-7,07	598	-40,52	-6,65	3840356	-39,73	-7,18
34	-39,50	-6,53	599	-40,37	-6,50	3841006	-39,48	-7,03
37	-39,87	-6,13	619	-39,4	-6,45			
45	-39,57	-6,92	620	-39,32	-6,50			
79	-39,52	-6,52	643	-40,17	-5,77			
99	-39,68	-7,10	649	-40,12	-5,75			
111	-40,70	-6,22	650	-40,72	-6,43			
120	-40,02	-7,10	651	-40,4	-6,32			
128	-39,90	-6,53	652	-40,15	-6,18			
131	-39,73	-7,18	700	-40,4	-7,05			
142	-40,28	-6,02	709	-40,35	-6,23			
159	-40,17	-6,90	3719648	-40,27	-5,82			
166	-40,33	-6,97	3719731	-40,35	-5,85			
172	-40,32	-6,60	3719832	-40,35	-5,92			
177	-40,40	-6,15	3728459	-40,72	-6,23			
178	-40,58	-5,87	3728859	-40,72	-6,43			
179	-40,45	-5,85	3729002	-40,5	-6,02			
180	-40,22	-5,85	3729015	-40,43	-6,02			
181	-40,07	-5,55	3729018	-40,3	-6,00			
182	-39,95	-5,88	3729075	-40,13	-6,02			
185	-40,60	-6,07	3729304	-40,48	-6,15			

295	-40,02	-7,18	3729445	-40,28	-6,22
307	-40,47	-7,28	3729676	-40,13	-6,33
309	-39,32	-6,63	3729802	-40,50	-6,42
310	-39,50	-6,67	3739024	-40,38	-6,5
321	-39,45	-6,4	3739168	-40,17	-6,57
323	-39,50	-6,70	3739279	-40,12	-6,63
346	-39,77	-7,13	3739645	-40,28	-6,82
359	-39,75	-6,68	3739776	-40,13	-6,88
386	-40,35	-5,92	3739931	-40,35	-6,95
428	-40,32	-6,60	3739935	-40,33	-6,97
480	-39,30	-6,38	3749125	-40,38	-7,07
547	-39,57	-6,92	3749297	-40,02	-7,10
555	-40,12	-5,97	3749475	-40,13	-7,22
560	-40,47	-5,97	3749502	-40,50	-7,27
570	-40,20	-7,20	3820421	-39,90	-6,20
572	-40,12	-7,03	3820712	-39,95	-6,37
573	-39,87	-7,05	3820955	-39,73	-6,47
574	-39,47	-7,03	3821924	-39,38	-6,45
580	-39,68	-6,47	3830023	-39,90	-6,53
581	-39,63	-6,60	3830195	-39,53	-6,57
582	-39,50	-6,65	3830349	-39,77	-6,68
583	-39,52	-6,82	3830408	-39,97	-6,72
