



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

SAMUELSON LOPES CABRAL

INTERVALO DE TEMPO DE MÁXIMA PREVISIBILIDADE NO ACOPLAMENTO
DE MODELOS CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICO PARA O GERENCIAMENTO DE
RESERVATÓRIO

Fortaleza - Ceará
2014

SAMUELSON LOPES CABRAL

INTERVALO DE TEMPO DE MÁXIMA PREVISIBILIDADE NO ACOPLAMENTO
DE MODELOS CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICO PARA O GERENCIAMENTO DE
RESERVATÓRIO

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

ORIENTADOR: Prof. José Nilson Beserra Campos, PhD.

Fortaleza - Ceará
2014

SAMUELSON LOPES CABRAL

INTERVALO DE TEMPO DE MÁXIMA PREVISIBILIDADE NO ACOPLAMENTO
DE MODELOS CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICO PARA O GERENCIAMENTO DE
RESERVATÓRIO

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

Aprovado em: 06/10/2014

BANCA EXAMINADORA

Dr. José Nilson B. Campos (orientador)
Universidade Federal do Ceará

Dr. Francisco de Assis de Souza Filho
Universidade Federal do Ceará

Dra. Ticiania Marinho de Carvalho Studart
Universidade Federal do Ceará

Dr. José Maria Brabo Alves
Universidade Estadual do Ceará

Dr. Rosiberto Salustiano da Silva Júnior
Universidade Federal de Alagoas

A Deus, por me dar forças, permanecer comigo em todos os momentos e permitir que eu alcançasse mais uma vitória.

Dedico a minha mãe Cicera Lopes, pelo seu amor, conselhos e orações. Amo-te mãe.

A minha esposa e companheira Caroline Cabral por todo apoio e amor, sem você não seria possível. Amo-te.

E a minha princesa Júlia Cabral, força motriz da minha vida. Amo-te minha filha querida

AGRADECIMENTOS

A toda minha família, especialmente aos meus pais, irmãos, sogro e sogra, cunhados (as) e aos meus sobrinhos, por todo apoio e compreensão.

Em especial ao meu orientador Prof. José Nilson B. Campos, pela orientação, apoio, amizade e todo aprendizado compartilhado nesse curso, obrigado.

Aos professores do POSDEHA, em especial aos professores Francisco de Assis de Souza Filho, Ticiania Marinho de Carvalho Studart e Renata Mendes Luna, obrigado por tudo.

Aos amigos Cleiton Silveira, Wictor Lemos, Paulo José, Victor Cochrane, Francisco Alberto, Venicius, Benevides, Socorro Hortegal, Jaqueline Lucas, Luizinho, Thiago, Gomes, Samíria, Fábio, Lara Bastos, Sandra, Bruno Rebouças pelo companheirismo e respeito.

Aos amigos José Maria Brabo e Célio Augusto Sales, pela amizade e aprendizado compartilhado.

A amiga Teresinha Alves, pela amizade e apoio.

A COGERH, pela oportunidade e experiência adquirida e a FUNCEME pelos dados disponibilizados.

Aos servidores do POSDEHA pela ajuda prestada.

Ao POSDEHA e a UFC pelo total apoio dado ao longo do curso.

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

A todos que de alguma forma contribuíram para esse trabalho, agradeço.

RESUMO

O presente trabalho visa o acoplamento de modelo atmosférico, hidrológico e de operação de reservatório com vistas à otimização da liberação de águas no semiárido do nordeste brasileiro. O modelo atmosférico regional *RAMS* foi forçado pelo modelo atmosférico global *ECHAM 4.5*, na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe, e em seguida, aplicada a correção probability density function (PDF) nos dados simulados e comparado com dados diário de precipitação média observada pelo método de *Thiessen* no período de 1979-2009. Foi utilizando o *Heidke Skill Score* (HSS) como métrica principal para avaliar o desempenho da previsão em busca do Intervalo de Tempo de Máxima Previsibilidade (ITEMP) do modelo atmosférico. Os dados de precipitações observados e simulados pelo *RAMS* com correções PDFs foram inseridos no modelo hidrológico *Soil Moisture Account (SMA)* do *Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS), e comparado com as vazões médias observadas. Para a calibração e validação do *SMA*, foi realizado um método iterativo para minimizar uma função objetivo, com base no erro percentual do volume. Por fim foi desenvolvido e avaliado um modelo de cascata a fim de comparar as decisões operacionais de liberação do reservatório Orós com diferentes cenários com base nas vazões observadas, vazões simuladas pelo *SMA* com a precipitação observada e vazões simuladas pelo *SMA* forçada com o *RAMS*-PDF. O modelo *RAMS* mostrou melhor eficiência na previsão da precipitação no intervalo de 30 a 45 dias, com valores de HSS = 0,56. O modelo *SMA* mostrou desempenho satisfatório com valores de *Nash-Sutcliffe* de 0,89 na fase de calibração e 0,67 na fase de validação, mostrando ser uma nova alternativa de utilização de modelo hidrológico no semiárido. O modelo de cascata mostrou potencial em representar bem as afluições médias do reservatório, podendo tornar uma ferramenta hidrológica, auxiliando as decisões de operação dos reservatórios, atendendo as demandas da região.

Palavras-chave: *Soil Moisture Account*; modelagem hidrológica; operação de reservatórios; semiárido.

ABSTRACT

This work seeks to integrate climatic, hydrologic, and reservoir operation models in order to optimize available water volume in the Brazilian Northeast. The global *ECHAM 4.5* climate model was used to feed the *RAMS* regional climate model for the *Alto Jaguaribe* hydrographic basin. Resulting precipitation values were calibrated by the probability density function (PDF) correction of simulated data compared with average daily precipitation data using the *Thiessen* method for the period 1979-2009. The *Heidke Skill Score* (HSS) was used to evaluate model performance in the Maximum Predictable Time Interval (ITEMP) of the atmospheric model. These PDF-corrected precipitation data, both observed and *RAMS*-simulated, were inserted in the hydrologic *Soil Moisture Account* (SMA) model from the *Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) to determine modeled flows. These flows were then compared with median observed flows. To calibrate and validate the *SMA*, an iterative method was used to minimize percentage error of volume. The data returned by this cascade model was applied to assisting policy-makers determine water releases from the Orós reservoir. Three different scenarios were compared, the first based on observed flows, the second flows simulated by *SMA* with observed precipitation, and the third by flows simulated by *SMA* driven by the *RAMS-PDF* precipitation data. The *RAMS* model showed optimal efficiency in precipitation prediction on a 30 to 45 day interval, with HSS values of 0.56. The *SMA* model showed satisfactory performance with *Nash-Sutcliffe* values of 0.89 in the calibration phase and 0.67 in the validation phase, demonstrating its capacity to assist hydrological modeling in the semi-arid. This cascade model showed potential in accurately representing median inflows for the reservoir and as such can be used as a hydrologic tool, assisting reservoir operation decisions to meet the region's demand.

Keywords: *Soil Moisture Account*; hydrologic modeling; reservoir operation; semi-arid

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição espacial da precipitação média anual.....	28
Figura 2 – Layout do HEC–HMS 3.4.....	43
Figura 3 - Diagrama esquemático do modulo SMA no HEC–HMS.....	45
Figura 4 - Relação para a taxa de infiltração potencial no módulo SMA.	46
Figura 5 - Relação do coeficiente do stress da água no módulo SMA.....	47
Figura 6 – Localização da área de estudo.....	56
Figura 7 – Sazonalidade da precipitação e da vazão na bacia hidrográfica do alto Jaguaribe.....	57
Figura 8 – Hidrografia da bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe.....	57
Figura 9 – CAV do Açude Orós.....	58
Figura 10 – MDT da bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe.....	58
Figura 11 – Distribuição espacial dos postos pluviométricos na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe.....	60
Figura 12 – Distribuição espacial dos postos fluviométricos na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe.....	61
Figura 13 – Distribuição temporal da ETP na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe.....	61
Figura 14 – Distribuição espacial dos pontos de grade do RAMS na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe.....	64
Figura 15 – Método de correção da previsão PDF.....	65
Figura 16 - Exemplo da metodologia aplicada para a determinação do ITEMP.....	67
Figura 17 - Algoritmo metodológico para determinação do ITEMP.....	67
Figura 18 – Representação do SMA no HEC-HMS.....	68
Figura 19 – Representação do modelo de cascata.....	77
Figura 20– Análise das precipitações médias mensais observadas versus modelada na sub-bacia1.....	83
Figura 21– Análise das precipitações médias mensais observadas versus modelada na sub-bacia2.....	84
Figura 22– Análise das precipitações médias mensais observadas versus modelada na sub-bacia3.....	85
Figura 23– Análise das precipitações médias mensais observadas versus modelada na sub-bacia4.....	85

Figura 24– Análise das precipitações médias mensais observadas versus modelada na sub-bacia5.....	86
Figura 25– Correlação das precipitações médias mensais observadas versus modelada na sub-bacia1.....	87
Figura 26– Correlação das precipitações médias mensais observadas versus modelada na sub-bacia2.....	87
Figura 27– Correlação das precipitações médias mensais observadas versus modelada na sub-bacia3.....	88
Figura 28– Correlação das precipitações médias mensais observadas versus modelada na sub-bacia4.....	88
Figura 29– Correlação das precipitações médias mensais observadas versus modelada na sub-bacia5.....	89
Figura 30 – HSS da previsibilidade do modelo RAMS.....	96
Figura 31 - Correlação da previsibilidade do modelo RAMS.....	97
Figura 32 - Vazões observadas versus vazão simulada pelo SMA para todo período de calibração.....	101
Figura 33 – Hidrograma da vazão simulada e observada e hietograma da precipitação média observada para o período de janeiro de 1979 a dezembro de 1995 na fase de calibração do SMA na sub-bacia 5.....	103
Figura 34 - Vazões observadas versus vazão simulada pelo SMA para todo período de Validação.....	104
Figura 35 - Hidrograma da vazão simulada e observada e hietograma da precipitação média observada para o período de janeiro de 1995 a dezembro de 2009 na fase de validação do SMA na sub-bacia 5.....	105
Figura 36 - Vazões observadas versus vazão simulada pelo SMA com a precipitação do RAMS para todo período.....	106
Figura 37 - Hidrograma da vazão simulada e observada e hietograma da precipitação média simulada para o período de janeiro de 1979 a dezembro de 2009 na sub-bacia 5.....	108
Figura 38 – Análise da previsibilidade do modelo RAMS.....	110
Figura 39 – Comparação dos volumes observados e calculados na escala mensal, com volume inicial = 500 hm ³	117
Figura 40 – Comparação dos volumes observados e calculados na escala mensal, com volume inicial = 1000 hm ³	119

Figura 41 – Comparação dos volumes observados e calculados na escala mensal, com volume inicial = 1500 hm ³	120
Figura 42 – Evolução dos HSS dos volumes calculado e simulado estocados no reservatório.....	121
Figura 43 – Evolução das correlações dos volumes calculado e simulado estocados no reservatório.....	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos sistema meteorologicos no Ceará.....	29
Tabela 2 – Características do Posto Fluviométrico do Iguatu.....	60
Tabela 3 - Evapotranspiração potencial da bacia do Alto Jaguaribe.....	61
Tabela 4 – Características fisiográficas das sub-bacias Alto Jaguaribe.....	68
Tabela 5 – Estimativa do armazenamento dossel interceptação.....	69
Tabela 6 - Estimativa do armazenamento na superfície.....	69
Tabela 7 - Estimativa de parâmetros selecionados do modelo SMA em função do tipo de solo (SCS).....	70
Tabela 8 - Estimativa da taxa de percolação do solo.....	70
Tabela 9 – Valores estimados dos Parâmetros do SMA.....	70
Tabela 10 - Características físicas do reservatório Orós.....	74
Tabela 11 – Regras de operação do reservatório em função da afluência.....	75
Tabela 12 – Análise da eficiência modelagem da precipitação na sub-bacia1.....	91
Tabela 13 – Análise da eficiência modelagem da precipitação na sub-bacia2.....	92
Tabela 14 – Análise da eficiência modelagem da precipitação na sub-bacia3.....	93
Tabela 15 – Análise da eficiência modelagem da precipitação na sub-bacia4.....	94
Tabela 16 – Análise da eficiência modelagem da precipitação na sub-bacia5.....	95
Tabela 17 - Parâmetros calibrados do modelo hidrológico SMA.....	100
Tabela 18 - Eficiência da calibração dos parâmetros do SMA na sub-bacia 5.....	100
Tabela 19 - Eficiência da validação dos parâmetros do SMA na sub-bacia 5.....	100
Tabela 20 – Análise da eficiência da vazão simulada pelo SMA forçada pelo modelo RAMS.....	109
Tabela 21 – Números de acertos e falhas na previsão da afluência do reservatório Orós.....	112
Tabela 22 – Decisões de operação do reservatório Orós.....	113
Tabela 23 – Volume observado e simulado no período de 1979 a 2009, com C.I = 500hm ³	114
Tabela 24 – Volume observado e simulado no período de 1979 a 2009, com C.I = 1000hm ³	115
Tabela 25 – Volume observado e simulado no período de 1979 a 2009, com C.I = 1500hm ³	116
Tabela 26 – HSS dos volumes estocados no reservatório.....	121

Tabela 27 – Correlação dos volumes estocados no reservatório.....	121
Tabela 28 – Desempenho do HSS ao longo dos processos hidroclimáticos.	123
Tabela 29 – Desempenho das correlações ao longo dos processos hidroclimáticos....	124

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACQUANET	Modelo para a Alocação de Água em Sistemas Complexos de Recursos Hídricos
ANA	Agência Nacional de Águas
BRAMS	Brazilian Rams Atmospheric Model System
CAV	Curva Cota-Área-Volume
CCM	Complexo Convectivo de Meso Escala
COGERH	Companhia de Gestão de Recursos Hídricos
CPTEC	Centro de Previsão e Estudos Climáticos
CV	Coefficiente de Variação
DKRZ	<i>Institute for Meteorology and German Climate Computing Centre</i>
DSS	<i>Data Storage System</i>
DTR	Diagrama Triangular de Regulação
E	Evaporação
EAM	Erro Absoluto Médio
ECHAM 4.5	<i>European-Hamburg Model version 4.5</i>
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
EQM	Erro Quadrático Médio
ENOS	El Niño Oscilação Sul
ET	Evapotranspiração
Fe	Fator de evaporação
Fk	Capacidade do Reservatório
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recurso Hídricos
HMS	<i>Hydrologic Modeling System</i>
HSS	<i>Heidke Skill Score</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ITEMP	Intervalo de Tempo de Máxima Previsibilidade
MCG	Modelo de Circulação Geral
MNT	Modelo Numérico de Terreno
MODHAC	Modelo Hidrológico Auto-Calibrável
NEB	Nordeste do Brasil
NS	<i>Nash-Sutcliffe</i>
Obs	Observado
PDF	<i>Probability Density Function</i>

PDO	<i>Pacific Decadal Oscillation</i>
POAS	Perturbações Ondulatórias no Campo dos Alísios
RAMS	Regional Atmospheric Modeling System
SCS	Soil Conservation Service
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIMRES	Simulador de reservatórios
SMA	<i>Soil Moisture Account</i>
SMAP	<i>Soil Moisture Accounting Procedure</i>
SRH	Secretaria de Recursos Hídricos
SSD	Sistema de Suporte a Decisão
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
USACEHEC	Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América
VCAN	Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Desvio padrão
α	Fator de forma do reservatório
μ	Média da afluência anual do reservatório

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	13
LISTA DE SÍMBOLOS	15
1. ESTRUTURAÇÃO	19
2. INTRODUÇÃO.....	20
3. OBJETIVOS.....	24
3.1. Objetivo Geral.....	24
3.2. Objetivos Específicos	24
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
4.1. Relações entre a variabilidade climática e a variabilidade hidrológica.....	25
4.2. Sistemas meteorológicos atuantes e regime pluviométrico no Ceará.....	27
4.3. Modelagem atmosférica	29
4.3.1. European-Hamburg Model version 4.5 (ECHAM.4.5).....	31
4.3.2. Regional Atmospheric Modeling System (RAMS)	32
4.3.3. <i>Downscaling</i> na previsão da precipitação.....	35
4.4. Análise da previsibilidade climática e hidrológica.....	37
4.5. Modelagem hidrológica.....	39
4.6. O Sistema HEC-HMS.....	42
4.7. O SMA do HEC-HMS.....	44
4.8. Histórico de uso do modelo SMA do HEC-HMS	48
4.9. Acoplamento entre modelos atmosféricos e hidrológicos.....	50
4.10. Modelo de operação de reservatórios	51
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	55
5.1. Estratégia metodológica	55
5.2. Caracterização da área de estudo.....	55

5.3.	Dados pluviométricos.....	59
5.4.	Dados fluviométricos.....	60
5.5.	Dados de evapotranspiração.....	61
5.6.	Data Storage System (DSS).....	62
5.7.	Modelagem atmosférica.....	63
5.8.	Intervalo de Tempo de Máxima Previsibilidade (ITEMP).....	66
5.9.	Modelagem hidrológica: SMA do HEC-HMS.....	67
5.9.1.	Caracterização fisiográficas das sub-bacias.....	68
5.9.2.	Estimativa dos parâmetros do SMA.....	69
5.9.3.	Parametrização multiobjetivo do SMA.....	71
5.9.4.	Calibração e validação do SMA.....	72
5.10.	Modelo de operação do reservatório.....	72
5.11.	Modelo de cascata.....	75
5.12.	Análise da eficiência da modelagem atmosférica e hidrológica.....	78
5.12.1.	Viés.....	78
5.12.2.	Erro Absoluto Médio (EAM).....	78
5.12.3.	Erro Quadrático Médio (EQM).....	79
5.12.4.	Desvios padrão (σ).....	79
5.12.5.	Coeficiente de correlação (r).....	80
5.12.6.	Heidke Skill Score.....	80
5.12.7.	Nash-Sutcliffe.....	81
6.	RESULTADOS.....	82
6.1.	Análise da modelagem da precipitação.....	82
6.2.	Análise da eficiência da simulação da precipitação.....	89
6.3.	Modelagem hidrológica.....	98
6.4.	Análise da sensibilidade dos parâmetros do SMA.....	98
6.5.	Calibração e validação do modelo SMA.....	99

6.6.	Acoplamento do modelo climático e hidrológico	106
6.7.	Modelo de operação do reservatório	111
6.8.	Análise dos processos hidroclimáticos	122
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	125
	REFERÊNCIAS	127

1. ESTRUTURAÇÃO

Esse trabalho está estruturado em sete capítulos sendo o primeiro o que diz respeito a essa estruturação. O segundo capítulo apresenta, inicialmente, uma introdução ao tema da pesquisa, mostrando a problemática da previsão climática e hidrológica na região semiárida.

O terceiro capítulo mostra o objetivo principal e os objetivos específicos da tese a serem alcançados.

O quarto capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre os temas abordados na tese, levando em consideração as variabilidades climáticas e hidrológicas, a utilização de modelos dinâmicos de precipitação aninhada a modelos hidrológicos, a análise da eficiência de previsões e a operação de reservatórios.

O quinto capítulo faz uma caracterização da área de estudo, e a disponibilidade de dados hidrometeorológicos e fisiográficos da bacia, assim como metodologia aplicada, como o uso de modelos climáticos e hidrológicos, análise da eficiência da previsão e regras de operação do reservatório.

O sexto capítulo traz os resultados do uso da previsão climática aninhada a um modelo hidrológico, mostrando sua eficiência na região de estudo.

O sétimo capítulo trata das conclusões, recomendações e possíveis aplicação do estudo em outras regiões.

2. INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água no Brasil depende, em grande parte, das informações do clima e de suas variações em diversas escalas de tempo.

O Nordeste do Brasil (NEB), ao longo dos anos, vem passando por uma variabilidade natural do clima, alternando anos de chuvas extremas a secas severas que quando associada à ação antrópicas pode alterar as características do clima de uma determinada região (NOBRE, 2001; MOURA e SHUKLA, 1991; ALVES et al. 2003; SUN et al. 2005).

No Estado do Ceará, localizado no NEB, a maior parte da população depende das águas estocadas nos reservatórios, tanto para o abastecimento humano como para o auxílio do desenvolvimento econômico do Estado. Atualmente, há poucas possibilidades de aumento da oferta com construção de novos reservatórios. Nesse contexto, muda-se o foco da gestão dos recursos hídricos, procurando o desenvolvimento de novas metodologias e instrumentos que possibilitem auxiliar a alocação.

A alocação de água é feita considerando dados de simulações climáticas de médio prazo como parâmetros de entrada em modelos hidrológicos, a fim de auxiliar as tomadas de decisões. Surgem assim sistemas dinâmicos, onde a precipitação prevista passa a ser entrada a modelos hidrológicos calibrados e validados para as bacias hidrográficas, permitindo uma alocação de água otimizada.

Em regiões com previsibilidade climática relativamente alta, como o caso do NEB os modelos climáticos auxiliam estes sistemas (SUN et al. 2005). Avanços significativos na previsão de tempo e clima foram alcançados nas últimas décadas, com a disponibilização operacional de previsões de chuva na escala diária com horizonte de até quinze dias, e previsões climáticas de chuva sazonal com horizonte de até seis meses. A previsão sazonal de chuva pode ser produzida com modelos climáticos estatísticos ou dinâmicos (SOUZA FILHO e LALL, 2003).

Os modelos dinâmicos de circulação global simulam todos os processos físicos da atmosfera e suas interações com os oceanos e continentes. Estes modelos aplicam os princípios de conservação de massa, energia, quantidade de movimento, termodinâmica da atmosfera e microfísica das nuvens para estimar a chuva futura.

Os modelos estatísticos preveem a chuva sazonal utilizando padrões climáticos como variável independente; por exemplo, a evolução da temperatura dos oceanos.

A redução de perdas e aumento de lucros em diversas áreas socioeconômicas, muitas vezes depende de erros ou acertos de previsões climáticas sazonais (MACHADO e ROCHA, 2011).

A gestão da demanda apoia-se no conhecimento dos regimes pluviais e hidrológicos e na operação das águas estocadas nos reservatórios. Contudo, as disponibilidades de dados de vazões em rios são bastante limitadas no Nordeste. Por outro lado, dispõe-se na região de uma boa rede de observações pluviométricas. Assim, a modelagem chuva x vazão apresenta-se como uma eficiente alternativa tecnológica para dar suporte à operação dos sistemas hidrológicos locais.

Em suas condições naturais, a maioria dos rios da região são intermitentes e permanecem secos em intervalos de nove meses ou até 18 meses quando da ocorrência de secas intensas. Nesse contexto, os governos Federal e Estadual aplicaram por mais de um século uma intensa política de construção de reservatórios/barragens.

Vários modelos hidrológicos foram desenvolvidos para subsidiar os processos decisórios no complexo manejo dos reservatórios. (LEÃO *et al.*, 2013).

Segundo Alves *et al.* (2008) nas regiões semiáridas como parte do Nordeste do Brasil (NEB) os reservatórios hídricos artificiais são essências para acumular água no período chuvoso e suprir sua demanda por liberação no período seco. Por este fato, é importante o conhecimento da variabilidade pluviométrica na bacia hidrográfica desses reservatórios.

Nesse contexto o planejamento para a utilização, em usos múltiplos, das águas armazenadas reveste-se de grande importância. Para isso, é importante que se conheça bem os regimes pluviais na bacia e de vazões dos rios. Contudo, o Estado do Ceará, como também o Nordeste, tem uma boa rede de observações de dados pluviométricos, porém, muita deficiência de dados de vazões. A modelagem chuva x vazão surgiu como alternativa tecnológica e científica para suprir essa necessidade.

A utilização de modelos chuva-vazão na previsão de variáveis hidroclimáticas no NEB é bem sucedida. Vários autores (Alexandre *et al.*, 2013; Cabral *et al.*, 2013; Alves *et al.*, 2012; Escarião *et al.*, 2012), aplicaram modelos de previsão para o NEB, e em outras bacias do Brasil, Lelis (2012) aplicando o SWAT e Beskow (2009) utilizando modelagem dinâmica distribuída, obtendo um bom desempenho nos seus resultados.

Tradicionalmente, a comunidade técnica do Nordeste utiliza dois modelos chuva deflúvio: o SMAP desenvolvido por Lopes *et al.* (1981) e o MODHAC (LANNA e SCHWARZBACH, 1989). O MODHAC foi aplicado em diversos planos de recursos

hídricos no Ceará e o SMAP é aplicado operacionalmente pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), no sistema de previsões de vazões.

O HEC-HMS, empregado nessa pesquisa, é um programa que pode ser adaptado a um sistema de interesse, através de mudanças em um banco de dados ou alterações nos parâmetros, nas condições de contorno e nas condições iniciais, conforme CAMPOS (2009).

Com o intuito de inserir um novo modelo na prática regional, aplica-se nesse estudo de caso o *Soil Moisture Account (SMA)* desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América. O SMA está inserido como uma das ferramentas do programa HEC-HMS.

O SMA tem sido utilizado com sucesso por vários autores em várias partes do mundo (Bennett e Peters, 2000; García *et al.*, 2008; Chu e Steinman, 2009; Bashar, 2012; Golian *et al.*, 2012; Koch e Bene, 2013; Gyawali e Watkins, 2013).

Como a gestão dos recursos hídricos é influenciada pela variabilidade climática, especialmente na má distribuição temporal e espacial da chuva e conseqüentemente do regime de vazões. Diante disso, existe uma demanda pelo Estado do Ceará e pelas empresas privadas de informações climáticas para tomada de decisão ao nível nacional/local.

Entretanto faz-se necessário para o planejamento estratégico do gestor o conhecimento a respeito do desempenho das informações hidroclimáticas, a fim haver tempo hábil para dada decisão. Os processos hidroclimáticos são caracterizados por uma variabilidade temporal, associada aos sistemas meteorológicos de cada região, tornando essas informações nem sempre previsíveis aos modelos.

Daí surge à busca pelo Intervalo de Tempo de Máxima Previsibilidade (ITEMP) dos processos hidroclimáticos, pelo fato principalmente da necessidade das ações de gerenciamento do sistema hídrico, serem tomadas no começo do primeiro semestre, no planejamento da quadra chuvosa no Ceará, principalmente para mitigar eventos extremos, como as secas e as cheias, que tanto afetam a região do estudo.

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

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

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

- Encontrar o Intervalo de Tempo de Máxima Previsibilidade (ITEMP) no acoplamento do modelo climático, hidrológico e de operação de reservatório com vistas à otimização da liberação de águas na escala intrasazonal.

3.2. Objetivos Específicos

- Analisar os resultados da modelagem atmosférica com correções PDFs, verificando a eficiência da previsão utilizando métricas de desempenho;
- Aplicar o modelo hidrológico SMA do HEC-HMS, em uma bacia hidrográfica no semiárido avaliando sua aplicabilidade;
- Analisar as aflúências e os volumes estocados previstos pelo modelo SMA aninhado ao modelo climático regional em um reservatório a fim de otimizar sua operação;
- Verificar a evolução temporal das métricas ao longo dos processos hidroclimáticos;

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Relações entre a variabilidade climática e a variabilidade hidrológica

A disponibilidade de água no Brasil depende, em grande parte, do clima e de suas variações em diversas escalas de tempo (MARENGO *et al.* 2010). Adicionalmente, os riscos derivados das mudanças climáticas, sejam naturais ou de origem antropogênica, têm levantado grande preocupação nos círculos científicos e do governo, sendo o setor de recursos hídricos um dos mais impactados, afetando tanto a qualidade como a quantidade de água.

A presença de secas nas diferentes bacias do Brasil, em nível anual, são ilustrações da variabilidade interanual do clima associada aos fenômenos de El Niño ou La Niña no Oceano Pacífico Tropical ou à variabilidade na temperatura da superfície do mar do Atlântico Tropical ao norte e sul da linha equatorial, que podem gerar anomalias climáticas conducentes a grandes secas, como em 1877, 1983 e 1998, 2012 e 2013 no Nordeste, 2004-2006 no Sul do Brasil, 2001 no centro oeste e sudeste e em 1926, 1983, 1998 e 2005 na Amazônia (MARENGO *et al.* 2008 a, 2008b, COX *et al.* 2008).

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

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

O Nordeste do Brasil (NEB) apresenta clima semiárido com grande variabilidade temporal e espacial de chuvas (MOLION e BERNARDO, 2002). Pequenas flutuações, associadas às condições climáticas, provocam significativos impactos sociais e econômicos sobre a região, conforme descritos por Souza Filho e Moura (2006). Desta forma, identificar padrões de variação ou/e sinais de mudanças climáticas é de relevante importância, já que impacta os recursos hídricos, agricultura e outras áreas relevantes (SILVEIRA *et al.* 2013).

Segundo Tucci (2009), a variabilidade da precipitação apresenta impacto diferenciado sobre as vazões na bacia hidrográfica. Nos anos com valores extremos (inundações e secas) a resposta da bacia se amplifica com relação à variação adimensional da precipitação. Nos anos mais úmidos o aumento de precipitação produz maior aumento da vazão já que a infiltração aumenta pouco e a evapotranspiração potencial diminui pelo aumento da chuva, o que aumenta proporcionalmente mais a vazão. No sentido contrário, nos anos secos, a redução de precipitação, aumento da evapotranspiração reduz em maior magnitude a vazão.

Variações em chuvas e vazões de rios no Nordeste apresentam uma variabilidade interanual e em escalas de tempo interdecadal significativa, que são mais importantes do que tendências de aumento ou redução (MARENGO 2007). A variabilidade está associada a padrões de variação da mesma escala de tempo nos oceanos Pacífico e Atlântico, como a variabilidade interanual associada ao El Niño Oscilação Sul (ENOS), ou à variabilidade decadal do Pacífico (PDO - Pacific Decadal Oscillation), do Atlântico (NAO -North Atlantic Oscillation) e à variabilidade do Atlântico Tropical e do Atlântico Sul. No Nordeste foi observado um ligeiro aumento de chuvas no longo prazo, mas a tendência não é estatisticamente significativa (LAZARO *et al.*, 2011).

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

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

Essa migração sazonal da ZCIT, associada aos fatores que causam o fortalecimento ou enfraquecimento dos ventos alísios de nordeste e sudeste, tem papel

importante na determinação do período chuvoso do norte da região Nordeste. No período seco há um predomínio de altas pressões atmosféricas e quase uma total ausência de fenômenos atmosféricos causadores de precipitação.

A questão fundamental em hidrologia, quando se projetam os usos dos recursos hídricos para o futuro é verificar qual o risco de períodos anômalos se repetirem no futuro e comprometer os usos da água (demanda de água, navegação, produção de energia, etc).

Sendo assim, o impacto das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos não pode ser tratada isoladamente dos usos atuais do recurso, mas, certamente, essas mudanças poderão exacerbar e acentuar todos os problemas antes assinalados.

A solução desses problemas requer uma abordagem institucional em escalas local, regional e global. Por isso, o maior desafio no tratamento da questão dos recursos hídricos relaciona-se, em um contexto de mudanças climáticas, com a necessidade de dispor um arcabouço institucional que permita a gestão integrada dos recursos hídricos.

4.2. Sistemas meteorológicos atuantes e regime pluviométrico no Ceará

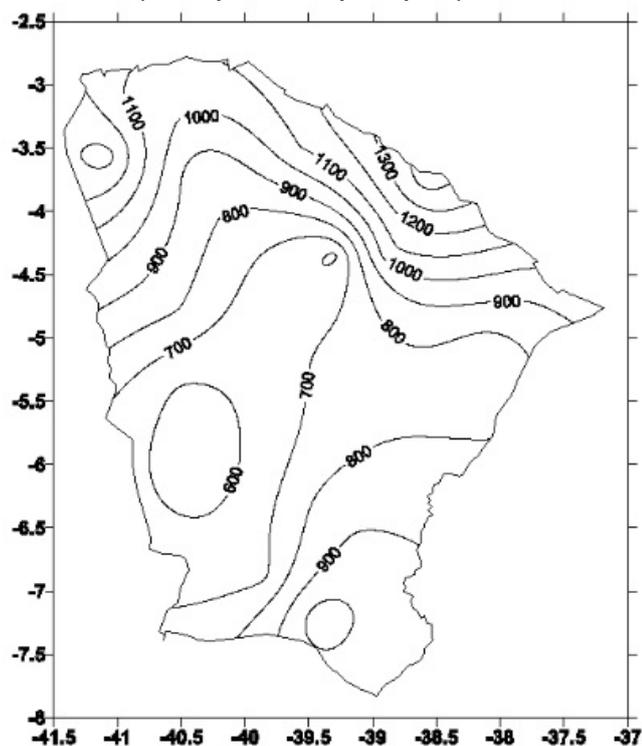
O Estado do Ceará está localizado no setor norte do Nordeste, entre as coordenadas de $2,5^{\circ}$ S e 10° S e 34° W e 42° W e tem como característica pluviométrica dois períodos distintos ao longo do ano. Um chuvoso, que se estende de fevereiro a maio, e um período seco compreendendo os meses de junho a outubro. Outro período intermediário, chamado de pré-estação chuvosa, começa em média em novembro e estendendo-se até janeiro (Alves 2009).

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. A Figura 1 mostra a distribuição espacial da precipitação média anual no Estado do Ceará

Segundo a FUNCEME as chuvas que ocorrem em dezembro e janeiro são em geral chamadas de chuvas de pré-estação. Essas chuvas são causadas basicamente por frentes frias que vem do Sul, o que acaba afetando as condições atmosféricas do nordeste; às vezes é formada por vórtice ciclônico, uma movimentação circular dos ventos na alta atmosfera que pode provocar chuvas.

As frentes frias são bandas de nuvens organizadas que se formam na região de confluência entre uma massa de ar frio (mais densa) com uma massa de ar quente (menos densa). A massa de ar frio penetra por baixo da quente, como uma cunha, e faz com que o ar quente e úmido suba, forme as nuvens e conseqüentemente as chuvas.

Figura 1 - Distribuição espacial da precipitação média anual.



Fonte: Santos *et al.*, 2009.

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é o sistema meteorológico mais importante na determinação de quão abundante ou deficiente serão as chuvas no setor norte do Nordeste do Brasil. Normalmente a ZCIT migra sazonalmente de sua posição mais ao norte, aproximadamente 12°N, em agosto-setembro para posições mais ao sul e aproximadamente 4°S, em março-abril, no Ceará atua entre os meses de fevereiro a maio atuando na estação chuvosa.

A ZCIT é uma banda de nuvens que circunda a faixa equatorial do globo terrestre, formada principalmente pela confluência dos ventos alísios do hemisfério norte com os ventos alísios do hemisfério sul. De maneira simplista, pode-se dizer que a convergência dos ventos faz com que o ar, quente e úmido ascenda, carregando umidade do oceano para os altos níveis da atmosfera ocorrendo à formação das nuvens.

A ZCIT é mais significativa sobre os Oceanos e por isso, a Temperatura da Superfície do Mar-TSM é um dos fatores determinantes na sua posição e intensidade, por essas razões, dizemos que existe alta previsibilidade associada a essas chuvas.

A pós-estação que vai de maio a junho tem como principal sistema atuante as ondas de leste, que são sistemas que se formam no campo de pressão atmosférica, na faixa tropical do globo terrestre, na área de influência dos ventos alísios, e se deslocam de oeste para leste, ou seja, desde a costa da África até o litoral leste do Brasil.

Quando as condições oceânicas e atmosféricas estão favoráveis as Ondas de Leste também provocam chuvas no Estado do Ceará, principalmente na parte centro-norte do Estado. Esse sistema não tem causas conhecidas tornando difícil de prever com certa antecedência.

A Tabela 1 apresenta em resumo o período, os sistemas meteorológicos e o grau de previsibilidade para o Estado do Ceará.

Tabela 1 - Características dos sistema meteorologicos no Ceará.

Período	Chuva	Sistemas meteorológicos	Previsibilidade
DEZ-JAN	Pré-estação	Frentes frias	Baixa
FEV-MAI	Estação	ZCIT	Alta
MAI-JUN	Pós-estação	Ondas de leste	Baixa

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3. Modelagem atmosférica

Os modelos atmosféricos são modelos que se destinam a descrever movimentos atmosféricos sobre o planeta como um todo. Podem ser acoplados a modelos oceânicos e/ou a modelos de outros componentes do clima.

Esses modelos podem ser configurados para previsão de tempo ou para estudos climáticos. Para a previsão de tempo, o modelo é executado por um tempo físico de alguns dias (entre horas, dias e até semanas) e tem em vista representar a formação e a evolução de sistemas de tempo de grande escala da forma mais realista possível. Já para previsão climática, o modelo não se interessa em sistemas de tempo individuais, mas nas propriedades estatísticas das variáveis atmosféricas em escalas de tempo de meses ou mesmo anos.

Como variáveis de saída, eles fornecem, entre outras, temperatura do ar, velocidade do vento em várias direções, cobertura de nuvens, precipitação, umidade do solo, cobertura de neve, radiação solar, pressão e temperatura na superfície do mar.

A baixa resolução desses modelos deve-se ao poder computacional exigido para a execução dos mesmos, pois quanto maior a resolução espacial requerida, maior será o tempo de computação necessário.

Modelos de Circulação Geral (MCGs) são baseados nos princípios gerais da dinâmica dos fluidos e da termodinâmica. Outros processos, tais como a convecção, que ocorrem em escalas muito pequenas para serem resolvidas diretamente, exigem parametrização. MCGs são normalmente executados em resolução espacial relativamente grosseira, geralmente maior que 2.0° , latitudinalmente e longitudinalmente. O resultado direto da baixa resolução espacial produz uma diferença de escala espacial grande entre as previsões climáticas disponíveis e da escala de interesse de previsão climática da maioria dos usuários. Para superar isso, modelos climáticos regionais (MCRs) estatísticos ou dinâmicos, com maior resolução espacial, são construídos para áreas limitadas. MCRs possuem relativamente alta resolução, impulsionados pela baixa resolução dos MCGs, e podem proporcionar significativos recursos de pequena escala em uma região limitada a um custo computacional acessível em comparação com MCGs de alta resolução.

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

A seguir serão descritos dois tipos de modelos, os modelos de circulação geral atmosférico e o modelo regional, ambos utilizados nesse estudo.

4.3.1. European-Hamburg Model version 4.5 (ECHAM4.5)

O modelo *European-Hamburg Model version 4.5* (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-lagrangiano (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 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 à 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).

4.3.2. Regional Atmospheric Modeling System (RAMS)

O RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) foi desenvolvido pela Universidade Estadual do Colorado (USA) sendo executado com sucesso na Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos-FUNCEME, (ALVES *et al.*, 2007).

O RAMS é um modelo de circulação regional com prognóstico euleriano, baseado na integração das equações primitivas de conservação do momento linear, massa, energia e água. O RAMS utiliza um conjunto completo de equações que governam a evolução do estado atmosférico, baseadas nas leis de movimento de Newton e na termodinâmica de um fluido, incluindo parametrizações dos diversos processos físico presentes. É equipado com um esquema de aninhamento múltiplo de grades, permitindo que as equações do modelo sejam resolvidas simultaneamente sob qualquer número de grades computacionais com diferentes resoluções espaciais. Grades de maior resolução são utilizadas para modelar detalhes dos sistemas atmosféricos de menor escala, tais como escoamento sobre terrenos complexos e circulações termicamente induzidas pela superfície. As grades maiores, de menor resolução, são utilizadas para modelar o ambiente destes sistemas menores, fornecendo assim as condições de fronteira para as grades mais finas. Para a condição de fronteira inferior, o RAMS utiliza o LEAF-2 Walko *et al.*, 2000, o qual faz uma adaptação dos parâmetros da vegetação para a representação de áreas urbanizadas.

Trata-se de um modelo regional largamente utilizado e aceito pela comunidade científica, seja para pesquisas ou operacionalmente para previsões numéricas de tempo em instituições dedicadas ao assunto, capaz de reproduzir grande parte dos diversos e mais relevantes fenômenos atmosféricos.

O modelo RAMS recebe como dados de entrada, a temperatura do ar, geopotencial, umidade do ar (temperatura do ponto de orvalho ou razão de mistura ou umidade relativa do ar ou, ainda, diferença psicrométrica) e vento (componentes zonal - u e meridional - v ou direção e intensidade) em diferentes níveis da atmosfera. Esses dados podem ter como origem observações convencionais de superfície e altitude, resultados de modelos numéricos e (ou) de estimativas geradas através de informações de satélites etc.

Essas informações necessitam estar em arquivo com formato compatível para que o modelo RAMS possa lê-los e prepará-los para a inicialização. A inicialização pode ser homogênea, quando se atribui horizontalmente, em toda a grade do modelo, o mesmo valor da informação observada naquele nível, ou variada, quando as informações são interpoladas para a grade do modelo apresentando variação horizontal. Nesse processo de interpolação é utilizada uma técnica de análise objetiva proposta por Barnes (1964) a qual consiste em obter um valor interpolado para o ponto de grade, através de uma média ponderada da informação original. A ponderação é feita atribuindo-se maior peso à informação mais próxima do ponto de grade e menor peso à informação mais distante, conforme uma função Gaussiana, em que o peso é função da distância do valor observado ao ponto de grade.

Para o bom desempenho do modelo é importante à adequação das condições iniciais em representar o comportamento da atmosfera no tempo inicial. A assimilação dos dados de grande escala é feita através de um esquema de relaxamento Newtoniano (“nudging”), por meio de um termo adicionado às equações básicas, que faz com que o valor de cada variável nos diversos pontos de grade tenda àquele contido na informação de grande escala. Neste caso é utilizado um sistema de assimilação nas fronteiras laterais (“nudging lateral”) do modelo regional e outro em todo o domínio do modelo (“nudging central”), que de acordo com Santiago de Maria (2007) pode trazer melhorias significativas na previsão do modelo.

O RAMS usa grade do tipo "C" de Arakawa, em que as variáveis termodinâmicas, inclusive umidade, são definidas nos pontos de grade. A projeção horizontal utilizada para a definição das coordenadas da grade é a projeção

estereográfica, cujo polo de projeção fica próximo do centro na área de domínio. Este tipo de projeção diminui distorções da projeção da área de interesse. Coordenadas cartesianas também podem ser utilizadas pelo RAMS.

Na vertical, a coordenada é do tipo σ -z, da forma $z^* = \sigma z = H [(z - z_s)/(H - z_s)]$ em que: (x, y, z) são as coordenadas cartesianas; (x*, y*, z*) são as coordenadas transformadas; z_s é a altura da superfície em relação ao nível médio do mar (topografia) e H é a altura do topo do modelo (Tripoli e Cotton, 1982).

Os processos de troca de umidade, calor e momento relacionados à convecção úmida não podem ser resolvidos explicitamente em modelos atmosféricos de baixa resolução. Isto decorre do fato de que a escala horizontal do fenômeno físico é menor do que a escala horizontal das malhas ajustadas nos modelos. Entretanto, desconsiderar os processos dinâmicos e energéticos ligados à convecção afetaria o desempenho da simulação, o que levou ao desenvolvimento de diversas parametrizações a fim de contabilizar implicitamente a contribuição destes processos às variáveis da escala resolvida pelo modelo.

A parametrização de cúmulos originalmente contida no modelo RAMS segue a linha desenvolvida por Kuo (1965, 1974), descrita em Molinari (1985) e Tremback (1990), baseada na observação de uma forte correlação entre precipitação convectiva e a convergência total de vapor em larga escala em uma coluna atmosférica. O esquema é baseado na hipótese do equilíbrio, na qual a convecção ocorre para remover, o excedente de vapor fornecido pela larga escala.

As equações da tendência termodinâmica e da tendência de umidade para a convecção úmida são dependentes da instabilidade atmosférica, da velocidade vertical no nível de condensação por levantamento - NCL e da convergência de umidade na camada abaixo das nuvens. Neste processo, a convecção é ativada se todas as condições seguintes são atendidas: i) se há um abastecimento de umidade fornecida pela escala resolvível; ii) a coluna é condicionalmente instável e o topo da nuvem está acima de 650 hPa (não contempla a convecção rasa); iii) há movimento vertical ascendente na base da nuvem e iv) a umidade relativa do ar excede um valor crítico de 80% para um nível abaixo da base da nuvem. O acionamento da parametrização é realizado em função das condições atmosféricas do ambiente (modelo) e dos perfis convectivos, verificando-se a existência de instabilidade condicional através do perfil da energia estática úmida e a existência de um movimento vertical positivo acima de um valor crítico.

Outro esquema de convecção disponível na versão 6.0 do RAMS é o esquema Kain-Fritsch, semelhante ao esquema de Fritsch-Chappell (1980). Nele, um esquema sofisticado modela a troca de massa entre o ambiente e a nuvem como uma função das características das correntes ascendentes e descendentes (saturadas e não saturadas). Este esquema foi formulado para assegurar conservação de massa, energia, umidade total e momento. Neste trabalho foi usada a nova versão do esquema de Kain-Fritsch que inclui convecção pouco profunda (Kain-Fritsch, 2002).

A parametrização de microfísica no RAMS, descrita por Walko et al. (1995), calcula as fontes e sumidouros das diferentes categorias de hidrometeoros: vapor água de nuvem, água de chuva, "pristine ice", neve, agregados, "graupel" e granizo. A razão de mistura de vapor d'água e água de nuvem são diagnosticadas, enquanto que, as razões de mistura para as demais categorias são prognosticadas. Nesta parametrização, são levados em consideração os diferentes processos microfísicos, como: nucleação, sedimentação, conversão de uma categoria para outra e coleta de partículas de uma categoria por hidrometeoros de outra.

4.3.3. *Downscaling* na previsão da precipitação

Como ferramentas para previsões sazonais, os Modelos de Circulação Geral (MCGs) conseguem representar bem apenas os padrões climáticos de grande escala. Entretanto, devido à baixa resolução desses modelos (resolução espacial da ordem de 100 a 200 km), os mesmos ainda não proporcionam, por exemplo, um prognóstico mais detalhado da distribuição espacial da chuva na escala intrasazonal (controlada por fatores com escala tipicamente bem menor), além da própria variabilidade temporal dessa distribuição de precipitação.

Assim, com o objetivo de solucionar o problema da diferença entre a escala para a qual são realizadas as previsões por MCGs e a escala da região onde se deseja empregá-las, tem-se usado técnicas de transferência da informação meteorológica para as escalas menores (técnicas de *downscaling*) desenvolvidas pela necessidade de se ter uma informação mais detalhada no tempo e no espaço dos produtos de previsão numéricas de tempo e clima.

Basicamente o *downscaling* trata do uso dos resultados de uma modelagem de grande escala para alimentar um modelo de menor escala, seja um modelo numérico

regional de área limitada, com uma resolução da ordem de dezenas de quilômetros (DICKINSON *et al.*, 1989), seja um modelo empírico.

As técnicas de *downscaling* podem ser classificadas em duas categorias: *downscaling* dinâmico e *downscaling* estatístico.

A primeira delas envolve o uso de modelos numéricos de escalas global e regional, e requer informação climática (de superfície) detalhada, assim como uma alta disponibilidade computacional. Por outro lado, as empíricas empregam métodos estatísticos, sendo que os mais empregados são os métodos de regressão (lineares e não lineares), geradores de tempo (análises de componentes principais, análises de correlação canônica, redes neurais artificiais) e os estocásticos (teoria fuzzy – conjuntos nebulosos, algoritmos genéticos, etc).

Na técnica de *downscaling* dinâmico, utiliza-se um modelo meteorológico de resolução mais alta (regional), com espaçamento de grade da ordem de algumas dezenas de quilômetros, alimentado nas fronteiras pelas condições produzidas pelo modelo global (ou até por dados observados). Por representar com maior detalhe os processos que agem regionalmente, acredita-se que os modelos regionais podem produzir previsões de tempo e clima com maior precisão.

Como o principal argumento contra a prática *downscaling* dinâmico é o custo computacional necessário para executar as simulações históricas das previsões, a existência de uma boa rede de observação é crucial para a validação dos dados a partir de modelos de alta resolução.

Durante muito tempo, diversas abordagens menos complexas e menos onerosas como o *downscaling* estatístico davam resultados sistematicamente comparáveis ou mesmo superiores aos do *downscaling* dinâmico. No entanto, os modelos dinâmicos ganharam espaço e as técnicas estatísticas, ao invés de se contraporem a estes, têm passado a cumprir um papel complementar, seja como modelos de previsão autônomos, seja como corretores dos modelos dinâmicos.

A vantagem do uso do *downscaling* estatístico é que ele oferece uma solução imediata a um baixo custo computacional e, conseqüentemente, pode ser rapidamente implementado em centros operacionais.

Os atuais modelos de circulação geral da atmosfera forçados por temperaturas da superfície do mar (TSMs) tem a capacidade de capturar a circulação de grande escala da atmosfera sobre o nordeste da América do Sul, entretanto, ainda não capazes de prever

ou simular características da atmosfera ou da precipitação em uma escala mais local, devido a sua resolução espacial (NOBRE *et al.* 2001).

De acordo com Oliveira (2006), a incompatibilidade de escala temporal e espacial da informação meteorológica restringia seu uso em modelos hidrológicos, sendo uma alternativa nos anos recentes o uso de *downscaling* dinâmico. No Brasil, estudos de previsões meteorológicas de tempo (escala de dias) e sazonais (acima da escala mensal) têm sido usados como dados de entrada na modelagem hidrológica e em sistemas de operação de reservatórios (TUCCI *et al.* 2005).

O *downscaling* usa modelos regionais aninhados a modelos dinâmicos de circulação geral da atmosfera. Os modelos regionais incorporam características locais como topografia, vegetação, solo etc., não contidas nos modelos globais. Dessa forma, os modelos globais respondem mais à influência da circulação de grande escala, enquanto os modelos regionais tentam reproduzir as forçantes dos efeitos locais, mas também são influenciados pelas forçantes do modelo global (COSTA e MENEZES NETO, 2009). Vários estudos acerca do uso desta técnica *downscaling* sugerem um melhor desempenho na simulação e previsão de distribuição de precipitação localizada (NOBRE *et al.*, 2001; SUN *et al.* 2005).

4.4. Análise da previsibilidade climática e hidrológica

O planejamento e a gestão dos recursos hídricos são muitas vezes considerados o beneficiário principal das previsões climáticas. A sua acurácia, no entanto está sujeita em caracterizar adequadamente as incertezas oriundas tanto dos modelos climáticos quanto hidrológicos (KWON *et al.*, 2012).

Segundo Sankarasubramanian *et al.*, (2009) experimentos sintéticos para analisar a habilidade da previsão em relação à demanda de água armazenada em reservatórios são exploradas para desenvolver ideias a respeito de situações onde as propostas estratégicas podem ser mais eficazes.

Entretanto não há modelos perfeitos de clima e hidrologia, sendo necessária para uma melhor habilidade dos modelos uma avaliação dos riscos e incertezas probabilísticas das previsões, baseada nas incertezas cumulativas ao longo do processo de modelagem (BLOCK *et al.*, 2009),

Segundo Paz e Collischonn (2011), um dos principais produtos de tais modelos são os campos de chuva calculados para uma grade de pontos ao nível da superfície. São realizadas simulações de chuva com horizontes de alguns dias até meses, de grande utilidade em áreas como previsão de safras agrícolas, previsão e controle de enchentes e planejamento da operação de reservatórios, entre outras.

A previsão de precipitação para períodos sazonais, atualmente apresenta boa confiabilidade em várias áreas do globo, incluindo o Nordeste do Brasil, e em particular sua região semiárida. Este aumento da destreza dos modelos deve-se a um melhor entendimento das conexões dos oceanos com a atmosfera (GODDARD *et al.*, 2001).

A previsão de alta resolução de sistemas atmosféricos é caracterizada por uma crescente complexidade, que torna os resultados da validação e interpretação dos modelos cada vez mais exigentes, devido principalmente à dificuldade dos processos na superfície. Nessas superfícies a densidade limitada de estações meteorológicas não permite uma avaliação precisa das previsões e simulações de alta resolução. Conseqüentemente ferramentas avançadas para a validação dos modelos atmosféricos são necessárias e de grande interesse para os meteorologistas e hidrólogos (JASPER e KAUFMANN, 2003).

Quantificar a distribuição das precipitações sobre a superfície é de suma importância para a compreensão da hidrologia de superfície. Essa quantificação pode desempenhar um importante papel na previsão e no monitoramento de fenômenos hidrometeorológicos. Porém, muitas das áreas propensas a esses desastres, sofrem com falta de dados pluviométricos confiáveis e sem falhas.

Entretanto, faz-se necessário a análise das estimativas de chuva desses modelos climáticos, os quais precisam ser avaliados quanto à destreza em corretamente reproduzir a chuva observada em nível de bacia hidrográfica, com a utilização de índices de pontuação de habilidade, conhecidos também como *Skill Score*.

Diversos índices de análise de previsão são propostos e utilizados na literatura (WILKS, 2006; KULIGOWSKI, 2002; STEPHENSON, 2000; MESINGER, 2008) e poderiam também ser utilizados dentro da metodologia apresentada neste trabalho. Independente do índice de desempenho utilizado ressalta-se a importância de entender sua formulação para poder avaliar mais coerentemente os resultados (HAMILL e JURAS, 2006).

A habilidade da previsão refere-se à precisão relativa de um conjunto de previsões no que diz respeito a um conjunto padrão de controle ou referência as previsões.

Muitos dos índices têm sido usados para avaliar a precisão das simulações/previsões oriundas dos modelos de tempo e clima, entre eles o *Heidke Skill Score* (HSS) utilizado por Alves *et al.*(2012) na previsão de vazões na bacia hidrográfica do alto Jaguaribe, Ceará. O HSS mede a destreza da simulação e da previsão para antever a precipitação correta em relação a um padrão particular, tal como a previsão feita ao acaso, ou seja, o índice elimina a influência de previsões que estariam corretas por acaso.

Alguns trabalhos forma realizados com sucesso em regiões semiárida do NEB, usando informações climáticas na previsão de vazões, demonstrando que a previsão sazonal tem habilidade significativa quando informações climáticas são fornecidas (MOURA e SHUKLA, 1981; SOUZA FILHO e LALL, 2003).

4.5. Modelagem hidrológica

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

A bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema, através do qual uma variável de entrada, como a precipitação, é transformada numa variável de saída (a vazão), por

diversos processos do ciclo hidrológico. Uma das maneiras de representar esse processo é através da modelagem hidrológica.

Um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando na compreensão dos processos que envolvem essa mesma realidade. O recurso à modelação, e necessariamente aos modelos que a compõem, é cada vez mais uma ferramenta de trabalho em planejamento ambiental, permitindo fazer a análise não só da situação presente ou passada, como também elaborar e analisar cenários de situações futuras.

O modelo hidrológico permite equacionar os processos, representar, entender e simular o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica (TUCCI, 1998). A modelagem hidrológica é uma importante ferramenta no planejamento e gerenciamento de programas de recursos hídricos de bacias hidrográficas, auxiliando a previsão hidrológica.

Os processos ambientais são geralmente bastante complexos. Tal complexidade pode incluir comportamentos não lineares e componentes estocásticos sobre diferentes escalas de tempo e espaço. Mesmo existindo uma compreensão qualitativa de um dado processo, o seu entendimento quantitativo pode ser limitado. A possibilidade de expressar os processos físicos como um conjunto de equações matemáticas detalhadas pode não estar disponível, ou as expressões numéricas em questão podem ser muito complexas, exigindo simplificações para o seu uso.

Além do exposto, limitações computacionais ou a maneira pela qual as equações matemáticas são convertidas em processos numéricos discretos, levam à parametrização de processos complexos em escalas muito detalhadas que podem não ser explicitamente representadas no modelo. Em alguns casos, o conjunto de equações pode ser visto como uma coleção de hipóteses que conectam entradas e saídas do sistema. Esse conjunto de equações, quando parametrizadas, representa a melhor aproximação do modelador no explicar de determinado processo. É importante reconhecer que um modelo ambiental é, no melhor dos casos, apenas uma representação dos processos reais (MAIDMENT, 1993). Um mesmo processo pode ser representado de diferentes maneiras, sendo algumas mais apropriadas para determinados casos. Não existe um modelo único que seja o melhor, mas sim aquele que melhor descreve um fenómeno.

De um modo geral, um modelo é um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros. Os parâmetros mantêm o seu valor inalterado durante todo o processo estudado. Assim, um parâmetro é considerado como tendo o

mesmo valor para todos os intervalos de tempo, o que não significa que não varie temporalmente e espacialmente.

Os parâmetros são medidas numéricas de propriedades reais e complexas. Controlam a relação entre o que entra e o que sai do sistema. Os valores atribuídos aos parâmetros podem ser vistos como dispositivos de afinação do modelo, sendo através da manipulação destes valores que se torna possível a calibração. Tais valores são ajustados para que o modelo possa, com maior precisão e exatidão, prever a resposta física do sistema. Os parâmetros de determinado modelo podem, ou não, ter significado físico. Caso não tenham só é possível estimar o seu valor por meio de calibração.

Num modelo, distinguem-se três tipos de variáveis. A primeira, chamada variável de estado, é o foco de estudo do modelo. Esta variável relaciona-se geralmente com uma equação diferencial. O estado do sistema pode ser descrito apenas por verificação desta variável. Como exemplo, na modelação do balanço de água no solo, uma variável de estado pode ser o conteúdo de água no solo. O segundo tipo de variável é a de processo, tipicamente, os fluxos são calculados como função das variáveis de estado. Também os parâmetros podem ser utilizados no cálculo de fluxos. Novamente, a taxa de infiltração pode ser considerada uma variável de processo que altera o conteúdo de água no solo (variável de estado). O terceiro, e último tipo, referem-se ao conjunto de variáveis ditas de condição fronteira. Este conjunto de variáveis é usado no modelo, mas não é calculado por ele, tendo a sua variação de ser traduzida para que possa ser incorporada. Regra geral, este tipo de variável representa um fluxo externo ao modelo que o alimenta ou esgota. A chuva, no exemplo seguido, traduz uma condição fronteira do sistema.

A importância de se identificar cada tipo de variável presente num modelo reside no facto de esta definição influenciar a escolha da estrutura de dados para sua implementação. O valor das variáveis de estado deve ser armazenado a cada iteração caso se deseje fazer o acompanhamento do estado do sistema ao longo do intervalo de modelação. Por outro lado, os fluxos, que são calculados a cada instante, não necessitam que o seu histórico seja armazenado (MAIDMENT, 1993).

Em geral, a previsão hidrológica pode ser feita principalmente através de dois tipos de modelos: os modelos determinísticos chuva-vazão e os modelos estocásticos. Os primeiros procuram representar os processos físicos de transformação de chuva em vazão, enquanto que os modelos estocásticos baseiam-se na análise da estrutura de dependência temporal das séries de afluências.

A utilização desses modelos na previsão das variáveis hidroclimáticas no semiárido do NEB é bem sucedida, vários autores (ALVES *et al.*, (2012); ESCARIÃO *et al.*, (2012); ALEXANDRE *et al.*, (2013); CABRAL *et al.*, (2013)), aplicaram esses modelos em diversas regiões do semiárido do NEB, entretanto poucos desses modelos foram utilizados com a função de contabilidade de umidade do solo, devido principalmente à falta de parâmetros mínimos necessários para a execução e aplicação do modelo.

4.6. O Sistema HEC-HMS

O software HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) foi desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (USACE-HEC,2000), e está disponível em <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>.

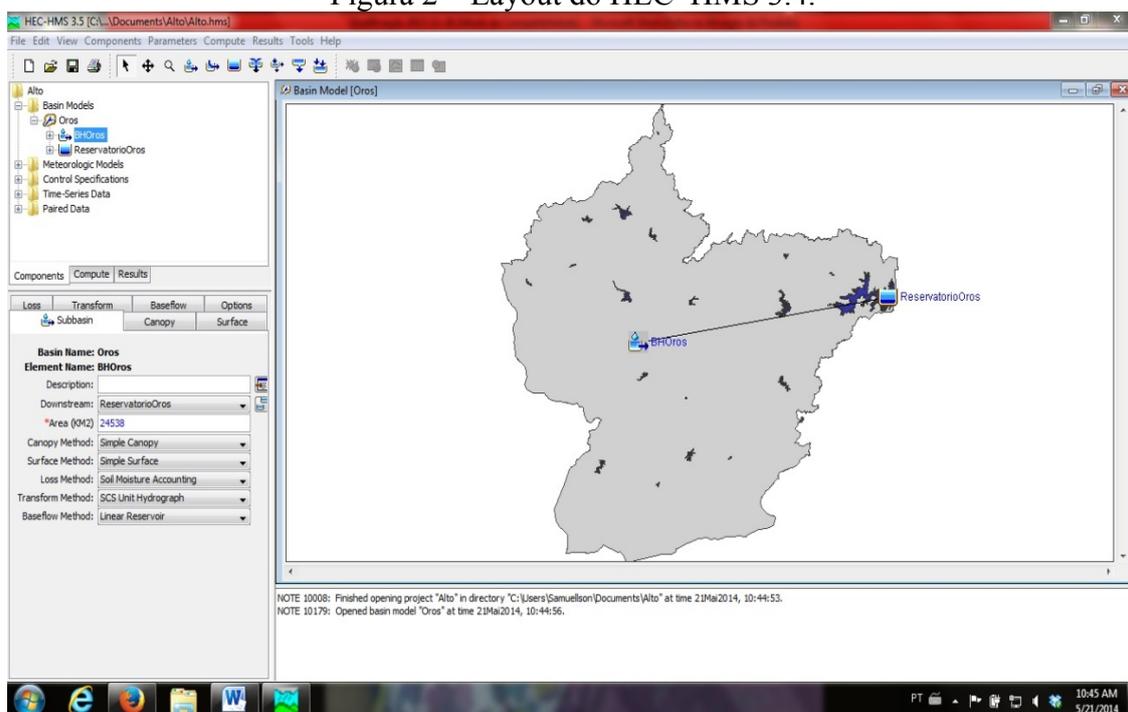
O HEC-HMS é um programa de computador, que inclui uma série de modelos, também chamado multi modelo, pois oferece várias equações para modelar os processos hidrológicos de uma bacia. Assim, como exemplo, para transformar a chuva total em chuva efetiva, o HEC-HMS nos permite utilizar, entre outros, o modelo taxa inicial e constante (Initial and Constant) e o método do SCS (Soil Conservation Service) (CAMPOS, 2009).

O HEC-HMS é um programa que pode ser adaptado a um sistema de interesse, através de mudanças nos dados em um banco de dados ou alterações nos parâmetros, nas condições de contorno e nas condições de entrada iniciais (CAMPOS, 2009).

O HEC-HMS é projetado para simular o processo de precipitação-vazão de sistemas de bacias hidrográficas dendríticas. Foi projetado para ser aplicável a uma ampla variedade de áreas geográficas para resolver uma grande variedade de possíveis problemas. Isto inclui grandes rios de bacias hidrográficas para fornecimento de água e estudos de inundação, até do escoamento de pequenas bacias hidrográficas urbanas ou naturais. Os hidrogramas produzidos pelo programa são utilizados diretamente ou em conjunto com outros softwares para estudos de disponibilidade de água, drenagem urbana, previsão de vazão, impacto do desenvolvimento da urbanização, dimensionamento de vertedouros de reservatórios, redução de danos de inundação, regime de planícies de inundação e sistemas de operação (USACE-HEC, 2010).

O HEC-HMS utiliza modelos separados para representar cada componente do processo de escoamento que são: Modelos que calculam o volume do escoamento; Modelos de escoamento direto (superficial e subsuperficial); Modelos de escoamento de base e modelos de fluxo no canal (USACE-HEC, 2000). A Figura 2 apresenta o layout do programa HEC-HMS 3.4.

Figura 2 – Layout do HEC-HMS 3.4.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para Tavares e Castro (2005) o processamento de modelagem do HEC-HMS requer inicialmente a entrada de dados da bacia hidrográfica e dos dados meteorológicos. Para a bacia são escolhidos os métodos para o cálculo das perdas, de transformação do escoamento superficial, de composição do escoamento de base, de propagação em rios; considerando parâmetros relacionados a tais métodos, como a área das sub-bacias, tempo de concentração, fatores de perda por infiltração, evapotranspiração, e perdas em sumidouros e interceptação. Já para o modelo hidrológico é escolhido qual o formato de entrada da precipitação a ser utilizada na simulação.

4.7. O SMA do HEC-HMS

O Soil Moisture Accounting (SMA) foi desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (USACEHEC, 2000).

Segundo Bennett (2000), o SMA é um método de taxa de perda associada com uma sub-bacia. A precipitação é calculada separadamente e, em seguida, aplicada à sub-bacia, como uma entrada para o algoritmo SMA. O método de perda do SMA então simula o movimento de água ao longo do tempo através dos vários componentes de armazenamento que representam os aspectos físicos da bacia.

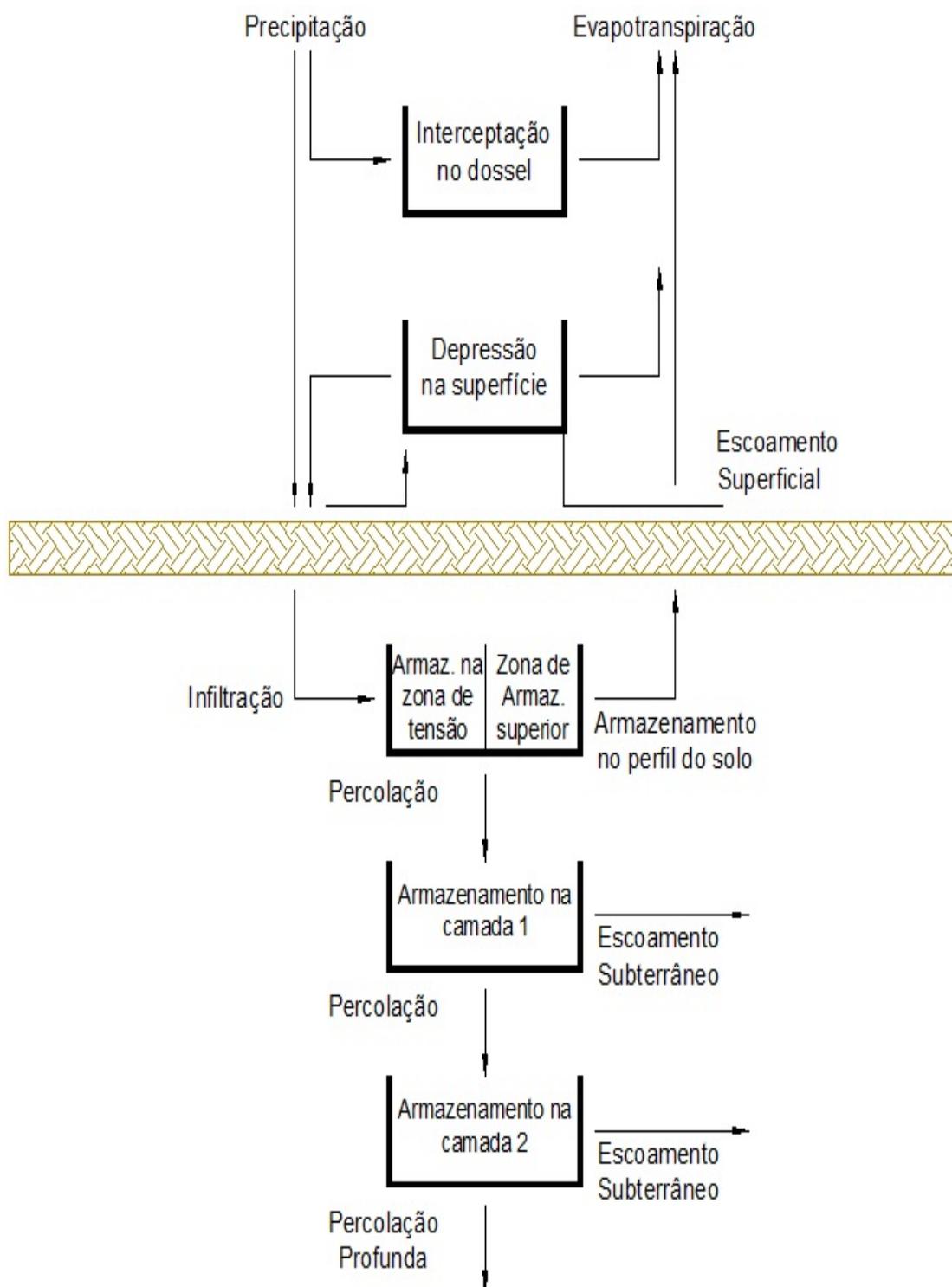
No modelo conceitual do módulo de contabilidade de umidade do solo, a água é armazenada no dossel, em depressões superficiais, no perfil do solo, e em duas camadas subterrâneas. No dossel o armazenamento é considerado uma perda inicial de que devem ser satisfeitas antes de qualquer precipitação atinge a superfície.

A infiltração é deduzida a partir da precipitação que excede a capacidade de armazenamento da copa. A precipitação que não pode ser infiltrada é alocada para armazenamento depressão. O transbordamento do armazenamento na depressão torna-se o escoamento superficial. No dossel a interceptação é calculada da mesma forma para as partes permeável e impermeável da sub-bacia. As não perdas de infiltração ou depressão de armazenamento são deduzidas como precipitação para superfícies impermeável.

Todas as superfícies impermeáveis são assumidas como "diretamente ligado", ou seja, o escoamento de superfícies impermeáveis não tem segunda chance para se infiltrar. A água é removida do armazenamento dossel por evaporação. A água é removida a partir de armazenamento depressão por evaporação e infiltração. A taxa máxima à qual a água pode ser absorvida pelo solo num instante particular é denominada a taxa de infiltração potencial. A taxa de infiltração potencial varia com o teor de água do solo.

A Figura 3 mostra o diagrama esquemático dos processos do módulo SMA no HEC-HMS, usado nesse estudo.

Figura 3 - Diagrama esquemático do módulo SMA no HEC-HMS.



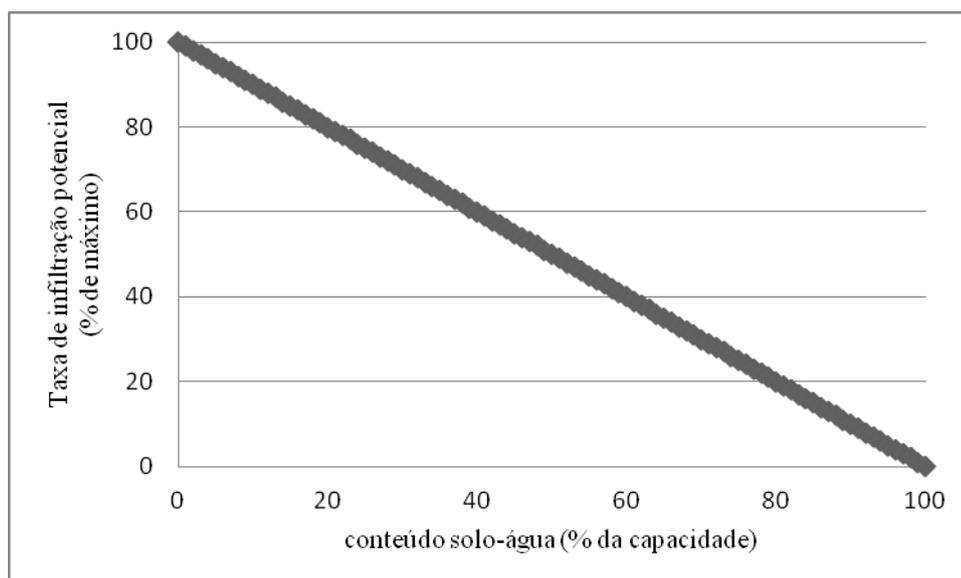
Fonte: Elaborada pelo autor.

O módulo de contabilidade de umidade do solo assume que a taxa de infiltração potencial diminui de forma linear com o aumento de conteúdo de água, como mostrado na Figura 4. A taxa de infiltração real é menor a taxa de infiltração do potencial e da taxa à qual a precipitação atinge a superfície do solo.

O armazenamento umidade do Solo é dividido em duas zonas: uma zona superior e uma zona de tensão. A água é removida da zona superior por evapotranspiração (ET) e por percolação (drenagem por gravidade) para a camada superior de águas subterrâneas. A água é removida da zona de tensão de ET, mas não pela percolação. ET é extraído a partir da zona de tensão apenas quando o armazenamento superior de zona é esgotado.

Segundo Ponce (1989) os modelos hidrológicos contínuos ao contrário dos modelos de eventos, representam o equilíbrio da umidade do solo em uma bacia hidrográfica e são adequados para simulação diária, mensal e sazonal.

Figura 4 - Relação para a taxa de infiltração potencial no módulo SMA.



Fonte: Elaborada pelo autor.

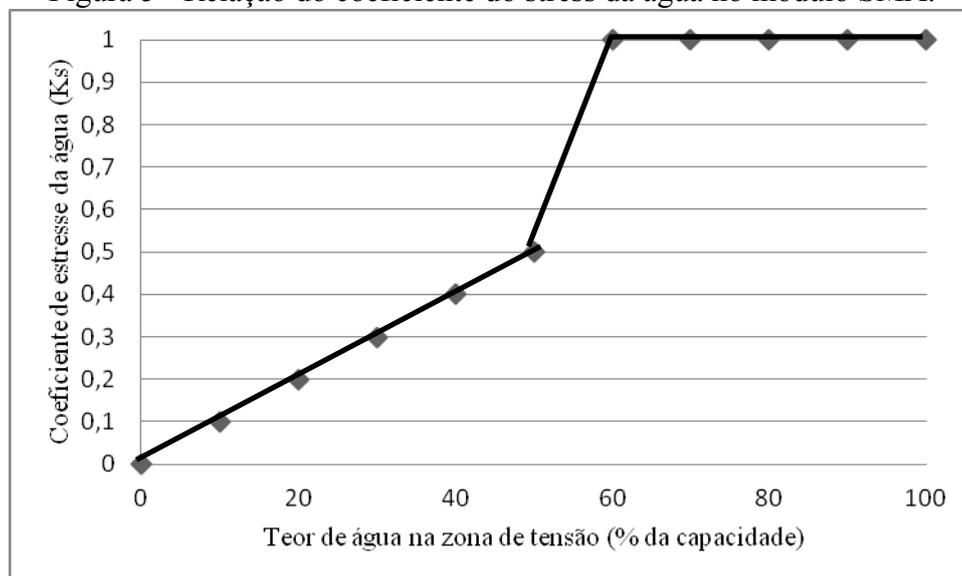
A taxa de percolação entre duas camadas adjacentes depende de uma taxa máxima especificada pelo utilizador e os graus de saturação das duas camadas. As duas camadas subterrâneas são opcionais. As camadas de água superior podem ser usadas para contabilizar os processos de fluxo de subsuperfície rasa como a drenagem de encostas saturadas. Quanto menor a camada de água subterrânea pode representar um

aquífero mais extenso que é hidráulicamente conectado ao fluxo. As saídas laterais das camadas subterrâneas podem ser encaminhadas para o fluxo como escoamento de base.

A taxa de evapotranspiração depende de condições climáticas, das condições de cobertura vegetal, e das quantidades de água armazenada no dossel, nas depressões da superfície e no solo. A evapotranspiração potencial é definida como a evapotranspiração que poderia ocorrer com o tempo especificado e condições de cobertura e umidade do solo ilimitado. O usuário pode utilizar entrada de valores média mensal da ET potencial, ou o programa pode calcular ET potenciais de entrada de radiação e dados de temperatura pelo método de Priestly-Taylor.

O HEC-HMS assume valor zero de ET durante os períodos de chuvas. Em todas as outras vezes, a evaporação, a demanda é atendida primeiro do armazenamento dossel, em seguida, a partir de armazenamento de superfície, e, finalmente, da zona superior armazenamento do solo. A taxa de evapotranspiração do solo é o produto do ET potencial e taxa de água e um coeficiente de estresse. O coeficiente de água-stress está relacionado com o teor de água de a zona de tensão, expressa como uma percentagem da sua capacidade, como mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Relação do coeficiente do stress da água no módulo SMA.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Quando a água o conteúdo da zona de tensão superior a 60% da capacidade, ET não é limitado pela disponibilidade de água. HEC-HMS assume zero de ET durante os períodos de chuvas.

Doze parâmetros e cinco condições iniciais são necessários para a caracterização do dossel, da superfície, do solo e unidades de armazenamento de água subterrânea.

Os doze parâmetros são os seguintes:

1. Armazenamento da copa (mm);
2. Armazenamento de superfície (mm);
3. Taxa máxima de infiltração (mm/h);
4. Área de superfície impermeável (%);
5. Armazenamento total do solo (mm);
6. Armazenamento de tensão do solo (mm);
7. Armazenamento subterrâneo na camada 1 (mm);
8. Taxa máxima de percolação na camada 1 subterrânea (mm/h);
9. Coeficiente de armazenamento subterrâneo na camada 1;
10. Armazenamento subterrâneo na camada 2 (mm);
11. Taxa máxima de percolação na camada 2 subterrânea (mm/h)
12. Coeficiente de armazenamento subterrâneo na camada 2;

As cinco condições iniciais são:

1. Armazenamento do dossel (%)
2. Armazenamento superfície (%)
3. Armazenamento do solo (%)
4. Armazenamento subterrâneo da camada 1 (%)
5. Armazenamento subterrâneo da camada 2 (%)

4.8. Histórico de uso do modelo SMA do HEC-HMS

O SMA tem sido utilizado com sucesso por vários autores em várias partes do mundo (GYAWALI e WATKINS (2013), KOCH e BENE (2013), GOLIAN *et al.*, (2012), BASHAR (2012), CHU e STEINMAN (2009), GARCIA *et al.*, (2008), BENNETT e PETERS (2000)).

Este modelo de escoamento foi aplicado com sucesso em uma escala temporal de longo prazo, por Fleming (2002) e em seguida por Fleming e Neary (2004).

Fleming e Neary (2004) utilizaram a abordagem de parametrização sazonal e constataram melhora no desempenho do modelo. Estes resultados também mostram que a parametrização de um conjunto de parâmetros em função das condições fisiográficas e hidrológicas produziram resultados de simulação que são mais precisos do que um único conjunto de parâmetros.

Garcia *et al.* (2008), avaliou os recursos hídricos superficiais em 12 bacias hidrográficas localizadas no norte da Espanha, utilizando várias técnicas para calibrar e validar o SMA do HEC-HMS, apresentando análises do comportamento hidrológico das bacias em períodos de estiagem.

Candela *et al.* (2012), aplicou o SMA no Nordeste da Espanha tendo em vista os impactos dos recursos hídricos vista as mudanças climáticas. Os resultados mais relevantes mostram alterações substanciais no regime de vazões nas bacias estudadas, afetando a população.

Engelhardt *et al.*, (2012), utilizou o SMA do HEC-HMS em uma região árida para analisar a mudança climática do holoceno, utilizando conjunto de dados de precipitação, temperatura, vento, tipos de solos e dados geomorfológicos, com o objetivo de avaliar as mudanças da precipitação avaliando as mudanças dos últimos 10 mil anos.

Entretanto no Brasil e principalmente no semiárido nordestino o modelo SMA tem sido pouco explorado com poucas aplicações nessa região.

No NEB o SMA foi aplicado por Santos (2013) em uma bacia na Zona da Mata de Pernambuco, para alguns eventos de precipitação com o intuito de verificar as perdas e sua influência na modelagem hidráulica da bacia do Rio Mundaú.

Cabral *et al.* (2014), aplicaram o modelo SMA em uma sub-bacia da bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe, no semiárido do NEB, na sub-bacia do Arneiroz, local da barragem Arneiroz no Estado do Ceará. A bacia hidrográfica, situada no sertão central do Estado, controla uma área de 5.522 km². Neste estudo foram utilizados dados fisiográficos da bacia para as estimativas iniciais dos parâmetros do SMA. Em seguida, calibração paramétrica multiobjetivo dos parâmetros do SMA. Os autores encontraram boas correlações de *Nash-Sutcliffe* tanto na fase de calibração quanto na fase de validação da simulação das vazões para todo o período de estudo.

4.9. Acoplamento entre modelos atmosféricos e hidrológicos

Tradicionalmente, as fases terrestre e atmosférica do ciclo hidrológico são representadas e simuladas por modelos independentes. Nos últimos anos, estas simulações têm sido acopladas através da concatenação dos modelos hidrológico e atmosférico. Este acoplamento pode ser feito de dois modos, unidirecionalmente ou bidirecionalmente (BRAGA et al., 2005).

O acoplamento unidirecional de modelos hidrológicos chuva-vazão e modelos atmosféricos é uma técnica adotada para previsão de eventos hidrológicos, que aumenta a antecedência da previsão do escoamento na bacia para além do seu tempo de concentração.

No modo bidirecional, existe uma troca de informações entre os modelos, sendo necessários ajustes de escala (*downscaling* dos dados meteorológicos e *upscaling* dos dados hidrológicos).

Este tipo de acoplamento apresenta algumas desvantagens operacionais, como o alto custo computacional e a necessidade de transformação de unidades e coordenadas (MOLDERS e RUHAAK, 2002).

Cada vez mais vêm sendo realizados avanços significativos no desenvolvimento de modelos, tornando os modelos climáticos regionais interessantes para serem aplicados na previsão hidrológica. A simulação da vazão é feita tradicionalmente com modelos que simulam a parte terrestre do ciclo hidrológico, ficando a simulação dos processos atmosféricos, sendo analisada separadamente, nos modelos atmosféricos. No entanto, no sentido de se ter uma ferramenta completa, e ainda, fazer previsões de vazões com dados simultâneos surge então o acoplamento entre modelos atmosféricos e hidrológicos.

Os modelos hidrológicos atualmente utilizados realizam previsões com base nas vazões, introduzindo fundamentalmente componentes estatísticos sazonais e temporais de curto prazo na previsão, baseando-se na quantidade de água que já está nos rios. A previsão da vazão com base na precipitação observada permite estender o horizonte da previsão, ou melhorar a qualidade da previsão dentro de um determinado horizonte, considerando que existe um tempo de deslocamento da água entre a ocorrência da precipitação e a vazão na seção de interesse. Neste caso, normalmente, o horizonte máximo de previsão está limitado pelo tempo de concentração da bacia.

A inclusão de previsões de precipitação num modelo de previsão pode permitir estender o horizonte da previsão para além do tempo de concentração, e melhorar a qualidade da previsão dentro de horizontes determinados. Portanto, uma forma de aumentar a capacidade de previsão é o uso conjunto de modelos climáticos com modelos hidrológicos. Os primeiros prevendo a precipitação e variáveis climáticas futuras e o segundo reproduzindo as vazões nos rios.

A importância desta incorporação para o gerenciamento de recursos hídricos reside principalmente no fato de que os instrumentos de gestão, previstos em lei, exigem informações mais precisas para uma correta alocação de água, constituindo uma outorga dinâmica. Desta forma, podem-se minimizar conflitos pelo uso da água em momentos de escassez.

Desenvolvimentos recentes no acoplamento entre modelos atmosféricos e hidrológicos demonstram que, este tipo de aproximação, apresenta um grande potencial para previsão de enchentes e avaliação de impactos (BENOIT *et al.*, 2003). Essa aproximação torna-se especialmente importante nos casos em que não se pode depender apenas de dados provenientes de observação na superfície. Isso ocorre, principalmente, em regiões com poucas estações de observação, onde a densidade de dados é pouco representativa, e em regiões montanhosas, que apresentam uma rápida resposta aos eventos de precipitação, necessitando que os dados meteorológicos estejam disponíveis antes da ocorrência destes eventos.

Os sistemas de modelos acoplados, além das aplicações voltadas para o gerenciamento de recursos hídricos, podem ser utilizados na verificação e validação de previsões numéricas de precipitação (BENOIT e PELLERIN, 2000; JASPER e KAUFMANN, 2003).

4.10. Modelo de operação de reservatórios

A definição de como operar um sistema com vários reservatórios é uma tarefa complexa, pois envolve diversos aspectos técnicos, econômicos, sociais e políticos (Loucks e Van Beek, 2005; Oliveira e Loucks, 1997). Esta complexidade se traduz (1) nos mais diversos objetivos a serem atingidos com vários usos da água, muitas vezes conflitantes, como por exemplo, abastecimento humano, irrigação, dessedentação de animais, geração de energia, manutenção de espécies aquáticas, manutenção de níveis

mínimos de qualidade de água, navegação, e controle de cheias; (2) nos diferentes graus de prioridade de uso dados por diversos segmentos da sociedade; (3) nas diversas restrições impostas à operação, oriundas de limitações físicas do sistema (capacidade de uma adutora, volume útil de cada reservatório ou capacidade bombeamento), ou determinadas por condicionantes legais ou contratuais (manutenção de vazão mínima a jusante para atender uma comunidade específica, indústria, ou até mesmo outro país); bem como (4) nos riscos envolvidos no processo de alocação da água tendo em vista a natureza estocástica da oferta hídrica (WURBS, 1996).

A definição da operação de um sistema de reservatórios consiste em especificar os volumes a serem liberados de cada reservatório ao longo do tempo. Esta definição é geralmente feita de modo a maximizar ou minimizar uma ou mais função objetivo, que expressa matematicamente os objetivos que se tem em operar o sistema. A definição destes volumes depende sobremaneira do volume de água armazenado em cada reservatório, das demandas pontuais do sistema, que podem ser atendidas por um ou mais reservatórios, das restrições do sistema, dos custos envolvidos na operação, e do volume de água afluyente a cada reservatório no futuro, sendo este último a grande fonte de risco no processo de operação de sistemas hídricos.

À medida que a complexidade do sistema aumenta, caracterizada pelo número de reservatórios, pelo número de pontos de demanda de água, e respectivas características, como por exemplo, a sazonalidade (demanda de agricultura que varia no tempo) e localização (suprimento de mais de um reservatório), pelas diversas restrições do sistema, pelas possibilidades de ser realizar transferências de água de uma bacia para outra (via bombeamento, por exemplo), fica praticamente impossível para o ser humano identificar a melhor estratégia de operação, ou mesmo para simular o comportamento do sistema quando operado com uma estratégia pré-definida.

Além disso, a usual complexidade destes sistemas dificulta bastante a percepção de funcionamento do mesmo pelos diversos grupos que têm interesse em participar no processo de alocação de água de uma bacia hidrográfica, como por exemplo, no caso de comitês de bacias. O processo de negociação de conflitos em recursos hídricos exige, de certa forma, que os envolvidos no processo de discussão tenham uma visão compartilhada de como o sistema hídrico funcionaria em diferentes situações. Só para citar como exemplo, é usual procurar entender o que aconteceria com o sistema (1) se o mesmo fosse operado sob diferentes cenários de oferta hídrica, (2) se as regras de operação dos reservatórios fossem alteradas, ou (3) se fossem mudadas as prioridades

de atendimento das demandas. Este tipo de percepção em relação ao funcionamento do sistema, adquirido por exercícios de simulação como os citados acima, são importantes para que se possa alcançar uma gestão integrada e participativa dos recursos hídricos. Acredita-se que o uso de ferramentas de base matemática, capazes de simular os aspectos mais importantes do sistema, possa ser útil na construção deste processo de decisão.

Os reservatórios operados para atender demandas de água para abastecimento, irrigação e geração de energia são, normalmente, mantidos em níveis tão altos como possível para garantir uma reserva de água que será utilizada durante os períodos críticos de estiagem. Por sua vez, reservatórios operados com o objetivo de reduzir inundações à jusante da barragem são mantidos em níveis mínimos para que as cheias possam ser absorvidas e as vazões máximas reduzidas. Quando um mesmo reservatório é operado para atender os dois tipos de objetivos surgem conflitos.

A previsão de vazão afluente a reservatórios pode ser útil para reduzir esses conflitos. Porém, os benefícios da previsão dependem da eficiência dos modelos de previsão e da forma como a informação da previsão é incorporada na tomada de decisão sobre a operação.

Além disso, sendo a água um dos mais importantes recursos naturais, os operadores são pressionados a operar seus sistemas de forma cada vez mais eficiente (BESSLER *et al.*, 2003). Existem diferentes regras de operação de reservatórios, mas todas usam como variável de decisão o volume do reservatório ou a vazão defluente que se pretende atingir em determinados períodos de tempo como o diário, semanal ou mensal (LOUCKS *et al.*, 1981). Essas regras visam atender as restrições de vazão defluente e demandas do sistema para otimizar determinados objetivos.

Na literatura, encontram-se diversos trabalhos que já foram desenvolvidos tratando da operação de reservatórios, dentre eles o de Labadie (2004) apresenta uma revisão sobre modelos para operação ótima de sistemas de reservatórios, assim como a inclusão dos mesmos em sistemas de suporte a decisão (SSD).

No Brasil, previsões meteorológicas de tempo (escala de dias) e sazonais (acima da escala mensal) têm sido utilizadas como dados de entrada na modelagem de sistemas de operação de reservatórios (GALVÃO, 1999; COLLISCHONN, 2001; TUCCI *et al.* 2003; GALVÃO *et al.*; 2005, ALVES, 2007).

Lima e Lanna (2005) e Wurbs (2005) tratam o estado da arte sobre modelos para operação dos sistemas de reservatórios, com foco nos modelos baseados nas técnicas de simulação e otimização, e de modelos conjuntos de simulação-otimização.

Celeste (2006) investigou o planejamento e operação de reservatórios, individualmente, utilizando técnicas de otimização e simulação com o objetivo de verificar o uso potencial dos recursos hídricos para irrigação, e com essa prática calcular alguns indicadores que contemplem a sustentabilidade desses sistemas.

Santos (2007), em seu trabalho, desenvolveu um modelo de otimização para o estudo da operação integrada dos sistemas de reservatórios e perímetros irrigados, além de outros usos da água, objetivando a alocação ótima dos recursos hídricos entre os múltiplos usos e o estabelecimento de políticas operacionais via uma análise multiobjetiva.

Aragão (2008) procurou dar uma visão geral do projeto de transposição das águas do rio São Francisco, utilizando para análise do sistema estudado simulações com o modelo matemático AcquaNet, que é baseado em redes de fluxo.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Estratégia metodológica

Os dados e a metodologia utilizados nesse trabalho foram subdivididos e apresentados da seguinte forma: primeiro uma caracterização fisiográfica e hidroclimáticas da área de estudo, em seguida obtenção dos dados hidrometeorológicos necessários para o uso dos modelos e sua previsão.

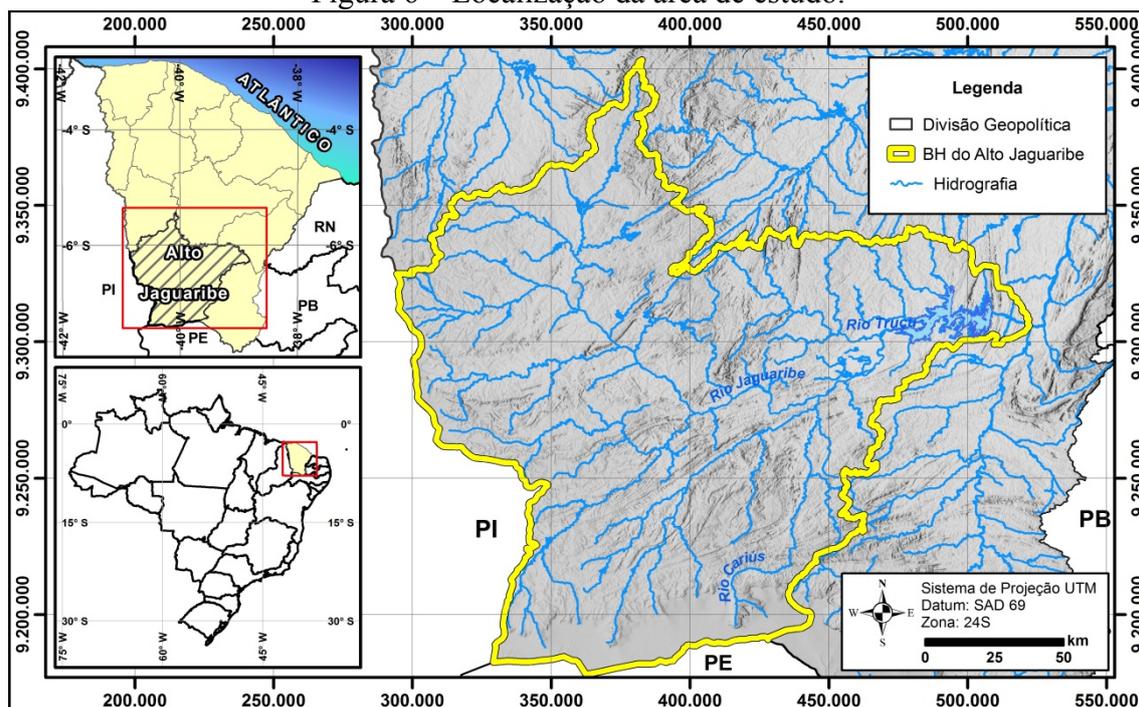
Em segundo a descrição da metodologia da modelagem atmosférica na área de estudo, com ênfase nas condições iniciais dos modelos e sua discretização espacial e o método de correção PDF aplicado nas simulações dos modelos dinâmicos de precipitação. A seguir é explicada a metodologia do Intervalo de Tempo de Máxima Previsibilidade (ITEMP), com sua discretização e princípios, assim como a etapa da modelagem hidrológica utilizando o SMA, com ênfase na estimativa dos parâmetros do modelo e das técnicas de calibração e validação do mesmo. O uso do modelo de operação de reservatório (SIMRES) é explicado em seguida, juntamente com as estimativas dos parâmetros do reservatório utilizando o Diagrama Triangular de Regulação (DTR).

Por fim são explicadas as métricas escolhidas para as análises da previsão dos modelos dinâmicos de precipitação, do modelo chuva-vazão e do modelo de operação do reservatório.

5.2. Caracterização da área de estudo

A sub-bacia do Alto Jaguaribe (Figura 6) localiza-se na porção sudoeste do Estado do Ceará. Das cinco sub-bacias que compõem a bacia do rio Jaguaribe (Alto, Médio e Baixo Jaguaribe, Banabuiú e Salgado) é a que possui maior região hidrográfica, sendo, também, a maior do Estado. Essa sub-bacia inicia-se nas nascentes do rio Jaguaribe e percorre uma extensão de aproximadamente 325 km até alcançar o açude Orós, principal reservatório desta sub-bacia. Drena uma área de 24.538 km², o equivalente a 16% do território cearense.

Figura 6 – Localização da área de estudo.

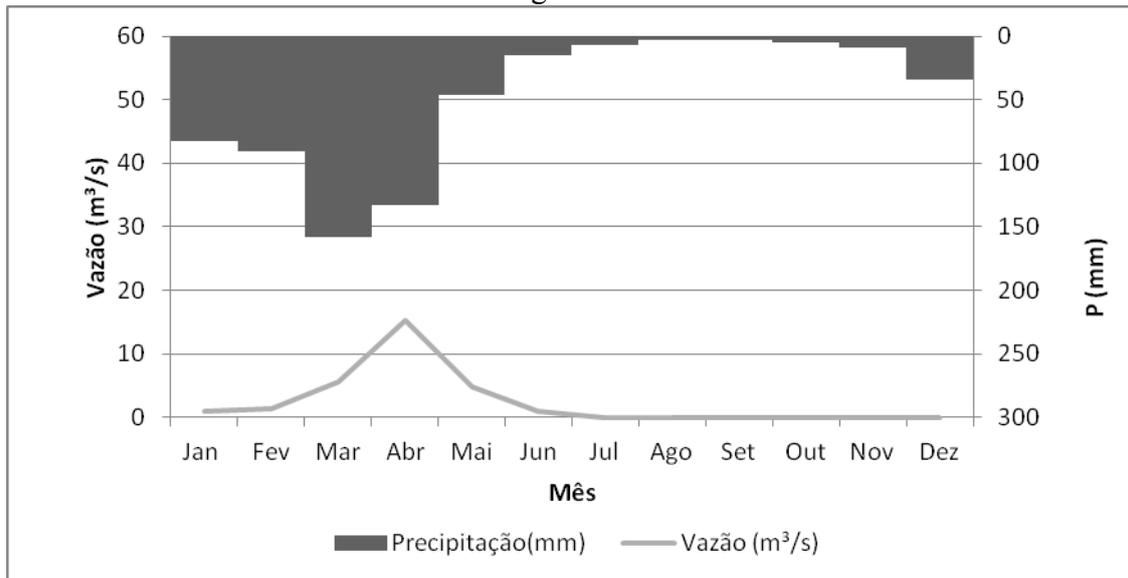


Fonte: Elaborada pelo autor.

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. As altitudes nesta região variam entre 250m e 400m em média e o clima é semiárido quente, com precipitações médias anuais entre 500 mm e 700 mm, de janeiro a maio, e com acentuada irregularidade no tempo e no espaço, vazões médias anuais de $24,45\text{m}^3/\text{s}$ (Figura 7) e temperatura média anual em torno de 28°C .

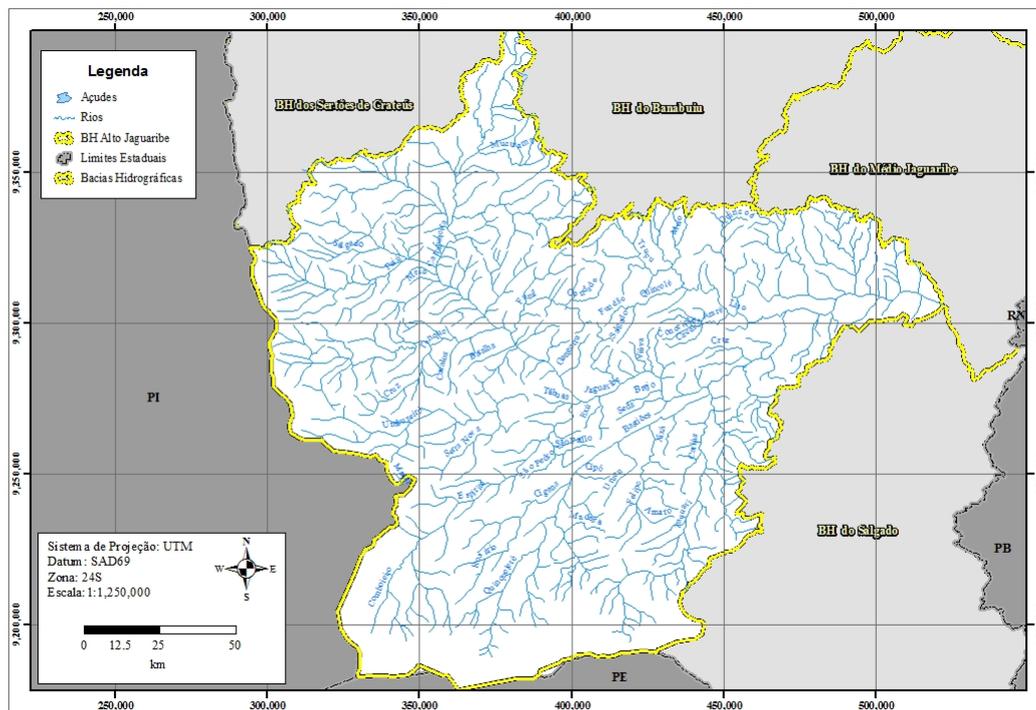
A Figura 8 mostra a hidrografia da bacia do Alto Jaguaribe, com destaque para o reservatório do Orós. O sistema hídrico da bacia do Alto Jaguaribe apresenta a capacidade de acumulação de águas superficiais de 2.792.563.000 bilhões de m^3 . O maior reservatório em acumulação de água desta bacia é o Açude Orós localizado na cidade do mesmo nome com uma capacidade total de 1.940.000.000 milhões de m^3 . A Figura 9 mostra a curva cota-área-volume (CAV) do reservatório Orós.

Figura 7 – Sazonalidade da precipitação e da vazão na bacia hidrográfica do alto Jaguaribe.



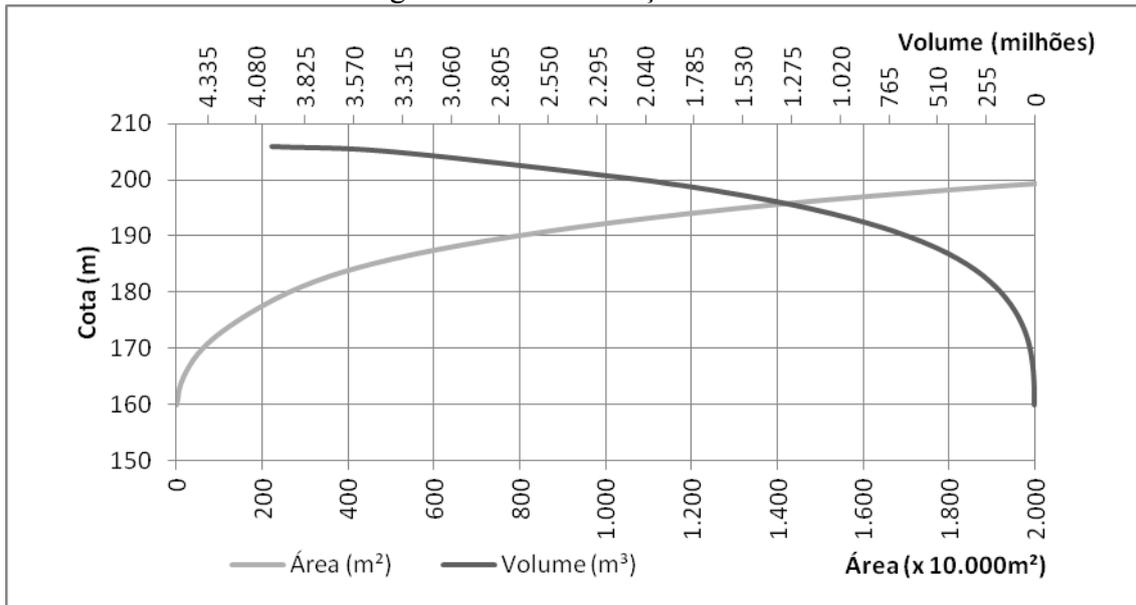
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 8 – Hidrografia da bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe.



Fonte: Elaborada pelo autor.

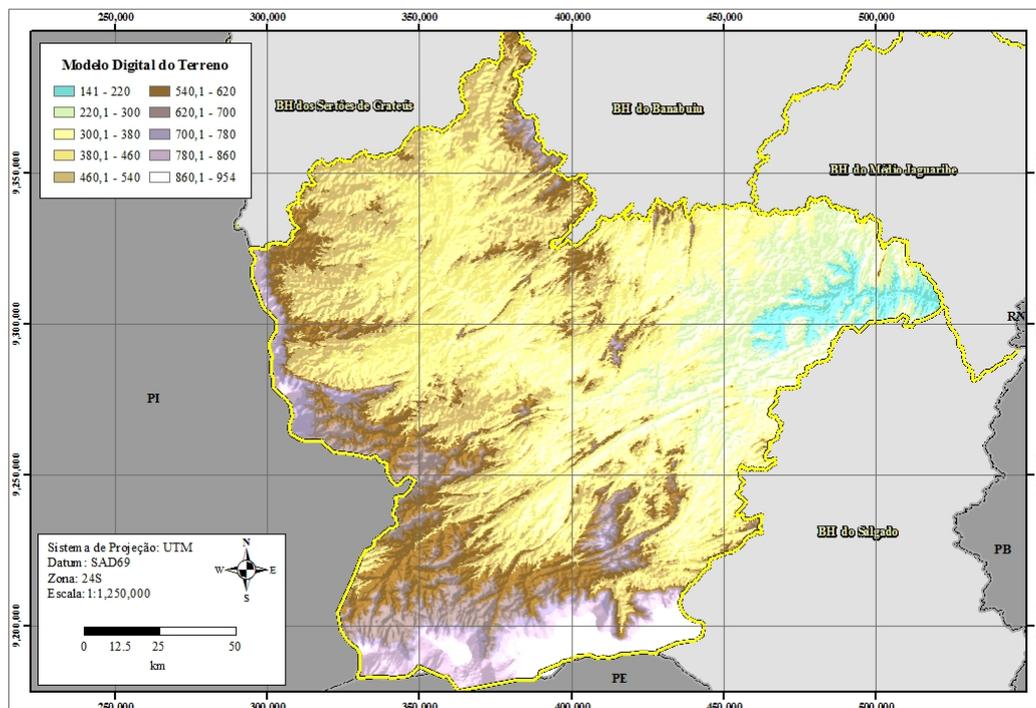
Figura 9 – CAV do Açude Orós.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 10 apresenta o Modelo Digital do Terreno (MDT) da bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe. A variação altimétrica nessa bacia varia na ordem de 141m a 954m.

Figura 10 – MDT da bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Segundo Alves (2008), são notáveis, baixas altitudes no setor sudeste da mesma, cotas inferiores a 250 m, onde se localiza 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.

5.3. Dados pluviométricos

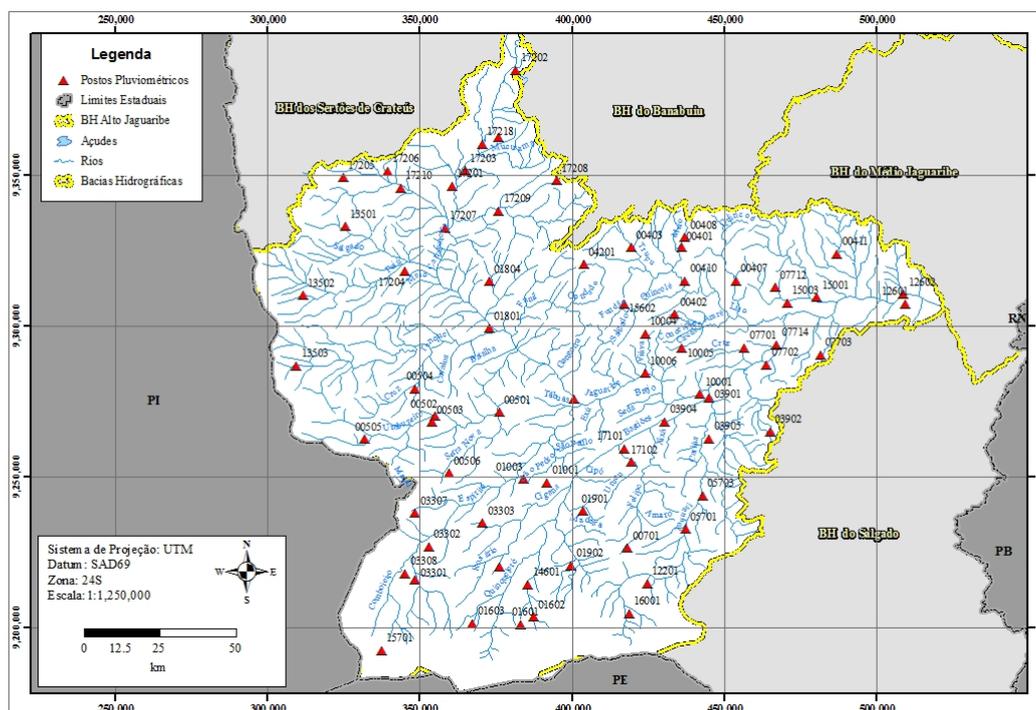
Para esses estudo foi utilizado uma serie de precipitação em escala mensal, referente ao periodo de 1979 a 2009. Os dados pluviométricos utilizados nesse trabalho são disponibilizados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), em <http://www.funceme.br>. Nesse estudo foram utilizadas sessenta e cinco estações pluviométricas inseridas na área da bacia do Alto Jaguaribe, conforme a Figura 11.

Os dados englobam o período de janeiro de 1979 a dezembro de 2009, totalizando 30 anos de dados, caracterizando claramente a climatologia da bacia hidrográfica no período úmido. Para o cálculo da precipitação média na bacia foi utilizado o método do polígono de *Thiessen*. Este método atribui pesos relativos para cada posto, determinados pelas suas respectivas áreas de influência, onde as fronteiras dos polígonos são formadas pelas mediatrizes das linhas que unem dois postos adjacentes. Se há j postos, a área dentro da bacia designada para cada um é A_j , e P_j é a precipitação registrada no j -ésimo posto, conforme a Equação (1).

$$\bar{P} = \frac{\sum P_i \cdot A_i}{A} \quad (1)$$

onde: P_i representa as precipitações nos postos i (mm), A_i corresponde às áreas de influência dos postos e A área total da bacia.

Figura 11 – Distribuição espacial dos postos pluviométricos na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.4. Dados fluviométricos

Foi utilizada uma estação fluviométrica da Agência Nacional de Águas (ANA) disponível em www.hidroweb.ana.gov.br, inseridas na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe. A Figura 12 apresenta a distribuição espacial das estações fluviométricas ao longo da bacia. A escolha do posto, entretanto foi devido à boa consistência dos dados fluviométricos e por apresentar poucas falhas, sendo assim optou-se por utilizar dados do posto do Iguatu (Tabela 2).

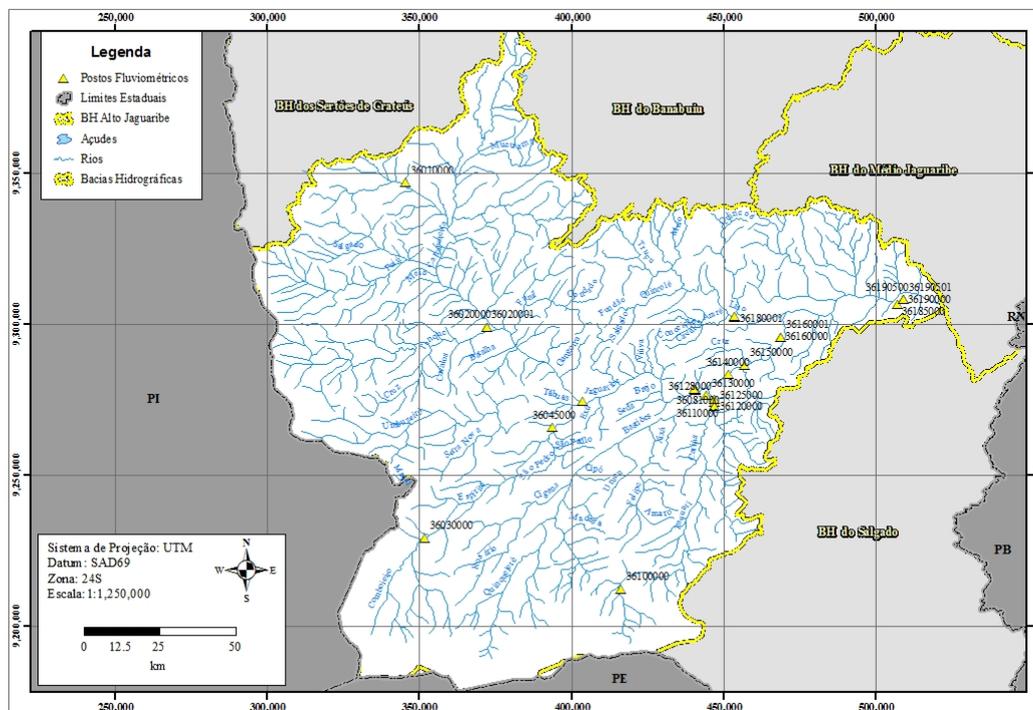
Tabela 2 – Características do Posto Fluviométrico do Iguatu.

Código	Nome	Município	Responsável	Operadora	Latitude	Longitude
36160000	Iguatu	Iguatu	ANA	CPRM	-6.22	-39.17

Fonte: Elaborada pelo autor.

A série de vazão foi utilizada para a calibração dos parâmetros do SMA para a sub-bacias 5 da área de estudo.

Figura 12 – Distribuição espacial dos postos fluviométricos na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.5. Dados de evapotranspiração

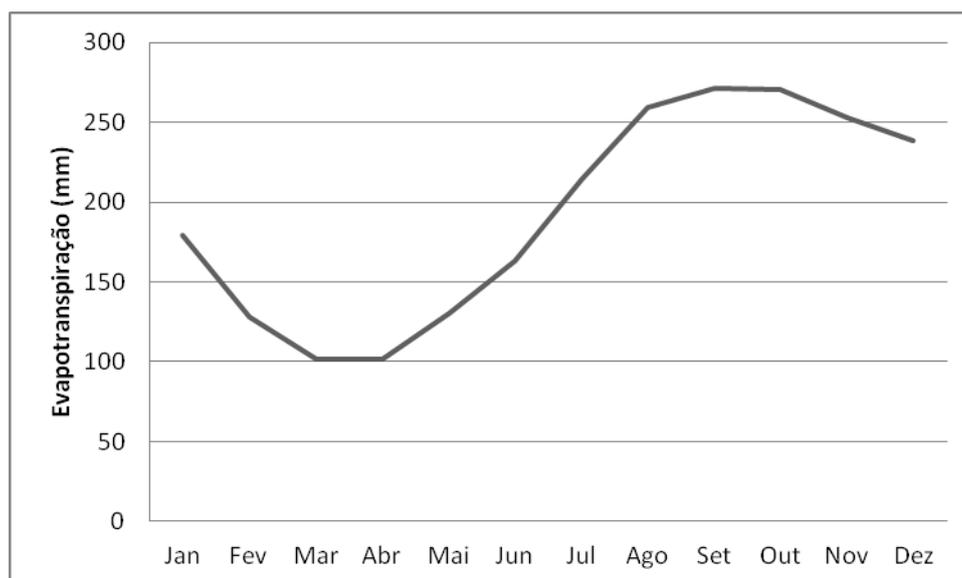
O método de cálculo da evapotranspiração potencial utilizado foi o de Hargreaves (1974), justificada pela larga utilização em projetos de irrigação no Nordeste Brasileiro. Esse método é baseado na utilização de dados de temperatura média, mínima e máxima mensal e da radiação extraterrestre R_a . A Tabela 3 e a Figura 13 apresenta a variação anual da evapotranspiração potencial da bacia e utilizada na modelagem do SMA.

Tabela 3 - Evapotranspiração potencial da bacia do Alto Jaguaribe.

Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
179,4	127,7	101,2	101,6	130,6	163,1	214,6	259,3	271,0	270,5	252,5	238,8

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 13 – Distribuição temporal da ETP na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.6 Data Storage System (DSS)

Foi usado o *Data Storage System (DSS)* do HEC-HMS disponível em <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-dss/> para inserir os dados de entradas de precipitações observadas e modeladas, e entrada dos dados de vazões do posto fluviométrico, e saídas dos valores de vazões simuladas pelo SMA do HEC-HMS.

O sistema de armazenamento de dados (DSS) proporciona um meio para armazenar e manter os dados em um local centralizado, proporcionando o armazenamento da entrada e saída dos dados no programa, a transferência de dados entre programas de aplicação do HEC e a exibição dos dados em gráficos ou tabelas.

O DSS tem capacidades para armazenar dados de forma conveniente para inventário, recuperação, arquivamento e aplicação do modelo. O DSS usa um bloco de dados sequenciais como a unidade básica de armazenamento. Este conceito resulta num acesso mais eficiente de séries de tempo, ou outros dados relacionados com exclusividade.

Cada bloco contém uma série de valores de uma única variável ao longo de um período de tempo adequado para a maioria das aplicações.

O conceito básico subjacente à DSS é a organização dos dados em registros de aplicações contínuas com elementos relacionados, em oposição aos itens individuais de dados endereçáveis. Esta abordagem é mais eficiente para aplicações em recursos

hídricos, do que a de um sistema de base de dados convencional; porque evita o processamento e armazenamento sobrecarga necessária à montagem de um registro equivalente de um sistema convencional.

Esta forma de armazenamento dos dados facilitou de forma ágil e eficiente a entrada dos dados no modelo. E toda modificação realizada nos dados e automaticamente atualizada nas entradas do modelo, dispensando a entrada manual.

5.7. Modelagem atmosférica

O *RAMS* foi inicializado em modo de simulação com os dados do *ECHAM4.5*, sendo esta feita com um esquema de relaxamento Newtoniano (*nudging*), através de um termo adicionado as equações básicas, que faz com que o valor de cada variável nos diversos pontos de grade tenda àquele contido na informação de grande escala. A assimilação pode ser feita pelas fronteiras laterais do modelo (*nudging lateral*), ou em todo o domínio do modelo (*nudging central*). O contorno topográfico usado pelo *RAMS* tem uma resolução mais refinada, quando comparada com outros modelos regionais, como o MRE/97, por exemplo.

Foi realizada ininterruptamente a rodada de simulação da bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe de 1979 a 2009, para 10 membros do *ECHAM4.5*, as forçantes de grande escala utilizadas nas simulações do *RAMS* foram obtidas do conjunto das 10 integrações do *ECHAM4.5* para os meses de janeiro a dezembro de 1979 a 2009.

Embora geralmente não disponíveis, a umidade do solo e dados de temperatura, bem como outras propriedades do solo e as características da vegetação, são também necessária para a resolução espacial simulações do modelo. Nesta simulação optou por utilizar à umidade do solo inicial igual a zero. Os resultados desta simulação foram muito sensíveis à especificação das condições iniciais do campo de umidade do solo e à formulação detalhada do esquema de parametrização convectiva.

A Temperatura da Superfície do Mar (TSM) observada nos oceanos Pacífico, Atlântico e Índico nos meses de janeiro a dezembro (1979-2009) serviram de variáveis de contorno à superfície nas simulações do *ECHAM4.5* e do *RAMS*. Esse acoplamento entre o modelo *RAMS* e o *ECHAM4.5* está implementado na FUNCEME sendo usado para previsão de precipitação sobre o NEB desde 2001. Os dados de precipitação oriundos do *ECHAM4.5*, geraram a saída de 10 membros para o modelo *RAMS*, dados esses utilizados para a comparação da precipitação do modelo *versus* observado. Foi

utilizada uma grade (30 km x 30 km) a partir da qual se obteve a precipitação média mensal na bacia.

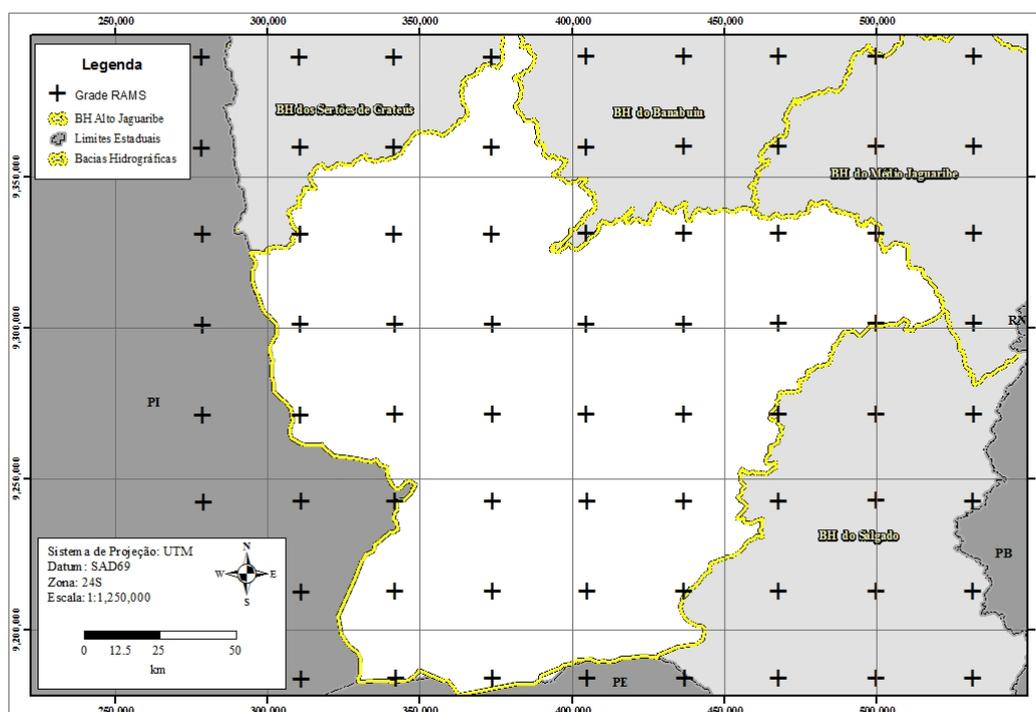
Vários autores (TOTH e KALNAY, 1993, MOLTENI *et al.*, 1996, BRABO *et al.*, 2007) corroboram que a melhor estimativa da atmosfera futura, especialmente para simulação de médio prazo, é o *ensemble* médio, principalmente numa aproximação determinística. Neste estudo também se optou por usar o *ensemble* médio do modelo regional RAMS, para a bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe.

A

Figura 14 apresenta a distribuição dos pontos de grade do acoplamento entre o ECHAM 4.5 e o RAMS, na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe, mostrando a boa distribuição espacial dos pontos na bacia.

As previsões de precipitação, quando comparadas diretamente aos dados observados, mostraram que o modelo de previsão climática tanto global quanto regional apresenta um desvio sistemático em relação aos dados observados. Entretanto, a variabilidade interanual, isto é, a diferença entre anos úmidos e anos secos, foi razoavelmente bem captada pelos modelos. Assim, foi aplicada uma metodologia para reduzir o erro sistemático mantendo a previsão da variabilidade intersazonal.

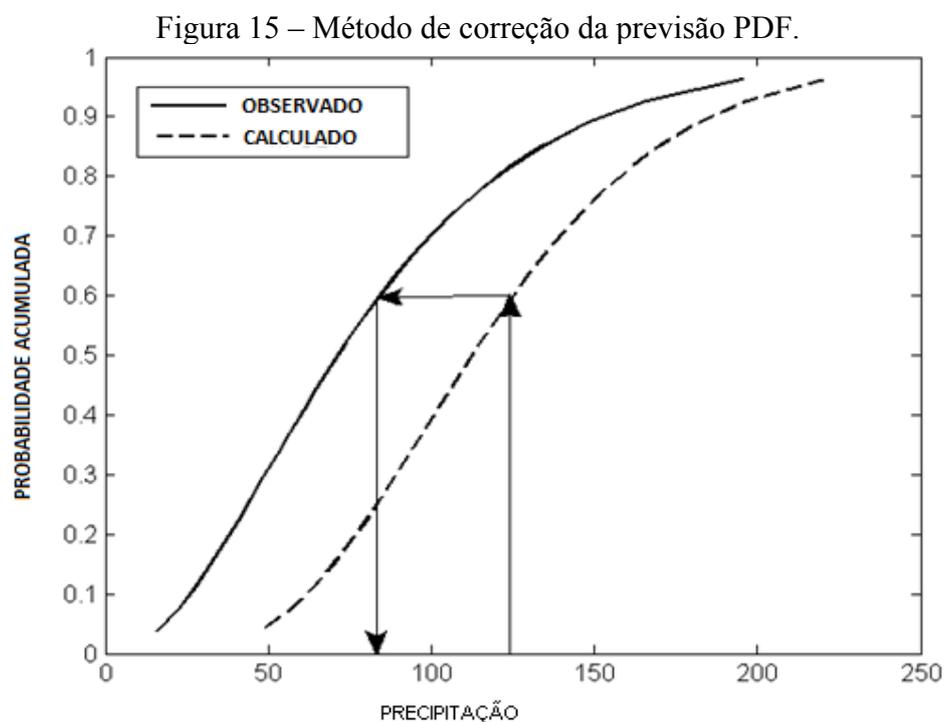
Figura 14 – Distribuição espacial dos pontos de grade do RAMS na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A metodologia de correção das previsões de precipitação está baseada numa transformação da curva de distribuição de probabilidades empírica de precipitação mensal. Para cada mês do ano e para cada ponto da grade de previsão do modelo climático são desenvolvidas duas curvas empíricas de distribuição de probabilidade: a dos dados observados e a dos valores previstos de chuva mensal. A Figura 15 apresenta como exemplo da metodologia de correção de previsões um gráfico com as distribuições de probabilidade válidas, o período utilizado para as correções PDFs foi de 1940-1970.

A probabilidade P associada ao valor previsto original é identificada, utilizando a curva de distribuição de probabilidade dos valores previstos. O valor corrigido associado a esta mesma probabilidade é identificado sobre a curva de distribuição de probabilidade das precipitações observadas. O mesmo procedimento é repetido para todos os dias em que se deseja corrigir a previsão e considerando, sempre, as curvas válidas para o mês e o ponto da grade considerada.



Fonte: Silveira et al. (2014).

5.8. Intervalo de Tempo de Máxima Previsibilidade (ITEMP)

Os modelos apresentam deficiência na previsão dos processos hidroclimáticos, e essas incertezas aumentam quando usamos acoplamento de modelos dinâmicos a modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão, esse desempenho se dá pelo fato das incertezas associadas à previsão e na previsibilidade dos sistemas meteorológicos atuantes.

Com a intenção de analisar o desempenho dos processos da modelagem hidroclimática ao longo do tempo com vista à operação do reservatório de médio prazo (até seis meses) foi criado o Intervalo de Tempo de Máxima Previsibilidade (ITEMP).

O ITEMP mostra a faixa de previsibilidade onde o modelo apresenta melhor eficiência, tornando uma ferramenta que pode auxiliar as tomadas de decisões dos gestores de recursos hídricos no semiárido do NEB.

Como critério de avaliação do ITEMP, foram considerados os valores do *Heidke Skill Score* (HSS) e da correlação (r) usados para comparar as previsões a uma série de dados observados que servem de referência, onde valores com maior HSS e correlações tem-se o melhor ITEMP.

Nesse estudo o ITEMP foi utilizado para avaliar os conjuntos de dados da precipitação, das vazões e dos volumes estocados no reservatório, analisando a evolução das métricas ao longo dos processos. Os horizontes de tempo de simulação foram variando ao longo do primeiro semestre (devido ao regime pluviométrico da região), levando em conta a atuação dos sistemas meteorológicos da região. Foi usado n dias como condições iniciais da simulação (1, 2, 10, 15, 21, 30, 45, 60, 120 e 180).

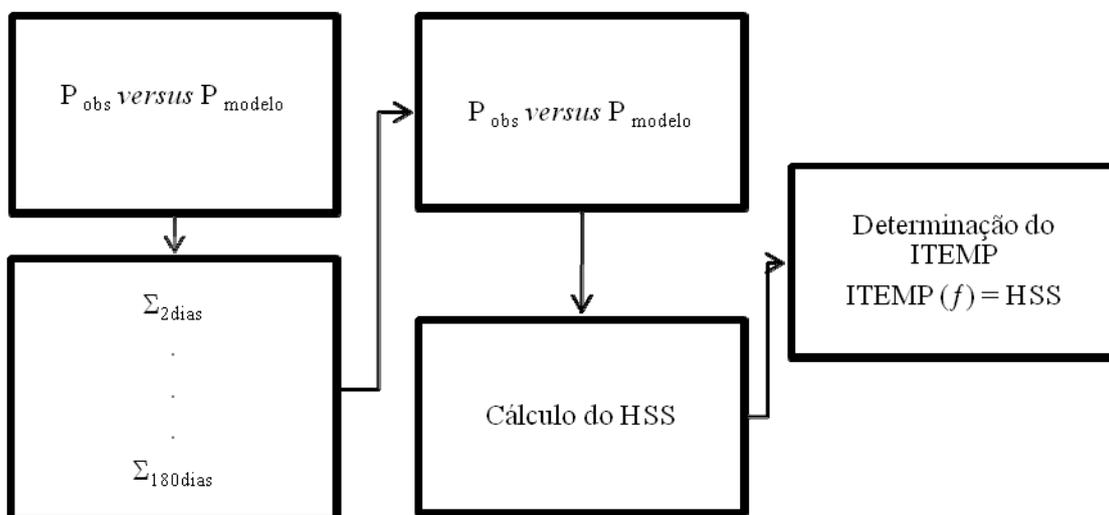
Essa análise segue a metodologia proposta por Cabral *et al.* 2014, onde a análise do modelo climático RAMS, dá pela previsão n dias, prevendo a obtenção do Intervalo de tempo de Máxima Previsibilidade (ITEMP) da modelagem, levando em conta os sistemas meteorológicos atuantes ao longo do período da previsão.

A Figura 16 apresenta um exemplo da metodologia aplicada para o cálculo do HSS na determinação do ITEMP na análise da simulação da precipitação em bacias hidrográficas. A Figura 17 mostra o croqui do algoritmo desenvolvido para a determinação do ITEMP na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe, com as etapas dos cálculos e as condições consideradas nesse trabalho.

Figura 16 - Exemplo da metodologia aplicada para a determinação do ITEMP.

		1	2	3	4	5	6 ...	175	175	177	178	179	180	N valores HSS dias	
HSS 1	30 anos observados	1	2	3	4	5	6 ...	175	175	177	178	179	180	=30x180 5400	
	30 anos modelado	1	2	3	4	5	6 ...	175	175	177	178	179	180		
HSS 2	30 obs	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	...	169-170	171-172	173-174	175-176	177-178	179-180	=30 x 90 2700
	30 mod	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	...	169-170	171-172	173-174	175-176	177-178	179-180	
HSS 30		1-30	31-60	61-90	91-120	121-150	151-180							=30x6 180	
		1-30	31-60	61-90	91-120	121-150	151-180								
HSS 60		1-60	61-120	121-180										=30x3 90	
		1-60	61-120	121-180											
HSS 180		1-180												=30*1 30	
		1-180													

Figura 17 - Algoritmo metodológico para determinação do ITEMP.

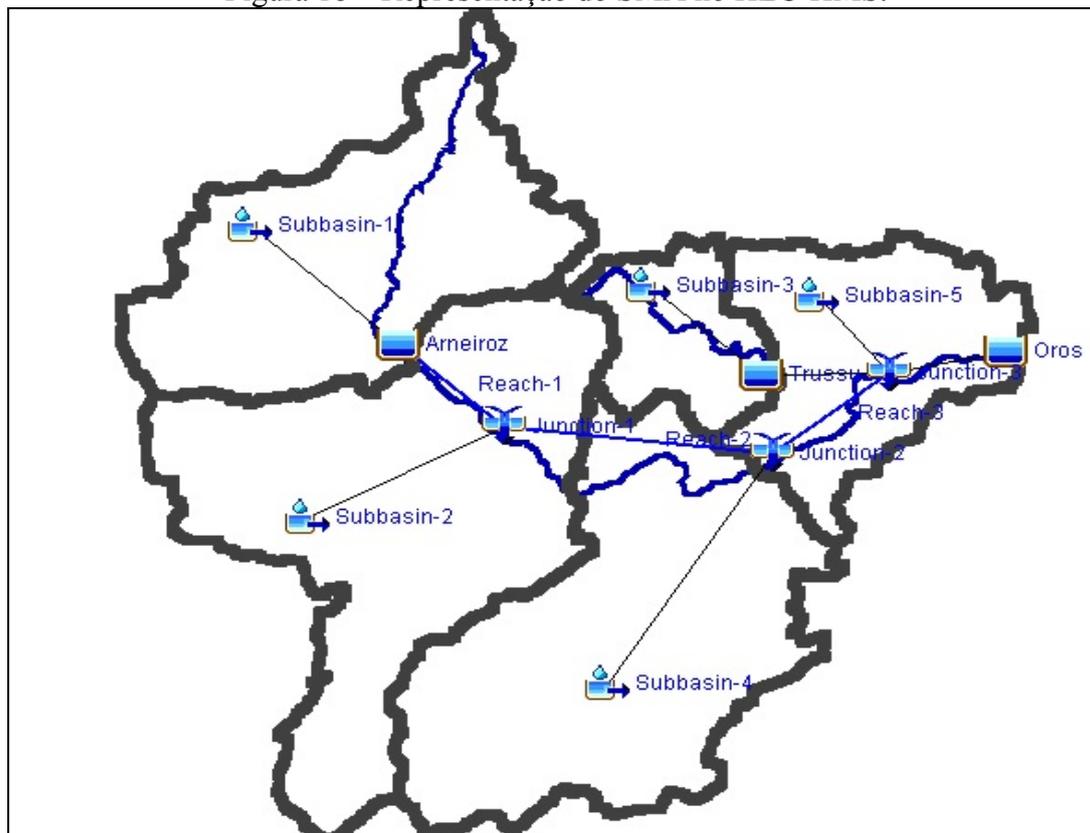


5.9. Modelagem hidrológica: SMA do HEC-HMS

Com o intuito de conhecer o regime de vazões em uma bacia hidrográfica no semiárido do Brasil, aplicou-se o modelo hidrológico contínuo SMA do programa HEC-HMS, a fim de obter informações que auxiliem as afluições e os volumes estocados no reservatório Orós e auxilie operação de reservatórios nessa região. A seguir serão descritos a metodologia da estimativa dos principais parâmetros do SMA na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe.

A Figura 18 mostra a representação esquemática da modelagem hidrológica do SMA no programa HEC-HMS.

Figura 18 – Representação do SMA no HEC-HMS.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.9.1. Caracterização fisiográficas das sub-bacias

Para análise mais detalhada a bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe, foi dividida em cinco sub-bacias com o intuito de obter um melhor entendimento dos processos hidrológicos existentes.

A Tabela 4 apresenta algumas características fisiográficas (área da bacia, comprimento do rio, *lag time*, tempo de concentração, altitude e declividade média) obtidas através de técnicas de Sistema de Informações Geográficas (SIG) e programas computacionais.

Na simulação hidrológica além dos dados fisiográficos foram utilizados dados da curva cota-área-volume (CAV) dos reservatórios do Arneiroz, Trussu e Orós, disponível no Atlas da Secretaria de Recurso Hídricos do Ceará, disponível em <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-dss/>.

Tabela 4 – Características fisiográficas das sub-bacias Alto Jaguaribe.

Sub Bacias	Área (Km ²)	Comprimento do rio (Km)	Lag Time (h)	Tempo de Concentração (h)	Altitude Média (m)	Declividade Média (m/m)
1	5370	137	5.60	9.33	437	0.00264
2	7505	60	5.53	9.22	316	0.00119
3	4929	95	4.11	6.85	325	0.00400
4	6897	61	6.72	11.20	256	0.00074
5	3367	94	9.62	16.03	210	0.00046

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.9.2. Estimativa dos parâmetros do SMA

A aplicação do SMA implica no conhecimento de 14 parâmetros; uma parte destes, em função das disponibilidades de dados pode ser obtida por calibração. Os parâmetros iniciais utilizados na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe foram estimados com base nas características fisiográficas da bacia, proposto por Bennett e Peters (2000). As Tabelas 5 a 8 apresentam os valores dos parâmetros em função das características das bacias hidrográficas ou dos tipos de solo. O armazenamento dossel, parte da chuva interceptada pela vegetação interceptação foi estabelecido da vegetação, como é mostrado na Tabela 5. O armazenamento nas depressões da superfície do solo foi estimado como uma função da bacia superfície e inclinação (ver Tabela 6). Os valores do máximo armazenamento no solo, armazenamento zona de tensão e máxima infiltração taxa são apresentados na Tabela 7 como uma função do tipo de solo. A taxa de percolação zona solo foi especificada como uma função da à permeabilidade, como está indicada na Tabela 8. Os valores indentificados com o (*) nas tabelas foram os valores iniciais utilizados para a simulação do SMA na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe.

Tabela 5 – Estimativa do armazenamento dossel interceptação.

Vegetação	Interceptação e armazenamento do dossel (mm)
Floresta	9
*Arbusto	4
Pasto	4
Outro	2

Fonte: Bennett e Peters (2000).

Tabela 6 - Estimativa do armazenamento na superfície.

Superfície	Declividade (%)	Armazenamento na superfície (mm)
Pavimentada	9	3.2-6.4
	>30	1.0
*Natural	10-30	12.7-16.4
	0-5	50.8

Fonte: Bennett e Peters (2000).

Tabela 7 - Estimativa de parâmetros selecionados do modelo SMA em função do tipo de solo (SCS).

Tipo de solo SCS	Armazenamento máximo do solo (mm)	Armazenamento na zona de tensão (mm)	Taxa máxima de infiltração (mm/h)
A	150	105	8
B	85	68	4.5
C	70	59.5	3
*D	50	45	1

Fonte: Bennett e Peters (2000).

Tabela 8 - Estimativa da taxa de percolação do solo.

Permeabilidade	Taxa de percolação na zona do solo (mm/h)
Alta	8
*Média	4
Baixa	1

Fonte: Bennett e Peters (2000).

Para definição dos valores iniciais dos parâmetros do modelo SMA do HEC-HMS (Tabela 9), foram levados em consideração às características físicas do tipo de solo na área de bacia hidrográfica.

Para o hietograma, utilizou-se o método dos blocos alternados, sendo os dados introduzidos no HMS pela opção *Specified Hyetograph*, com dados de precipitação informados pelo usuário (CAMPOS, 2009).

Tabela 9 – Valores estimados dos Parâmetros do SMA.

Parâmetros	Valor Inicial	Parâmetros	Valor Inicial
<i>Soil (%)</i>	0.5	<i>Soil Percolation (mm/hr)</i>	4
<i>Groundwater 1 (%)</i>	0	<i>GW 1 Storage (mm)</i>	20
<i>Groundwater 2 (%)</i>	0	<i>GW1 Percolation (mm/hr)</i>	10
<i>Max Infiltration (mm/hr)</i>	1	<i>GW1 Coefficient (h)</i>	5
<i>Impervious (%)</i>	5	<i>GW 2 Storage (mm)</i>	10
<i>Soil Storage (mm)</i>	50	<i>GW 2 Percolation (mm/hr)</i>	1
<i>Tension Storage (mm)</i>	45	<i>GW 2 Coefficient (h)</i>	15

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o processo *Transform*, que gera o hidrograma a partir do hietograma da chuva, aplicou-se o método do Hidrograma Unitário Adimensional do NRCS. O método tem como parâmetro o tempo de retardo (T_{lag}). O valor de T_{lag} é obtido pela Equação 2.

$$T_{lag} = 0.6T_c \quad (2)$$

onde T_c denota o tempo de concentração. Por sua vez, T_c é estimado pela Equação de Kirpich (Equação 3)

$$T_c = 0.0078x \left(\frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \right) \quad (3)$$

onde: L é o comprimento do rio em metros e S é a declividade do rio em %

5.9.3. Parametrização multiobjetivo do SMA

O procedimento de calibração automática do HEC-HMS utiliza um metodo iterativo para minimizar uma função objetivo. Para a calibração paramétrica do SMA foi escolhida uma função objetivo baseada no erro percentual do volume, segundo a Equação 4, essa medida só considera a magnitude de computação volume total.

$$Z = \sum_{i=1}^{Nq} \left| \frac{q_0(vol) - q_s(vol)}{q_0(vol)} \right| \quad (4)$$

onde: Z - função objetiva, NQ números de ordenadas do hidrogramas calculadas, $Qo(t)$ vazão observada, $Qs(t)$ vazões calculadas com os parâmetros do modelo, qo (vol) volume observado, qo (média) média das vazões e qs (vol) volume calculado.

5.9.4. Calibração e validação do SMA

A calibração do modelo consiste no ajuste dos parâmetros de forma que o modelo possa reproduzir a série de vazões observadas, a partir da entrada de dados de vazão e precipitação. A qualidade do ajuste é evidenciada pela maior ou menor diferença entre as séries de vazões observadas e calculadas: tanto melhor o ajuste, mais próximo é o hidrograma calculado do hidrograma observado.

A aplicação do algoritmo SMA para determinação das perdas de água no modelo implica na calibração de um total de 14 parâmetros, explicitados anteriormente. O período de dados do Posto Iguatu escolhido para calibração compreende as vazões e precipitações diárias de janeiro de 1979 a dezembro de 1995.

A validação do modelo consiste na simulação do modelo com os parâmetros ajustados para verificar a validade da calibração. O período de verificação escolhido foi de janeiro de 1996 a dezembro de 2009.

5.10. Modelo de operação do reservatório

Para solucionar o balanço hídrico no presente trabalho utilizou-se o programa computacional SIMRES (CAMPOS e STUDART, 2009), desenvolvido na Universidade Federal do Ceará em linguagem FORTRAN 4.02.e DELPHI 4.0. O Programa resolve a equação do balanço hídrico por um processo de integração em que a unidade de tempo é dividida em N partes e as retiradas em lâmina (evaporação e precipitação) e em volume (deflúvios - regularização) são divididas por N e retiradas alternadamente. Quando N é muito grande, o processo reproduz a simultaneidade das retiradas que ocorrem na prática.

O Programa tem como objetivo facilitar o estudo de dimensionamento e operação de reservatórios superficiais e proporcionar uma ferramenta para fazer experimentos em hidrologia de reservatórios. Esse programa já foi aplicado no desenvolvimento de teses e dissertações na UFC.

A determinação do comportamento do reservatório foi feita pela equação de seu balanço hídrico, (equação 5) que consiste em igualar as entradas e saídas do reservatório como se segue:

$$dV/dt = E - S \quad (5)$$

onde dV/dt é a variação do volume ao longo do tempo, E o resultado de todas as entradas no sistema e S o resultado de todas as saídas.

As entradas são compostas dos deflúvios afluentes e das precipitações diretas sobre o espelho d'água do reservatório; as retiradas, por sua vez, são formadas pelas evaporações e pelas retiradas.

A metodologia aplicada foi baseada pelo balanço hídrico do reservatório, onde o rendimento do reservatório, denotado por Y, é a quantidade de água a ser liberada a partir do reservatório sempre que houver disponibilidade.

A liberação do reservatório no tempo t (R_t) é o volume de água efetivamente liberada do reservatório para atender a demanda. Assim, os valores R_t são iguais ou menores do que Y, e dependem do teor de água do reservatório.

A operação do reservatório simulado foi realizada utilizando a seguinte equação de previsão:

$$S_{i+1} = S_i + (P_i - E_i) \left(\frac{A_{i+1} + A_i}{2} \right) + I_i - R_i \quad (6)$$

onde S_i e S_{i+1} (m^3 / s) denotam o armazenamento diário do reservatório nos tempos t e t + 1, respectivamente; P_i (mm / dia) e E_i (mm / dia) representam, respectivamente, a precipitação média diária, e a taxa média de evaporação diária sobre a superfície do reservatório no tempo i; A_i e A_{i+1} (m^2) são a área do reservatório em tempos t e t + 1, respectivamente; I_i (m^3 / s) e R_i (m^3 / s) são a entrada e a liberação do reservatório no momento I, respectivamente.

Para o cálculo do rendimento do regime hidrológico no NEB pode ser estimada utilizando o Diagrama Triangular de Regulação (DTR), desenvolvido por Campos (2009). Este método é uma solução gráfica da equação de previsão do reservatório na sua forma adimensional (CAMPOS 2009) e estima que a afluência, a evaporação e o

escoamento baseiam-se principalmente em dois parâmetros adimensionais: a evaporação fator (Fe) e a capacidade do reservatório (FK). O fator de evaporação foi estimado por:

$$f_E = \frac{3E\alpha^{1/3}}{\mu^{1/3}} \quad (7)$$

onde α indica um fator adimensional de forma; E é a taxa de evaporação do reservatório durante a estação seca, e μ é o influxo do reservatório média anual. O valor α foi estimado por:

$$\alpha = \frac{K}{(h_{\max})^{1/3}} \quad (8)$$

em que K é a capacidade do reservatório e hmax indica a profundidade máxima de água para o reservatório. O fator adimensional de capacidade foi calculado, com todas as variáveis definidas anteriormente, como:

$$f_k = \frac{K}{\mu} \quad (9)$$

A Tabela 10 mostra os valores das principais características físicas do reservatório Orós, utilizados no estudo.

Tabela 10 - Características físicas do reservatório Orós.

Parâmetro	Valor
Capacidade do reservatório (K)	1,950 hm ³
Taxa de evaporação durante a estação seca (E)	1.588 m
Afluência média anual	858,4 hm ³
Profundidade máxima (hmax)	54.0 m
Fator de forma do reservatorio (α)	1232
Fator adimensional do reservatório (FK)	2.3
Fator adimensional de evaporação (Fe)	0.12
Coefficiente de variação dos fluxos anuais	1.53

Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma primeira análise foi realizada em função das aflúências observadas e simuladas. A análise foi realizada utilizando os seguintes conjuntos de dados de diferentes aflúências do reservatório:

- Aflúência observada no reservatório (estas são usadas como referência para avaliar as decisões);
- Aflúência estimada pelo SMA no reservatório forçado pelas precipitações observadas;
- Aflúência estimada pelo SMA no reservatório forçado pelo RAMS, com correção PDF das precipitações.

A eficiência do modelo foi avaliada através da comparação dos fluxos observados (1979-2009). A Tabela 11 resume os cenários de decisões operacionais para a gestão do reservatório Orós de acordo com diferentes condições iniciais (abaixo da média, média e acima da média).

Tabela 11 – Regras de operação do reservatório em função da aflúência.

Condições Iniciais de Vazões	Aflúência (H) hm³	Decisão Operacional
$V_0 < \text{média}$	$V_0 \leq 500.0$	Escassez de água.
$V_0 = \text{média}$	$500.0 < V_0 \leq 1000$	Uso com parcimônia
$V_0 > \text{média}$	$V_0 > 1000$	Atender todas as demandas

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.11. Modelo de cascata

Foi utilizado nesse estudo um modelo da cascata, que pode ser sintetizado como mostra a Figura 19. O ECHAM4.5, forçado pela TSM global observado durante 1979-2009, gerou uma primeira série de dez conjuntos diário de precipitação em baixa resolução espacial. Estas saídas do ECHAM4.5, serviu de entrada no RAMS para obter uma segunda série de dez conjuntos de precipitação diária sobre a área da bacia num espaço maior resolução.

Em seguida, as médias ambos (ou seja, antes e depois da correção PDF) desta segunda série de dez conjuntos foram usados para representar os valores esperados de precipitação diária sobre a Bacia do Alto Jaguaribe. Estes conjuntos de precipitação

simulada, bem como o conjunto de precipitação observada, foram em seguida utilizados para forçar o modelo chuva-vazão (SMA do HEC-HMS), a fim de gerar dois conjuntos de valores de descarga modelados que alimentam o reservatório de Orós, no Estado do Ceará.

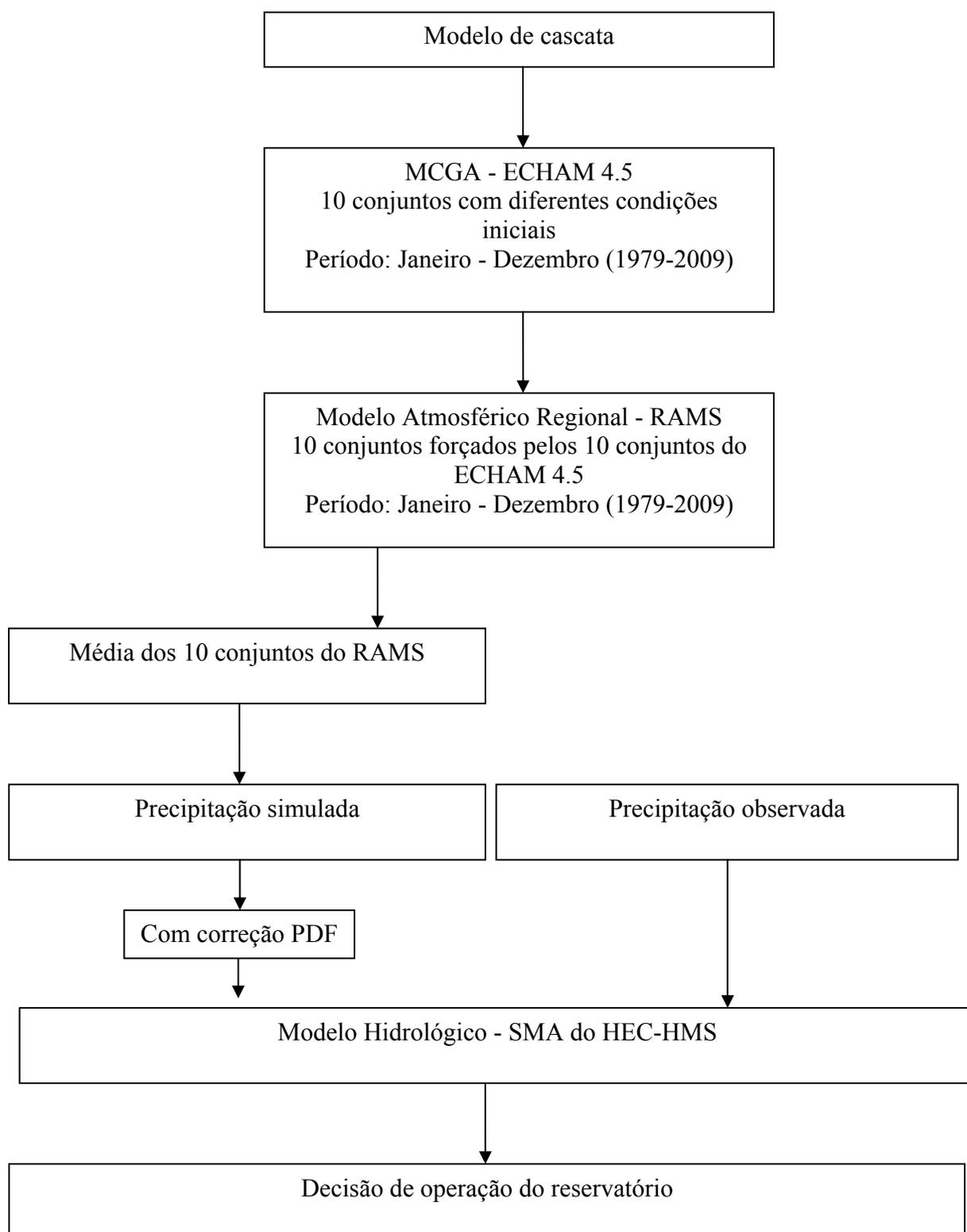
Estes dois conjuntos de entrada simulada foram em comparação com o conjunto de fluxo observados. Finalmente, as três decisões de operação de reservatórios usando observado, simulado foram comparadas.

Seguindo a proposta de Alves *et al.* (2012), optou-se por usar *Heidke Skill Score* (HSS) com o intuito de medir a eficiência do sistema de modelo durante o período de 1979-2009 na área de estudo.

O HSS é uma das estatísticas mais utilizadas para fornecer uma ideia da qualidade relativa de uma previsão. Geralmente, o sistema de referência é a própria climatologia obtida pela série histórica ou um sistema de previsão baseado na persistência (DOSWELL *et al.*, 1990).

Em todas as etapas dos processos hidroclimáticos foram avaliados a destreza da previsão do modelo, analisando sua variabilidade em função principalmente dos sistemas meteorológicos atuantes na região.

Figura 19 – Representação do modelo de cascata.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.12. Análise da eficiência da modelagem atmosférica e hidrológica

Para avaliar a eficiência dos modelos atmosféricos e hidrológicos foram utilizadas algumas métricas para verificar tal desempenho. As métricas viés, erro absoluto médio, erro quadrático médio, desvio padrão, coeficiente de variação e *Heidke Skill Score* foram utilizados na verificação da modelagem da precipitação, na modelagem hidrológica as métricas utilizadas foram o *Heidke Skill Score*, o coeficiente de *Nash-Sutcliffe* e no cálculo do volume armazenado o *Heidke Skill Score* e o fator de correlação.

5.12.1. Viés

O 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).

$$b = \frac{1}{N} \sum (V_{0,i} - V_{s,i}) \quad (10)$$

onde V_0 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 viés 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.

5.12.2. Erro Absoluto Médio (EAM)

O Erro Absoluto Médio (EAM) é considerado 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.

$$EAM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |V_{0,i} - V_{s,i}| \quad (11)$$

onde V_0 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.

5.12.3. Erro Quadrático Médio (EQM)

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

$$EQM = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (V_{0,i} - V_{s,i})^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

onde V_0 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.

5.12.4. Desvios padrão (σ)

Uma estimativa de erro frequentemente sugerida 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.

$$\sigma_{Obs} = \frac{1}{N} \left[\sum \left(V_{0,i} - \bar{V}_0 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

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

onde V_0 é o valor da variável observada e V_s é o valor da variável simulada/prevista, e onde \bar{V}_s e \bar{V}_0 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:

$$R_a = \frac{\sigma_{Obs}}{\sigma_{Sim}} \quad (15)$$

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.

5.12.5. Coeficiente de correlação (r)

O Coeficiente de Correlação (r), segundo a literatura, é a mais relevante métrica de comparação de todas as apresentadas. Sua fórmula é mostrada abaixo.

$$r = \frac{1}{N} \sum \frac{V'_{o,i} V'_{s,i}}{\sigma_{obs} \sigma_{sim}} \quad (16)$$

onde: N é número de anos, e \bar{V}_0 indicam o valor da média da variável simulada/prevista e observada, σ_{Obs} e σ_{Sim} são os desvios padrão observada e simulada.

5.12.6. Heidke Skill Score

O HSS utiliza a proporção de acertos como métrica para calcular a qualidade relativa do sistema de previsão. Este índice possui valores entre -1 e 1 que indicam, respectivamente, um modelo incapaz e um modelo perfeito de captar os fenômenos de precipitação. O valor zero para o HSS significa que os valores das médias históricas são tão bons quanto o modelo de previsão. O HSS é calculado pela Equação 12).

$$HSS = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^k N(F_i O_i) - \frac{1}{N^2} \left(\sum_{i=1}^k N(F_i) N(O_i) \right)}{1 - \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^k N(F_i) N(O_i)} \quad (17)$$

onde: $N(F_i, O_i)$ denota o número de previsões na categoria i que tem observações na categoria i , $N(F_i)$ indica o número total de previsões na categoria i , $N(O_i)$ significa que o número total de observações na categoria i e N o número total de observações, k é o número de classes. Para isso foram divididos os dados da precipitação observada e modelada em tercis totalizando três tercis, onde para o cálculo do HSS precisa além dos tercis a soma dos números de observações e de previsões.

5.12.7. Nash-Sutcliffe

Para determinação da eficiência da modelagem foi utilizado o coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (NS) que tem sido largamente utilizado na verificação do desempenho de modelos hidrológicos. O coeficiente NS pode ser dado pela seguinte Equação (13):

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{nt} [Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t)]^2}{\sum_{t=1}^{nt} [Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs}(t)]^2} \quad (18)$$

onde: $Q_{obs}(t)$ vazão observada no passo de tempo t em (m^3/s), $Q_{sim}(t)$ vazão simulada em (m^3/s) e \bar{Q}_{obs} média de vazões observadas de todo o período de simulação em (m^3/s).

Esse coeficiente é uma medida normalizada, podendo variar entre $-\infty$ e 1.0, que compara o erro quadrático médio gerado pela simulação de um modelo com a variância da série definida como meta. Ele pode ser considerado, portanto, como uma relação entre ruídos de sinais, que compara o tamanho médio dos resíduos do modelo com dados observados.

6. RESULTADOS

6.1. Análise da modelagem da precipitação

Os resultados mostram uma tendência marcante nos valores corrigidos pelas PDFs conseguem acompanhar o ciclo sazonal da precipitação, fato que os dados simulados pelo RAMS sem correção PDF 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 deterão aos dados corrigidos pelas PDFs.

Para um melhor entendimento das comparações entre precipitações mensais observadas e modeladas pelo modelo regional, a análise foi feita para cada sub-bacia conforme a Figura 20, Figura 21, Figura 22, Figura 23 e Figura 24.

Percebe-se que em grande parte do período analisado o modelo subestimou os dados observados, entretanto o modelo acompanha a tendência da chuva em quase todo período analisado. Nota-se que o modelo perde desempenho para precipitações acima de 100 mm/mês.

O modelo apresenta erros de viés em todo o período na bacia. Ainda no escopo da análise integrada no tempo, é interessante questionar o desempenho das estimativas de ocorrência de chuva em função da intensidade da chuva observada.

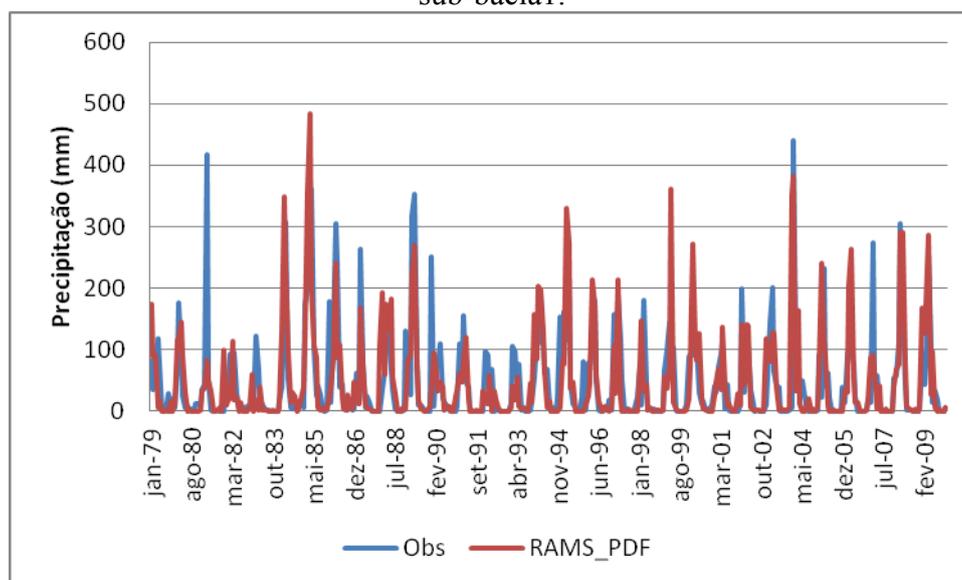
O primeiro trimestre JAN-FEV-MAR apresenta maior parte dos dados subestimando as simulações de precipitação ao longo do tempo, entretanto os valores do viés mostra uma pequena variabilidade em todo período. No primeiro trimestre nota-se maior discrepância sobre, a bacia hidrográfica presumindo que o modelo RAMS tenha menos destreza na previsão climática sobre a bacia nesse período, possivelmente devido às incertezas e a variabilidade dos sistemas meteorológicos na pré-estação na bacia. Já durante ABR-MAI, nota-se um maior ordenamento na precipitação sobre a bacia.

No fim da estação chuvosa na bacia, o modelo comporta-se com uma melhor eficiência, principalmente nos meses de maio e junho, com pequenas variações comparando as precipitações observadas e modeladas sobre a bacia.

Diferenças entre valores de precipitação mensais observados e obtidos por modelagem atmosférica 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 de precipitação sempre acima da observada, no período de 1951-2001.

Figura 20– Análise das precipitações médias mensais observadas versus modelada na sub-bacia1.



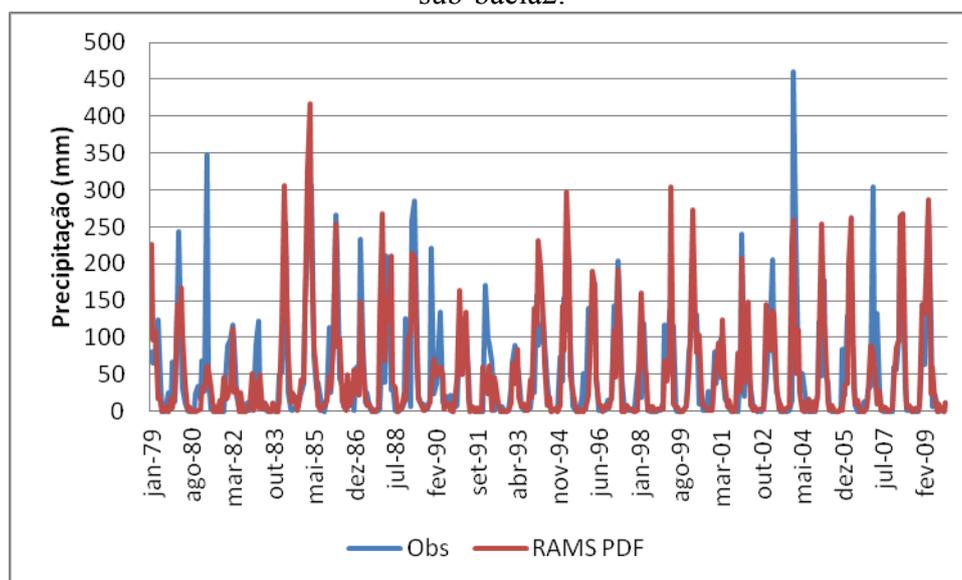
Fonte: Elaborada pelo autor.

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.

No Nordeste do Brasil, Sun *et al.* (2005) analisaram simulações entre janeiro-junho utilizando um modelo regional aninhado ao ECHAM4.5 (*European-Hamburg Model version 4.5*) e utilizando a temperatura da superfície do mar (TSM) observada, para um período de 30 anos (1971-2000). Os autores destacaram que o modelo resolve bem tanto o padrão espacial como a variabilidade interanual da chuva sobre o Nordeste do Brasil. As mesmas simulações foram avaliadas por Alves *et al.* 2005, os quais

mostraram que para a quadra chuvosa (fevereiro a maio) o ECHAM4.5 subestimou os valores da precipitação, enquanto o modelo regional corrigiu as previsões do ECHAM4.5 na costa leste do Nordeste, prevendo valores de chuva mais próximos do observado.

Figura 21– Análise das precipitações médias mensais observadas versus modelada na sub-bacia2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados demonstram ainda que eventos extremos com alto percentual de precipitação como, por exemplo, os anos de 1984, 2008 e 2009 o modelo representou bem os totais de chuva nas sub-bacias estudadas, com destaque para a sub-bacia3 onde a mesma captou precipitações acima de 400 mm/mês durante os anos de 1984 e 2004.

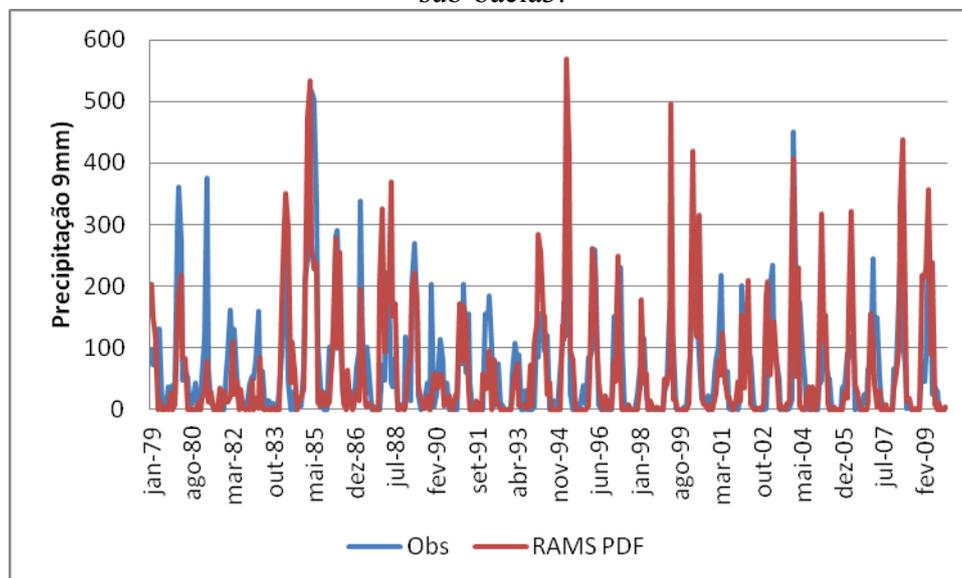
Para a escala de bacia hidrográfica, Alves *et al.*(2008) apresentam resultados do potencial do uso da simulação *downscaling* dinâmico em estimar a variabilidade intrasazonal das chuvas na bacia hidrográfica do açude Castanhão no Ceará. Estudos nos Estados Unidos e Inglaterra têm mostrado bons resultados do *downscaling* dinâmico na escala de bacia hidrográfica (MILLER *et al.*, 1999).

Lima e Alves (2009) realizaram um estudo de *downscaling* dinâmico de precipitação intrasazonal acoplado a modelo chuva-vazão na bacia hidrográfica alto-médio São Francisco, e encontraram erros na dinâmica da precipitação em períodos de dados sem correções PDFs.

Silva *et al.*(2009) aplicaram o modelo RAMS na bacia do rio São Francisco e verificaram subestimativas das médias mensais, e erros sobre a faixa da região do

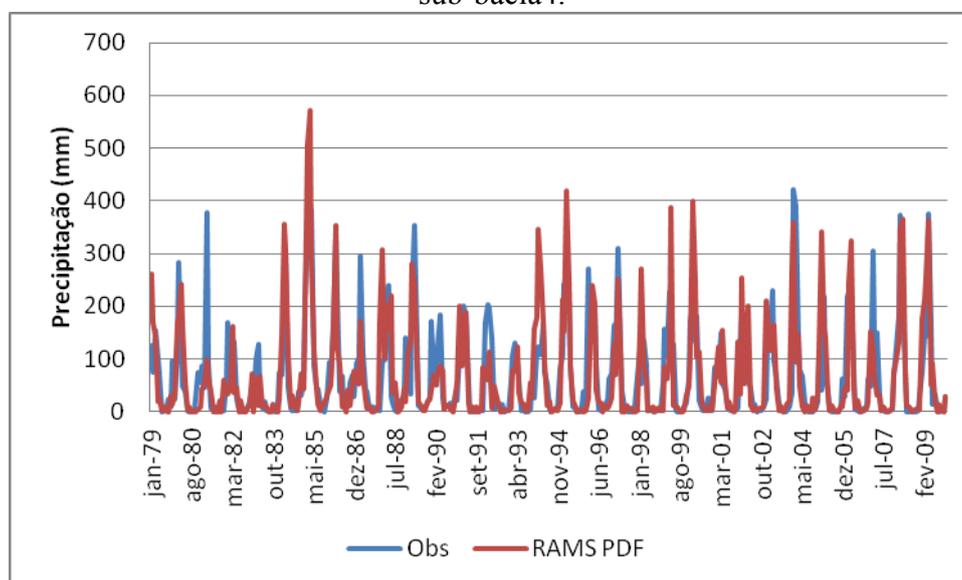
estudo, o que pode estar associado às parametrizações de convecção e efeitos de topografia.

Figura 22– Análise das precipitações médias mensais observadas versus modelada na sub-bacia3.



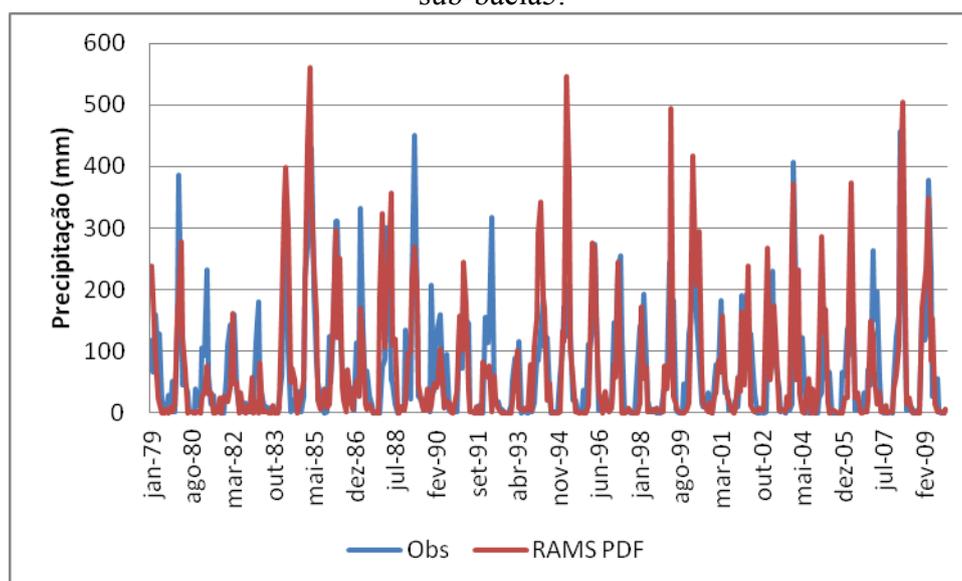
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 23– Análise das precipitações médias mensais observadas versus modelada na sub-bacia4.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24– Análise das precipitações médias mensais observadas versus modelada na sub-bacia5.



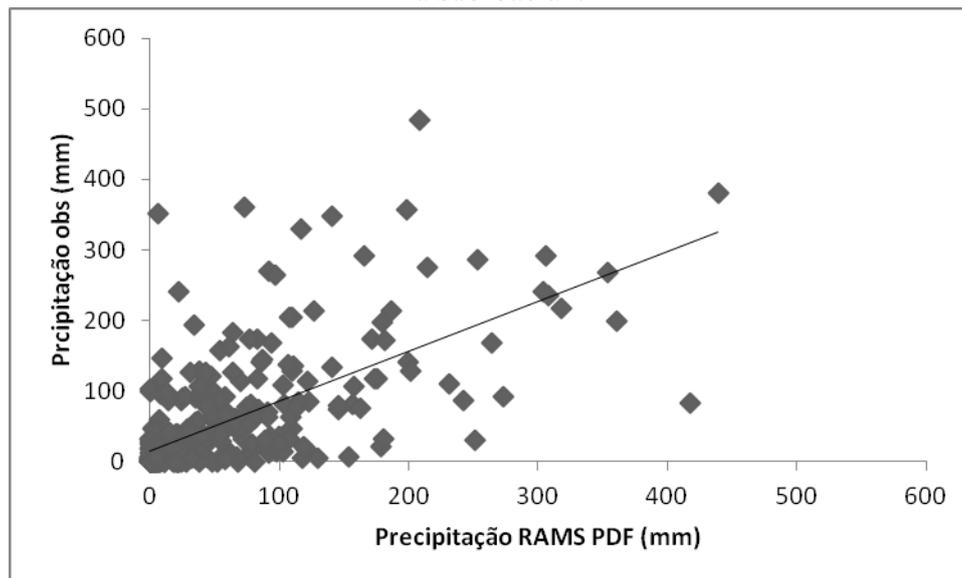
Fonte: Elaborada pelo autor.

As correlações das precipitações médias mensais e observadas e modeladas corroboram com os resultados apresentados anteriormente, onde mostra que o modelo subestima na maioria do tempo as precipitações em todas as sub-bacias. O melhor desempenho é encontrado na sub-bacia4, credita essa análise ao número de postos pluviométricos, sua distribuição espacial e pela melhor qualidade dos dados contidos nessa sub-bacia.

A Figura 25, Figura 26, Figura 27, Figura 28, e Figura 29 apresentam as correlações da precipitação média mensal observada e da precipitação média simulada pelo RAMS com correção PDF para todas as sub-bacias estudadas, nelas pode-se verificar a dispersão dos valores em torno da reta 1:1, para as regiões, nota-se nitidamente acúmulo de pontos abaixo da reta 1:1, caracterizando tendência de subestimação dos valores de precipitação média tal comportamento mostra que o mesmo deve ser aplicado com ressalva, em virtude da sua menor confiabilidade estatística.

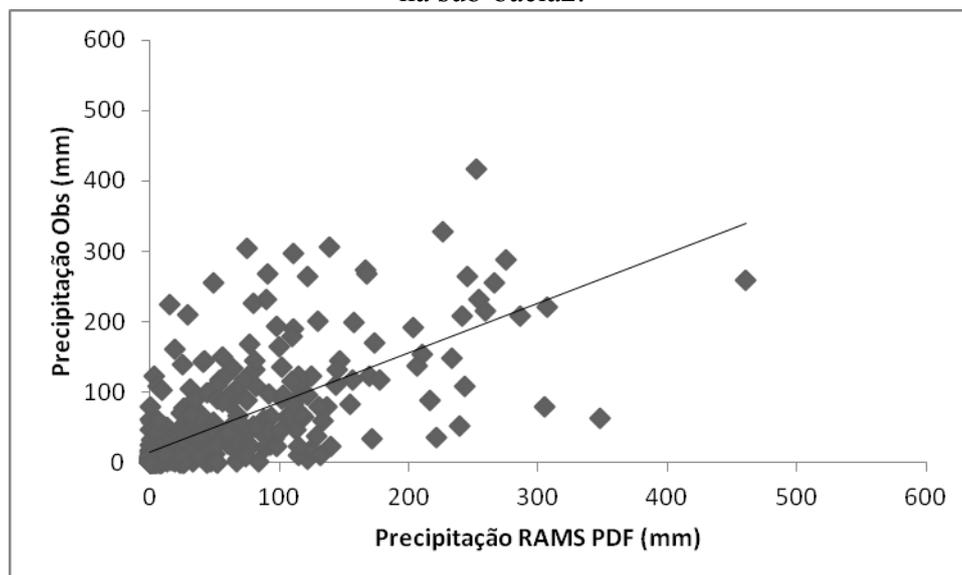
Os resultados mostram que as correlações encontradas nas sub-bacias foram da ordem de 0.66 (sub-bacia1), 0.68 (sub-bacia2), 0.61 (sub-bacia3), 0.71 (sub-bacia4) e 0.66 (sub-bacia5).

Figura 25– Correlação das precipitações médias mensais observadas versus modelada na sub-bacia1.



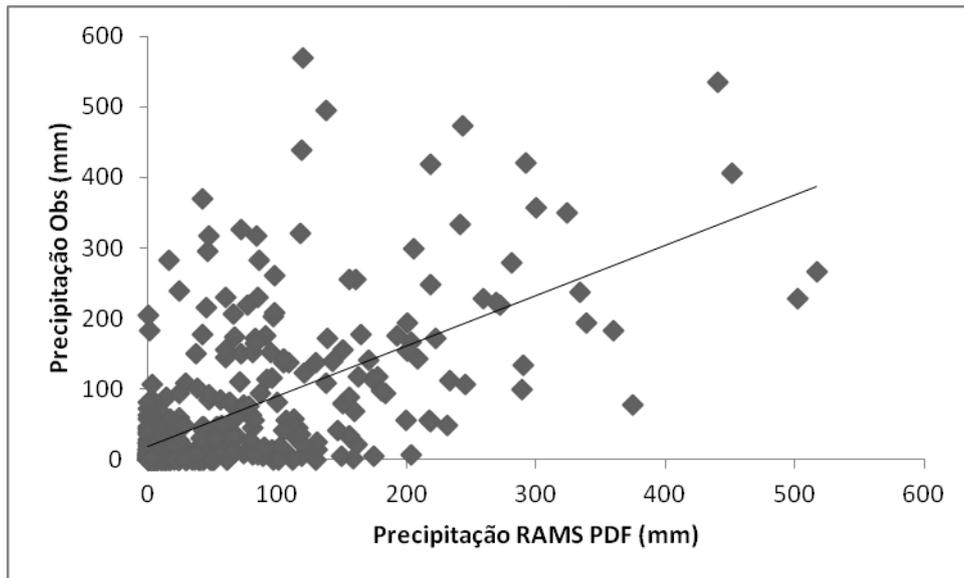
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 26– Correlação das precipitações médias mensais observadas versus modelada na sub-bacia2.



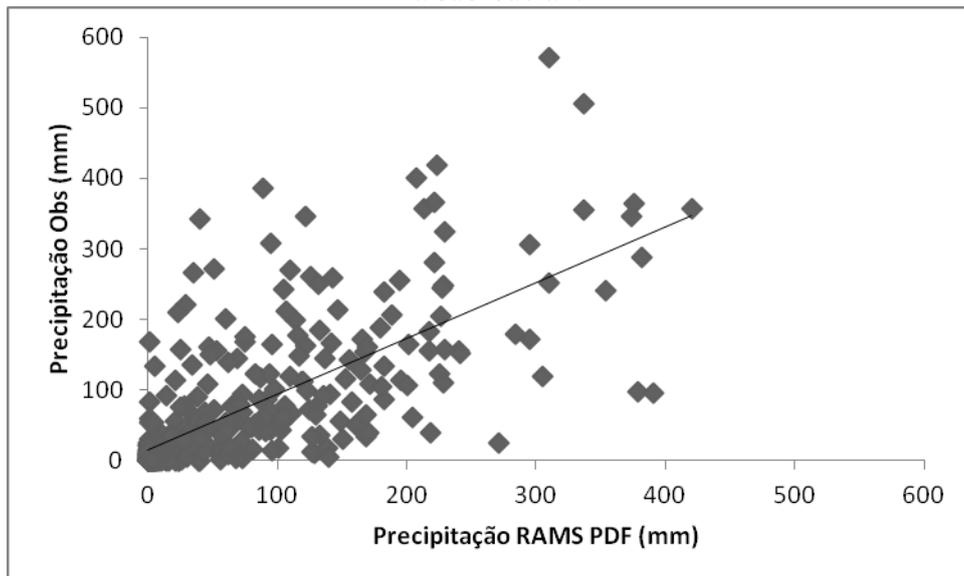
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 27– Correlação das precipitações médias mensais observadas versus modelada na sub-bacia3.



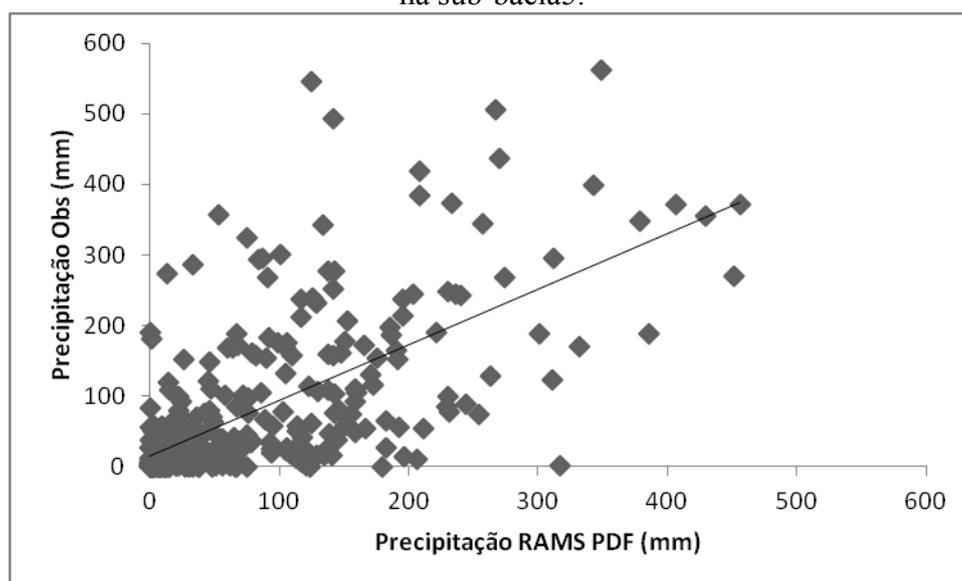
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 28– Correlação das precipitações médias mensais observadas versus modelada na sub-bacia4.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 29– Correlação das precipitações médias mensais observadas versus modelada na sub-bacia5.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Embora as análises apresentadas possuam limitações, já que utilizaram apenas uma realização de cada um dos modelos, nota-se que a regionalização com RAMS adiciona informações às previsões do ECHAM4.5, corrigindo alguns erros sistemáticos deste, apresentaram resultados satisfatórios.

É importante ressaltar que, mesmo com a verificação dessas imprecisões nas previsões de precipitação obtidas com a utilização do modelo RAMS, pode-se concluir que essa previsão de precipitação é potencialmente útil como subsídio para o processo de previsão de vazões naturais, podendo ainda a sua utilização ser mais bem aproveitada a partir de novos aprimoramentos na modelagem, que venham a construir previsões de precipitação mais acuradas.

6.2. Análise da eficiência da simulação da precipitação

Diversos índices de análise de previsão são propostos e utilizados na literatura (WILKS, 2006; KULIGOWSKI, 2002; STEPHENSON, 2000; MESINGER, 2008) e poderiam também ser utilizados dentro da metodologia apresentada neste trabalho. Independente do índice de desempenho utilizado ressalta-se a importância de entender sua formulação para poder avaliar mais coerentemente os resultados (HAMILL e JURAS, 2006).

Lima e Alves (2009) testaram vários parâmetros estatísticos na avaliação de desempenho da precipitação em bacias hidrográficas, com e sem correções PDFs, usando a grade de um modelo regional, para um período de 30 anos. Quanto à correlação, os autores não encontraram diferenças muito significativas no coeficiente de correlação e na razão entre os desvios padrões, embora os valores sejam um pouco maiores em magnitude com os dados de precipitação corrigidos.

A Tabela 12, Tabela 13, Tabela 14, Tabela 15 e Tabela 16 mostram o desempenho da modelagem atmosférica para as sub-bacias estudadas, avaliando as seguintes métricas: viés, erro absoluto médio, erro quadrático médio, desvio padrão, coeficiente de variação e *Heidke Skill Score*.

Em todas as sub-bacias os resultados da modelagem atmosférica mostrou erro de viés, mesmo com as correções PDFs realizadas. A sub-bacia1 apresentou menor erro de viés quando analisado a previsão para 1, 2, 21, 45 e 60 dias, A sub-bacia2 para previsão 1, 2, 21 e 120 dias, já a sub-bacia3 mostrou erros insignificantes apenas para 1 e 2 dias, a sub-bacia4 para 45 e 120 dias e pôr fim a sub-bacia5 para 1 e 21 dias. Nos demais conjuntos de previsões determinados na metodologia apresentaram erros significativos, podendo ser explicado pelo fato da discretização espacial da bacia e/ou pela quantidade e/ou qualidade dos dados observados.

Em relação às outras métricas (EAM, EQM os desvios e a razão dos desvios) todas mostraram um baixo desempenho na análise da eficiência da modelagem, entretanto o fator de correlação (R) e o HSS mostraram desempenho razoável para alguns conjuntos de n dias.

As correlações mostraram um melhor desempenho na previsão no intervalo de 30 a 45 dias e para 180 dias em todas sub-bacias, com valores da ordem de 0.61 a 0.73. Esses resultados mostram a deficiência do modelo climático regional na previsão de sistemas meteorológicos atuantes na pré-estação no caso das frentes frias e na fase de pós-estação onde atua as ondas de leste, e mostrando um desempenho razoável da estação chuvosa, período onde a ZCIT é mais atuante.

Paz e Collischonn (2011) testaram vários índices de desempenho de previsão de precipitações na bacia hidrográfica do Rio Grande, e verificaram que a análise das séries temporais dos índices de desempenho possibilitou avaliar a existência de sazonalidade na destreza em estimar ocorrência/não ocorrência de chuva. Além disso, eles retrataram a variação espacial do desempenho e evidenciaram tendências espaciais em superestimar/subestimar a ocorrência de precipitação em porções distintas da bacia.

Tabela 12 – Análise da eficiência modelagem da precipitação na sub-bacia1.

Sub-bacia / Métricas	VIÉS	EAM	EQM	DESVIO (OBS)	DESVIO (SIM)	RAZÃO DESVIO (OBS/SIM)	R	HSS
Sub-bacia1 (1 dia)	1.89	6.42	2.05	7.34	8.89	1.21	0.02	0.16
Sub-bacia1 (2 dias)	3.34	7.82	2.57	7.98	12.04	1.51	0.04	0.13
Sub-bacia1 (10 dias)	6.35	3.06	1.68	23.93	59.33	2.48	0.00	0.06
Sub-bacia1 (15 dias)	1.25	3.92	1.68	32.79	61.37	1.87	0.33	0.11
Sub-bacia1 (21 dias)	5.20	2.64	1.45	49.67	68.15	1.37	0.54	0.23
Sub-bacia1 (30 dias)	-5.32	3.75	1.54	85.14	73.34	0.86	0.73	0.39
Sub-bacia1 (45 dias)	1.97	4.05	1.67	87.34	95.74	1.10	0.59	0.47
Sub-bacia1 (60 dias)	2.13	8.12	2.89	102.88	123.00	1.20	0.46	0.33
Sub-bacia1 (120 dias)	6.05	8.57	3.03	116.92	198.69	1.70	0.53	0.23
Sub-bacia1 (180 dias)	5.43	6.12	3.97	162.82	271.67	1.67	0.73	0.15

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 13 – Análise da eficiência modelagem da precipitação na sub-bacia2.

Sub-bacia / Métricas	VIES	EAM	EQM	DESVIO (OBS)	DESVIO (SIM)	RAZÃO DESVIO (OBS/SIM)	R	HSS
Sub-bacia2 (1 dia)	2.84	8.42	2.41	8.22	11.06	1.35	0.06	0.09
Sub-bacia2 (2 dias)	4.44	0.09	3.01	9.06	14.56	1.61	0.09	0.13
Sub-bacia2 (10 dias)	1.09	3.85	9.78	26.67	45.79	1.72	0.04	0.11
Sub-bacia2 (15 dias)	4.63	9.16	9.37	38.31	48.29	1.26	0.27	0.21
Sub-bacia2 (21 dias)	-0.49	3.69	1.18	60.24	57.32	0.95	0.52	0.32
Sub-bacia2 (30 dias)	-0.29	4.19	1.19	85.48	64.30	0.75	0.54	0.37
Sub-bacia2 (45 dias)	-0.73	6.31	1.05	97.34	85.39	0.88	0.52	0.55
Sub-bacia2 (60 dias)	-10.06	4.67	2.69	126.03	103.89	0.82	0.40	0.43
Sub-bacia2 (120 dias)	-0.38	5.75	2.83	124.59	165.42	1.33	0.44	0.25
Sub-bacia2 (180 dias)	3.94	3.69	3.68	153.77	229.16	1.49	0.61	0.27

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 14 – Análise da eficiência modelagem da precipitação na sub-bacia3.

Sub-bacia / Métricas	VIES	EAM	EQM	DESVIO (OBS)	DESVIO (SIM)	RAZÃO DESVIO (OBS/SIM)	R	HSS
Sub-bacia 3 (1 dia)	2.74	1.25	3.20	13.62	14.42	1.06	0.18	0.07
Sub-bacia 3 (2 dias)	4.29	1.24	4.73	16.02	21.46	1.34	0.03	0.16
Sub-bacia 3 (10 dias)	2.74	1.79	1.86	31.45	70.35	2.24	-0.14	0.03
Sub-bacia 3(15 dias)	1.02	5.73	1.55	46.28	76.29	1.65	0.07	0.12
Sub-bacia 3 (21 dias)	1.92	3.48	1.53	57.50	83.10	1.45	0.38	0.22
Sub-bacia 3 (30 dias)	1.21	1.26	1.32	89.57	103.87	1.16	0.61	0.35
Sub-bacia 3 (45 dias)	1.64	2.92	2.37	116.21	137.72	1.19	0.53	0.49
Sub-bacia 3 (60 dias)	3.05	2.47	2.02	148.50	179.72	1.21	0.41	0.17
Sub-bacia 3(120 dias)	5.92	2.79	4.72	191.98	273.31	1.42	0.46	0.21
Sub-bacia 3 (180 dias)	5.09	5.12	5.64	241.25	374.25	1.55	0.53	0.11

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 15 – Análise da eficiência modelagem da precipitação na sub-bacia4.

Sub-bacia / Métricas	VIÉS	EAM	EQM	DESVIO (OBS)	DESVIO (SIM)	RAZÃO DESVIO (OBS/SIM)	R	HSS
Sub-bacia4 (1 dia)	1.21	1.42	4.00	10.32	16.63	1.61	0.00	0.05
Sub-bacia4 (2 dias)	1.48	1.78	5.06	11.34	22.07	1.95	-0.03	0.05
Sub-bacia4 (10 dias)	2.35	5.14	1.98	27.53	62.15	2.26	-0.27	0.09
Sub-bacia4 (15 dias)	1.69	5.58	1.13	38.34	66.40	1.73	-0.03	0.03
Sub-bacia4 (21 dias)	9.40	5.56	1.07	51.72	75.25	1.45	0.27	0.15
Sub-bacia4 (30 dias)	-2.03	3.81	1.26	77.47	91.10	1.18	0.48	0.35
Sub-bacia4 (45 dias)	2.74	1.77	2.35	104.14	125.99	1.21	0.51	0.53
Sub-bacia4 (60 dias)	4.33	8.19	2.41	145.02	157.75	1.09	0.40	0.43
Sub-bacia4 (120 dias)	0.25	1.60	3.53	159.33	226.24	1.42	0.44	0.21
Sub-bacia4 (180 dias)	3.14	2.39	1.80	202.97	293.63	1.45	0.61	0.19

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 16 – Análise da eficiência modelagem da precipitação na sub-bacia5.

Sub-bacia / Métricas	VIÉS	EAM	EQM	DESVIO (OBS)	DESVIO (SIM)	RAZÃO DESVIO (OBS/SIM)	R	HSS
Sub-bacia5 (1 dia)	2.01	9.58	3.52	10.92	16.53	1.51	0.00	0.12
Sub-bacia5 (2 dias)	4.07	2.52	5.07	11.78	25.49	2.16	-0.03	0.07
Sub-bacia5 (10 dias)	1.29	4.23	1.18	26.51	68.11	2.57	-0.25	0.10
Sub-bacia5 (15 dias)	7.56	3.85	1.73	38.16	71.35	1.87	-0.06	0.21
Sub-bacia5 (21 dias)	2.29	1.99	1.23	48.60	75.58	1.56	0.22	0.23
Sub-bacia5 (30 dias)	-1.53	1.85	1.24	76.88	88.52	1.15	0.55	0.31
Sub-bacia5 (45 dias)	-1.07	1.32	1.75	94.60	121.85	1.29	0.49	0.53
Sub-bacia5 (60 dias)	-1.15	2.29	2.76	126.46	166.11	1.31	0.49	0.25
Sub-bacia5 (120 dias)	4.26	1.19	3.25	157.65	257.47	1.63	0.58	0.19
Sub-bacia5 (180 dias)	4.45	1.67	5.37	209.41	360.64	1.72	0.63	0.27

Fonte: Elaborada pelo autor.

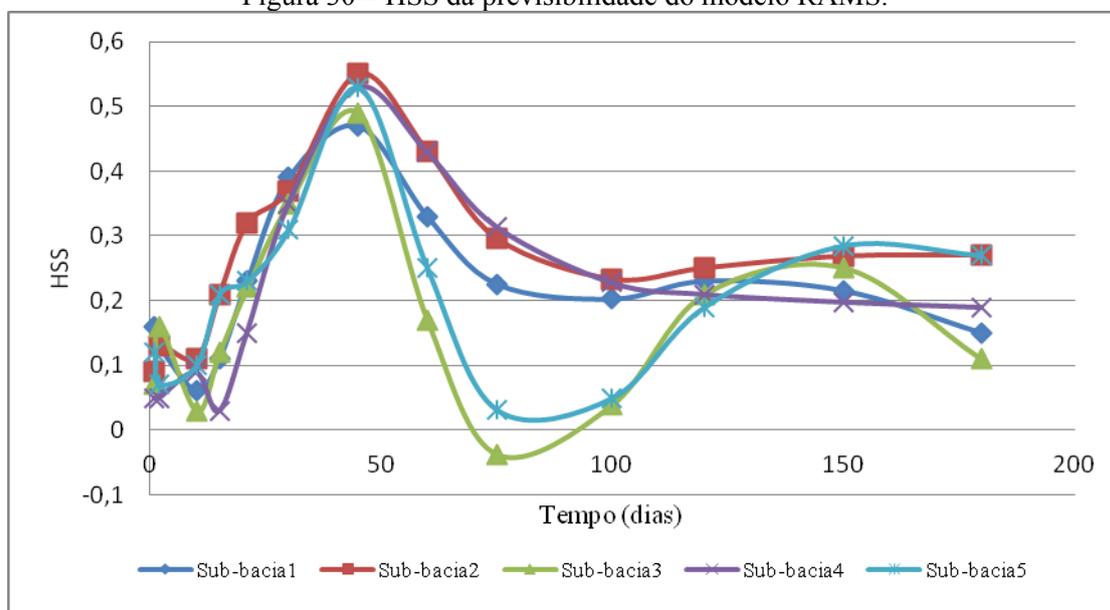
Como um dos objetivos do trabalho é encontrar o ITEMP utilizando o HSS e correlação como métrica principal, os resultados apresentaram resultados razoáveis, mesmo com a discretização espacial das sub-bacias.

A Figura 30 mostra a variação os HSS ao logo do intervalo de tempo, apresentando que os melhores valores de HSS encontram-se no intervalo do vigésimo primeiro dia ao secsagésimo dia, e os valores de HSS com menor habilidade de previsão encontram-se nos primeiros 10 dias da previsão, para todas sub-bacias.

A habilidade típica das previsões sazonais utilizando o HSS que é obtido operacionalmente com base em modelos climáticos globais sobre a superfície é da ordem de 0,10 (MASON *et al.*, 1999).

Os valores do HSS, apresentados na Figura 30, onde valores de HSS de até 10 dias apresentam skill < 0,35; ou seja, o modelo apresenta uma razoável destreza nesse intervalo de tempo. Isso decorre do fato do modelo não prever bem frentes frias, sistema meteorológico atuante nos meses de JAN-FEV. A partir do dia 21 o modelo apresenta valores de HSS satisfatórios em escala de bacias hidrográficas, com HSS > 0, 2. Nota-se, que a partir do intervalo de 30 dias, com HSS > 0,30, e de 45 dias, com HSS > 0,50, o modelo tende a melhorar a habilidade de previsão.

Figura 30 – HSS da previsibilidade do modelo RAMS.



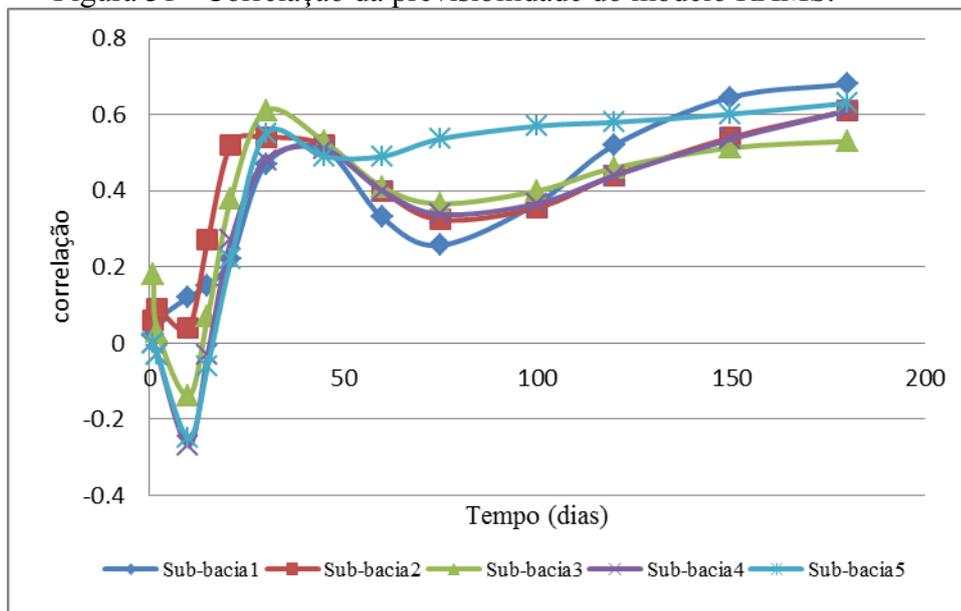
Fonte: Elaborada pelo autor.

Para todas as sub-bacias nota-se a deficiência do modelo em captar alguns sinais de diferentes sistemas meteorológicos, obtendo melhor desempenho na previsão da atuação da ZCIT sobre a região, no período de MAR-ABR.

O valor ótimo procurado encontra-se no intervalo de 45 dias, com HSS variando de 0.47 a 0,55; o que mostra que o modelo nesse intervalo apresenta melhor habilidade em prever as precipitações na bacia do Alto Jaguaribe.

A Figura 31 mostra a variação das correlações ao longo do intervalo de tempo, apresentando que os melhores valores de r encontram-se no intervalo do vigésimo primeiro dia ao secsgésimo dia, e os valores de correlações com menor habilidade de previsão encontram-se nos primeiros 10 dias da previsão, para todas sub-bacias, corroborando com os valores do HSS analisado nas sub-bacias.

Figura 31 - Correlação da previsibilidade do modelo RAMS.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As correlações demonstram mais uma vez que os modelos dinâmicos da precipitação (ECHAM 4.5 e RAMS) utilizados nesse estudo não captam a atuação dos sistemas meteorológicos atuantes na pré-estação e demonstram desempenho satisfatório na estação e na pós-estação.

Analisando pela correlação o ITEMP se dá no intervalo entre o vigésimo primeiro dia ao trigésimo dia, com valores entre 0.52 a 0.73. Entretanto diferente da análise do ITEMP onde a métrica principal é o HSS, as correlações mostraram valores

satisfatório para o intervalo entre o centésimo dia e centésimo octogésimo dia, com correlações entre 0.4 e 0.65 para todas as sub-bacias.

6.3. Modelagem hidrológica

6.4. Análise da sensibilidade dos parâmetros do SMA

A análise de sensibilidade é uma etapa importante para a validação de um modelo hidrológico. O conhecimento da influência dos parâmetros nos resultados do modelo também facilita a calibração do modelo em aplicações futuras

Fleming e Neary (2004) utilizaram a abordagem de parametrização sazonal e constataram melhora no desempenho do modelo. Estes resultados também mostram que a parametrização de um conjunto de parâmetros em função das condições fisiográficas e hidrológicas produziram resultados de simulação que são mais precisos do que um único conjunto de parâmetros.

Os parâmetros de maior relevância física (também de maior sensibilidade no modelo SMA) são o *maximum infiltration*, *impervious*, *soil storage*, *tension storage*, *GW 1 storage*, *GW 1 percolation*, *GW 1 coeff*, *GW 2 storage*, *GW 2 percolation* e *GW 2 coeff*.

O parâmetro *maximum infiltration* representa a capacidade máxima de infiltração do solo, isto é, determina o limite superior da infiltração a partir do armazenamento de água na superfície. O valor desse parâmetro calibrado para a região foi de 1 mm/h, que caracteriza solos cristalinos com pouca argila e solos orgânicos.

O percentual de área impermeável da bacia é representado pelo parâmetro *impervious*. Nenhuma perda é computada em área impermeabilizada e toda a precipitação que cai nessa porção da bacia é computada como excedente e, conseqüentemente, gera escoamento superficial. Com o valor desse parâmetro calibrado no modelo estima-se que 4.2 % da bacia correspondem a áreas impermeáveis.

O armazenamento total de água na camada superior do solo é representado pelo parâmetro *soil storage*, dado em milímetros. Os resultados com o emprego do SMA indicaram para esse parâmetro um valor de 40.6 mm, que representaria um valor médio da capacidade de armazenamento de água no solo na escala das bacias hidrográficas.

Pode notar-se que o armazenamento no solo foi identificado como sendo um parâmetro muito sensível por Fleming e Neary (2004) (na bacia localizada dentro do rio Cumberland nos EUA), Bashar e Zaki (2005) (para a captação de corrente principal do Azul Nilo na fronteira entre o Sudão e a Etiópia) e Ayka, A. (2008) (na sub-bacia dos lagos do vale do Rift na Etiópia).

Além disso, o armazenamento de zona tensão verificou-se ser sensível aos parâmetros por Fleming e Neary (2004); componentes da taxa de percolação do solo e da água subterrânea foram encontrados para serem os parâmetros sensíveis por Ayka, A. (2008) e Bashar e Zaki (2005).

O parâmetro *tension storage* representa o armazenamento matricial no solo, ou seja, a quantidade de água que pode ser armazenada no solo que não é drenada por efeito da gravidade, ou seja, significa o quanto da água armazenada no solo só pode ser removida por evapotranspiração. Esse parâmetro está diretamente relacionado com o armazenamento de água no solo (*soil storage*), uma vez que sempre que o armazenamento no solo exceder o armazenamento matricial (ou seja, $soil\ storage > tension\ storage$), irá ocorrer percolação da camada do solo acima do lençol freático.

A percolação no solo (*soil percolation*) determina o limite máximo de percolação da água armazenada no solo para o lençol subterrâneo. A taxa de percolação real é uma função linear do armazenamento atual no solo e o armazenamento atual na camada superior do lençol. Os demais parâmetros (*GW 1 storage*, *GW 1 percolation*, *GW 1 coeff.*, *GW 2 storage*, *GW 2 percolation* e *GW 2 coeff.*) estão relacionados ao armazenamento e ao escoamento subterrâneo. Esses parâmetros são significativos na representação do período de recessão nos hidrogramas, sendo importantes principalmente para a análise de vazões mínimas nesses rios.

6.5. Calibração e validação do modelo SMA

Após a calibração multiobjetivo do HEC-HMS foram calculados os novos parâmetros do SMA. Os parâmetros calibrados do modelo hidrológico SMA são listados na Tabela 17, após a calibração do modelo os novos valores dos parâmetros foram aplicados para outro período, a fim de validar o SMA, na sub-bacia 5.

Para a análise da eficiência da modelagem hidrológica com o SMA do HEC-HMS, foram utilizadas as seguintes métricas: *Heidke Skill Score*, e o coeficiente de *Nash-Sutcliffe*.

Tabela 17 - Parâmetros calibrados do modelo hidrológico SMA.

Parâmetros	Valor Calibrado	Parâmetros	Valor Calibrado
<i>Soil (%)</i>	0.3	<i>Soil Percolation (mm/hr)</i>	8.4
<i>Groundwater 1 (%)</i>	0.1	<i>GW 1 Storage (mm)</i>	20.5
<i>Groundwater 2 (%)</i>	0.1	<i>GW1 Percolation (mm/hr)</i>	10.8
<i>Max Infiltration (mm/hr)</i>	1	<i>GW1 Coefficient (h)</i>	54
<i>Impervious (%)</i>	4.2	<i>GW 2 Storage (mm)</i>	11.6
<i>Soil Storage (mm)</i>	40.6	<i>GW 2 Percolation (mm/hr)</i>	3.8
<i>Tension Storage (mm)</i>	175	<i>GW 2 Coefficient (h)</i>	45

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 18 mostra o desempenho da modelagem do SMA na fase de calibração com as precipitações observadas para a sub-bacia5, para o período de Janeiro de 1979 a Dezembro de 1995. Nessa fase a modelagem hidrológica apresentou valores de HSS = 0.56 e NS = 0.89 para todo o período da calibração.

Tabela 18 - Eficiência da calibração dos parâmetros do SMA na sub-bacia 5.

Sub Bacia	HSS	NS
5	0.56	0.89

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 19 mostra o desempenho da modelagem do SMA na fase de validação com as precipitações observadas para a sub-bacia5, para o período de Janeiro de 1996 a Dezembro de 2009. Nessa fase a modelagem hidrológica apresentou valores de HSS = 0.48 e NS = 0.67 para todo o período da validação.

Tabela 19 - Eficiência da validação dos parâmetros do SMA na sub-bacia 5.

Sub Bacia	HSS	NS
5	0.48	0.67

Fonte: Elaborada pelo autor.

Segundo Collischonn (2001), valores de NS entre 0,36 e 0,75, como os encontrados nesse estudo são considerados aceitáveis.

García *et al.* (2008), encontraram valores de NS entre 0,52 e 0,79 em seis sub-bacias no norte da Espanha, utilizando o SMA na escala diária, na fase de calibração, para vários eventos de precipitação e valores de NS entre 0,25 e 0,72 na fase de validação do modelo.

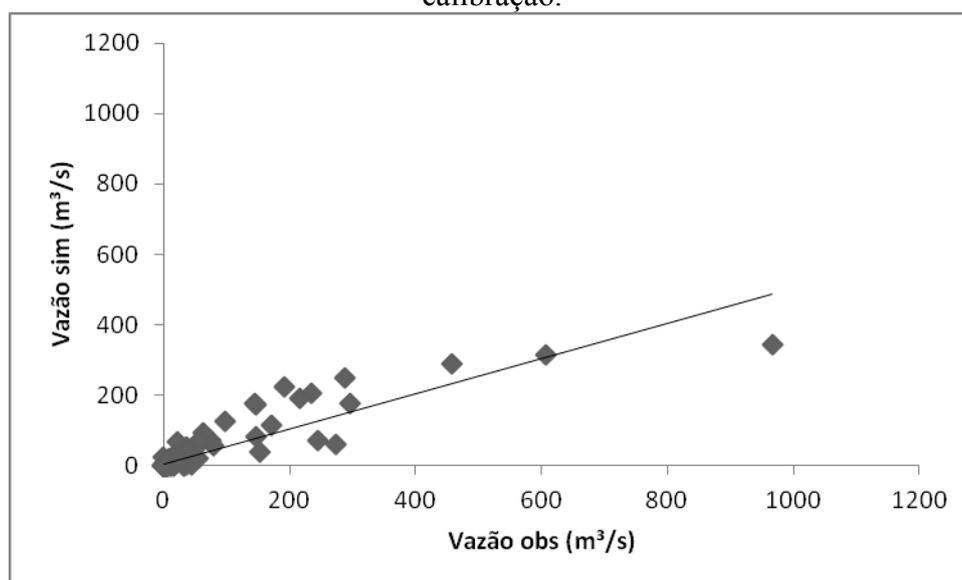
No Nordeste do Brasil o SMA foi aplicado em uma região da zona da mata do Estado de Pernambuco, na bacia hidrográfica do rio Mundaú, em vários eventos por Santos (2013), os resultados da calibração do modelo SMA para o evento de 2000 e validação para os eventos 2008, 1994, 1997 e 2005 mostraram-se satisfatórios, pois, segundo os critérios adotados, o coeficiente de *Nash - Sutcliffe* ficou na faixa considerada aceitável para 1994, e adequado e bom para os eventos de 2000 e 2008.

Verificou-se, pela validação, a eficiência da calibração do modelo por meio da comparação dos hidrogramas observados e estimados pelo SMA do HEC-HMS.

A Figura 32 apresenta o gráfico de dispersão dos dados de vazões observadas versus vazão simulada pelo SMA para todo período de calibração do estudo. Nota-se que valores menores que 150 m³/s tendem a se aproximar em torno da reta 1:1, enquanto valores de vazões >150 m³/s tendem a afastar-se da reta 1:1.

Na fase de calibração o modelo apresentou valor de $R^2 = 0,79$ mostrando que as representações das vazões foram satisfatórias.

Figura 32 - Vazões observadas versus vazão simulada pelo SMA para todo período de calibração.



Fonte: Elaborada pelo autor.

De maneira geral, as séries simuladas apresentam boa consistência com dados observados, com períodos de cheia e estiagem ajustados razoavelmente na estação fluviométrica. A partir dessa análise, pode-se constatar uma boa consistência na parametrização e uma representação eficiente dos processos de propagação pelo modelo. Entretanto, os resultados apresentam problemas pontuais que são discutidos a seguir.

Alguns picos principalmente no começo da série na fase de validação e calibração apresentam valores subestimados quando comparados com as vazões observadas, podendo ser associada à baixa densidade pluviométrica na bacia. Entretanto os maiores picos são bem ajustados pela simulação, tanto na fase de calibração quanto na validação do SMA.

A Figura 33 apresenta o hidrograma da vazão simulada e observada e o hietograma da precipitação média observada, para o período de calibração do modelo SMA do HEC-HMS.

Podemos observar que o hidrograma e o hietograma para o período de calibração considerado, ajustou-se razoável tanto às vazões de pico quanto as no período de recessão, ora antecipando os picos, ora antecipando o período de recessão.

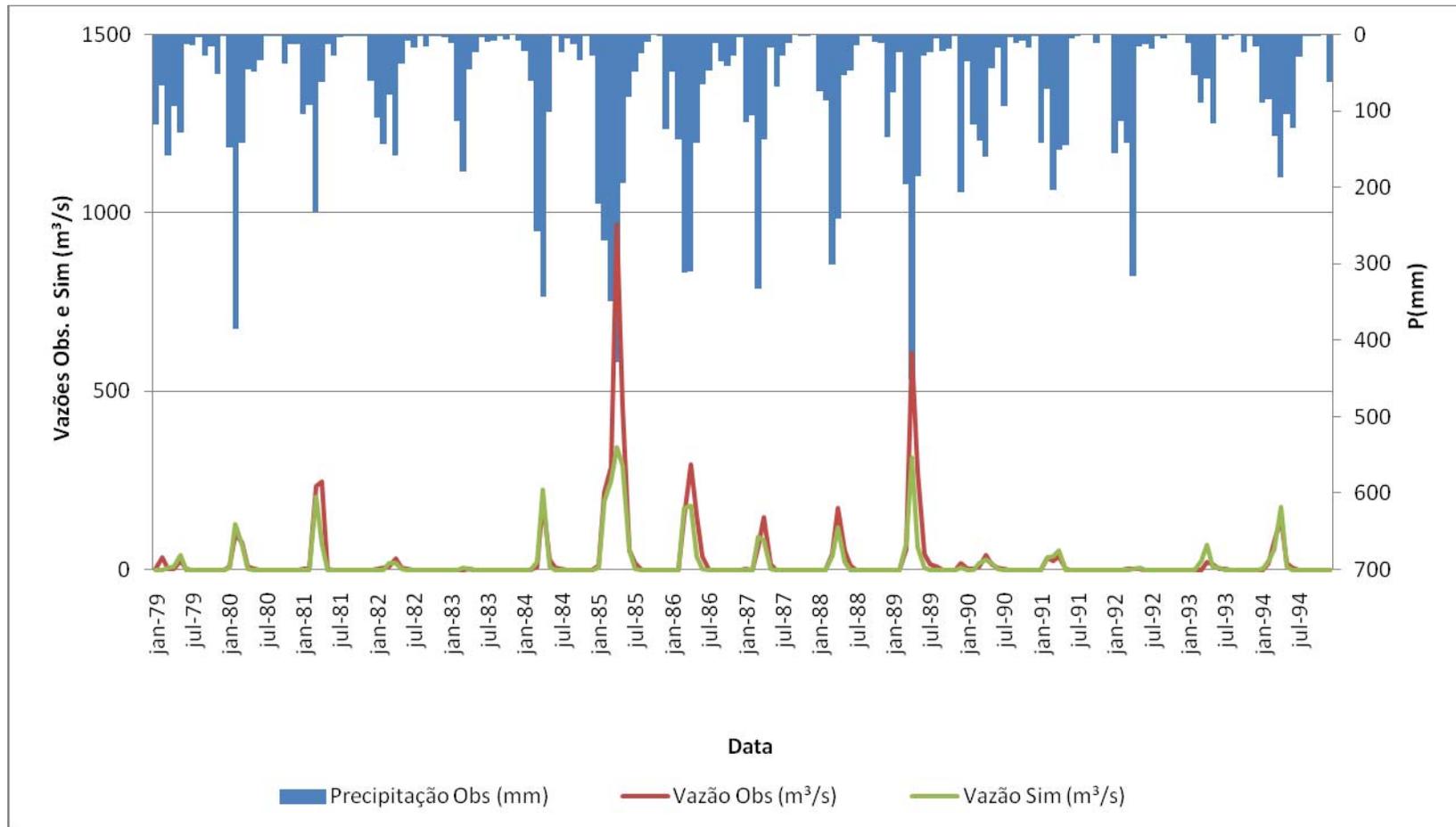
As vazões máximas calculadas acompanharam os picos de vazões medidos e houve a correspondência nos tempos de ocorrência da vazão máxima, corroborando com o estudo de Santos (2013).

Observa-se, inclusive, que as vazões observadas tendem a zero no final do período, alertando a falta de eficiência na simulação de vazões mínimas, provavelmente pela contribuição do armazenamento de umidade no solo.

De maneira geral, as séries simuladas apresentam boa consistência com dados observados, com períodos de cheia e estiagem ajustados razoavelmente na estação fluviométrica. A partir dessa análise preliminar, pode-se constatar uma boa consistência na parametrização e uma representação eficiente dos processos de propagação pelo modelo.

Ainda na fase de calibração o modelo chuva-vazão subestima dois eventos de vazões em 1985 e 1989, onde o modelo mostra deficiência em vazões acima de 400 m³/s e mostra-se eficiente em vazões abaixo de 400 m³/s.

Figura 33 – Hidrograma da vazão simulada e observada e hietograma da precipitação média observada para o período de janeiro de 1979 a dezembro de 1995 na fase de calibração do SMA na sub-bacia 5.

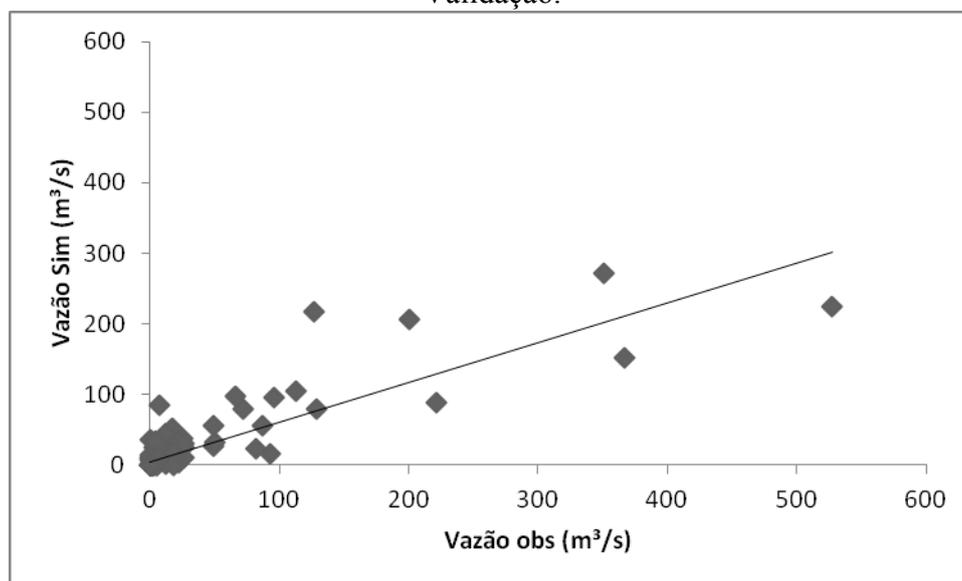


Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 34 mostra que os resultados das simulações de vazões na escala mensal na fase de validação do modelo são satisfatórios e, portanto pode ser aceito para análise, com valores de $R^2 = 0.69$ e com $HSS = 0.48$ e $NS = 0.67$.

Lima e Alves (2009) analisando um *downscaling* dinâmico de precipitação intrasazonal acoplado a modelo chuva-vazão na bacia hidrográfica alto-médio São Francisco, encontraram o valor da eficiência do coeficiente de Nash-Sutcliffe da ordem de -0,16. Notaram também, que as vazões menos intensas foram melhores simuladas, e que alguns picos de vazões observadas na bacia não foram bem capturados na simulação, mesmo com a correção nos dados de precipitação, corroborando com esse estudo.

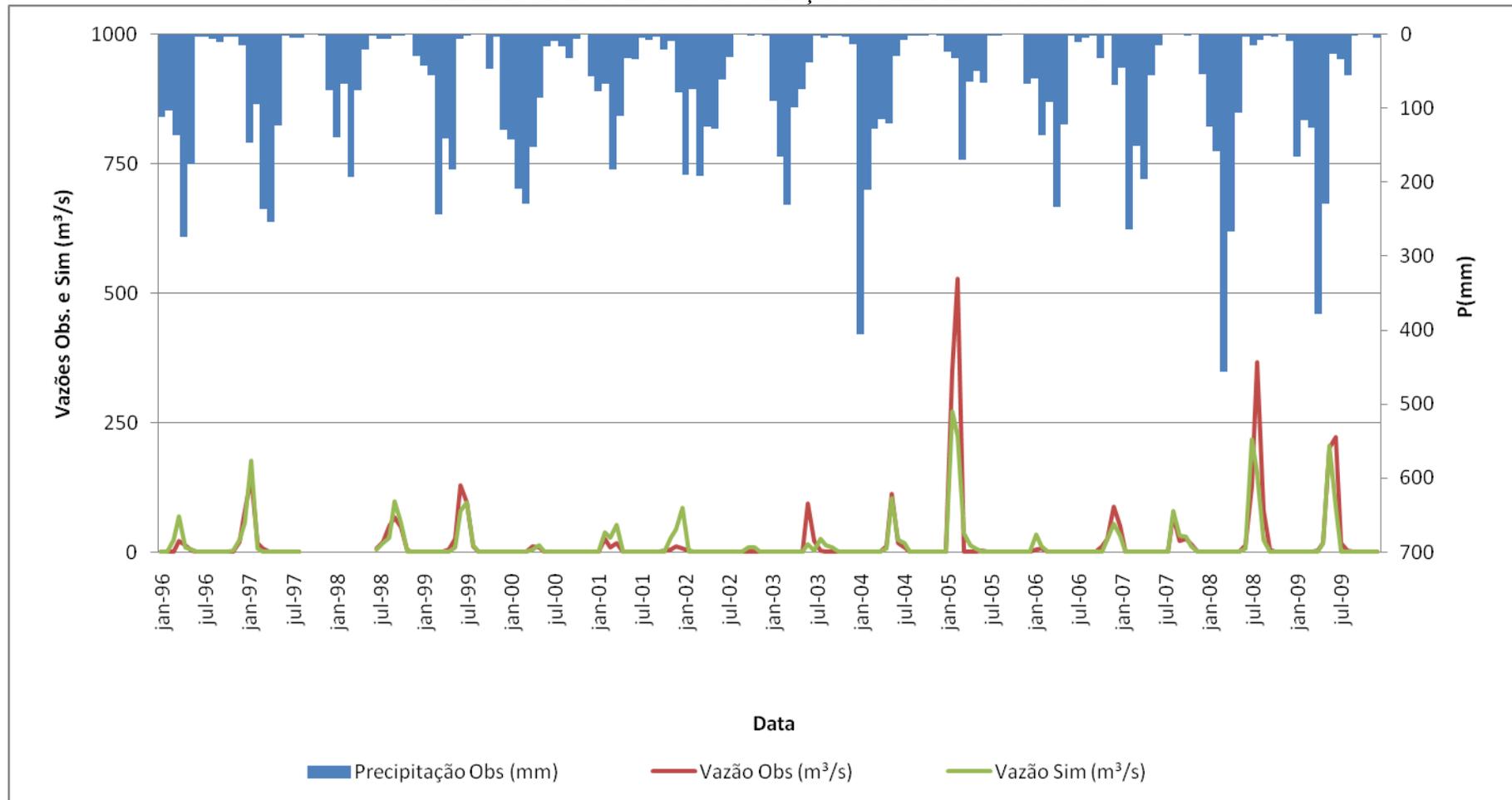
Figura 34 - Vazões observadas versus vazão simulada pelo SMA para todo período de Validação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 35 apresenta o hidrograma da vazão simulada e observada e o hietograma da precipitação média observada, para o período de validação do modelo SMA do HEC-HMS. Nessa fase o modelo apresentou erros na captação dos picos das vazões máximas, em alguns períodos, nos anos de 2001, 2002 e 2003, com vazões de menor intensidade e em 2005 e em 2008, com vazões mais elevadas. Entretanto o modelo representa bem as vazões no segundo semestre do período de validação, mostrando seguir a tendências de baixas vazões na sub-bacia.

Figura 35 - Hidrograma da vazão simulada e observada e hietograma da precipitação média observada para o período de janeiro de 1995 a dezembro de 2009 na fase de validação do SMA na sub-bacia 5.



Fonte: Elaborada pelo autor.

6.6. Acoplamento do modelo climático e hidrológico

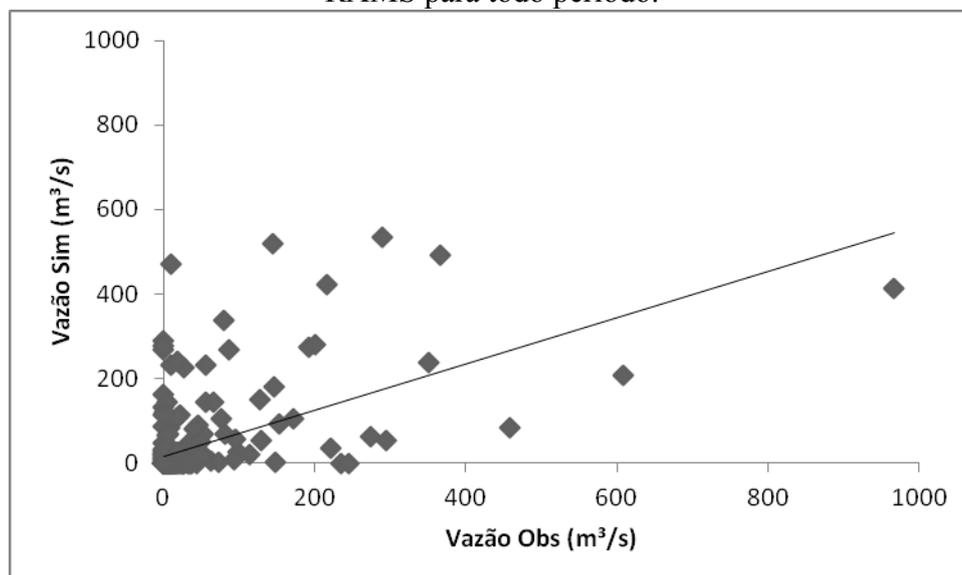
A Figura 36 apresenta as vazões observadas versus vazão simulada pelo SMA com a precipitação do RAMS corrigida com PDF para o período de janeiro de 1979 a dezembro de 2009.

As correlações mostraram valores de $R = 0,48$ para todo período avaliado, mostra um desempenho satisfatório, quando comparado com outros resultados de previsão de vazões forçado com modelos dinâmicos de precipitação no semiárido do Nordeste brasileiro.

Souza Filho e Porto (2003) e Souza Filho e Lall (2003), encontraram valores de correlações da ordem de 0,70 e 0,80 respectivamente, quando compararam vazões mensais observadas e simuladas pelo modelo SMAP utilizando dados de precipitação oriundos de modelos dinâmicos de precipitação em uma bacia hidrográfica do Ceará.

O modelo SMA quando aninhado ao modelo regional RAMS, mostra melhor eficiência nas previsões de vazões da ordem de até $200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{mês}$, e deficiência para vazões $> 200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{mês}$, conforme a Figura 36. Observou-se que o SMA teve melhor desempenho nas vazões menos intensas e pior desempenho nas vazões mais intensas

Figura 36 - Vazões observadas versus vazão simulada pelo SMA com a precipitação do RAMS para todo período.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Segundo Tucci *et al.* (2005) essa variabilidade das vazões pode ser associada à função objetiva de calibração escolhida, que é muito sensível as variações quadráticas das vazões mais intensas.

Essas análises corroboram com o estudo de Alves *et al.*, (2007) que em seus estudos, mostram que os resultados de simulações/previsões de vazões com o uso de modelagem atmosférica apresentam resultados promissores, porém quantitativamente, os erros são ainda significativos em alguns anos quando comparados às vazões observadas.

Possíveis erros principalmente relacionados ao grau de magnitude das vazões simuladas e observadas podem estar associados a vários fatores como, por exemplo: as condições iniciais do modelo climático global e/ou regional, ou o teor de umidade do solo, ou relacionada às incertezas da modelagem hidrológica, ou a qualidade/quantidade dos dados de vazões, ou até mesmo a métrica utilizada para medir a destreza das simulações.

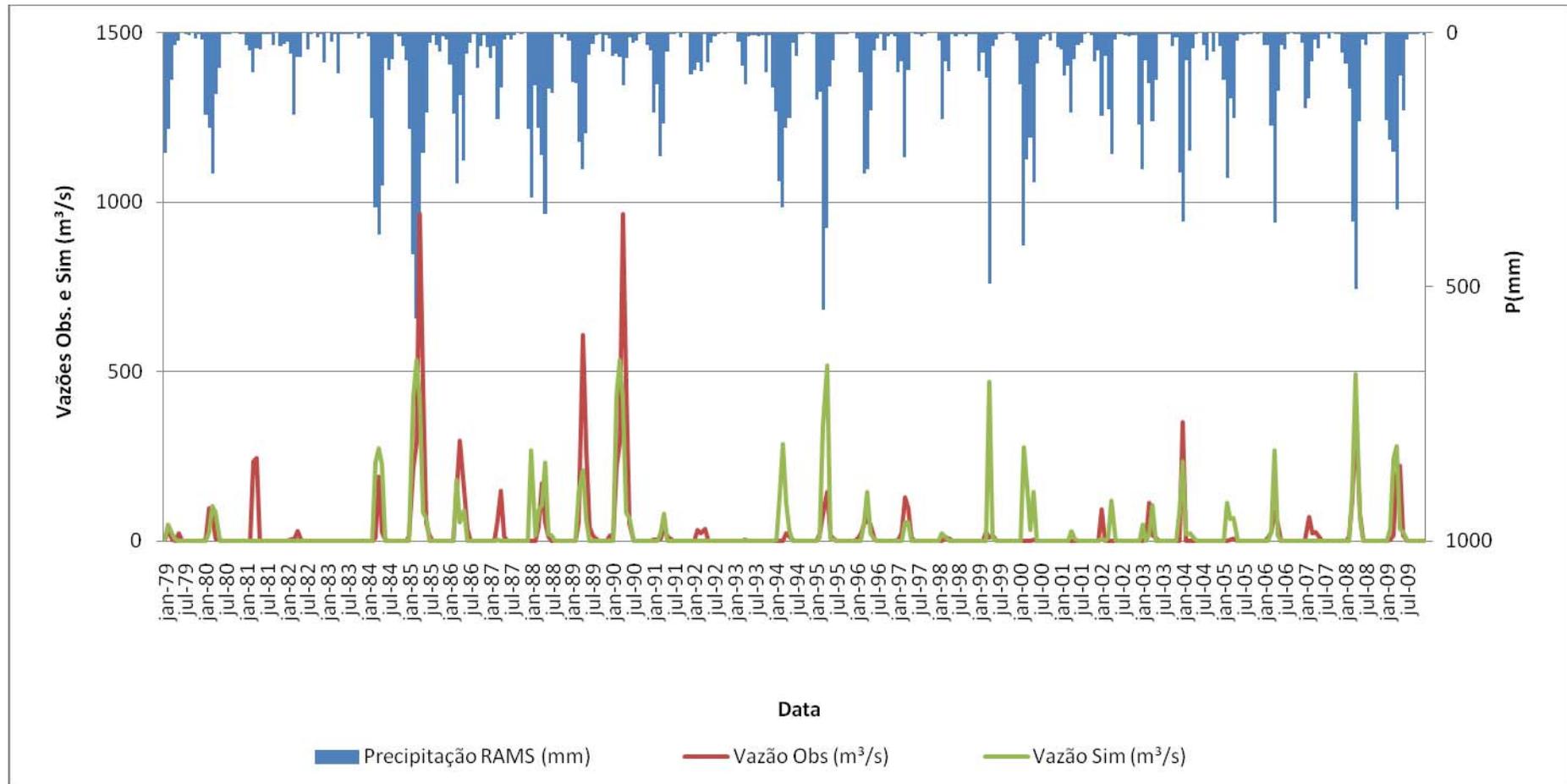
Alves *et al* (2012) analisaram as vazões simuladas pelo SMAP aninhado a um modelo regional de precipitação em uma bacia hidrográfica no semiárido do nordeste brasileiro, com finalidade a operação de reservatório, encontrando valores de correlações superiores a 0.63 com precipitações corrigidas com a função PDF.

A Figura 37 apresenta o hidrograma da vazão simulada e observada e hietograma da precipitação média simulada para o período de janeiro de 1979 a dezembro de 2009 na sub-bacia5, depois das correções PDF na precipitação do modelo regional RAMS na escala mensal.

As vazões mensais na sub-bacia5 simuladas pelo SMA tiveram comportamento razoável, quando forçadas com dados de precipitação do modelo RAMS com as correções PDFs. O modelo representa bem alguns períodos da análise do estudo, principalmente vazões abaixo de 500 m³/s, evidenciando a boa representação da previsão de precipitação em baixa pluviometria. O modelo SMA reproduz os picos na escala de tempo, mas erram na magnitude.

O modelo SMA aninhado ao modelo RAMS subestimou alguns eventos de precipitação tal como: 1985,1986, 1989, 1990 e 2004, e superestimou nos anos de 1994.1995, 1999, 2000, 2005 e 2006.

Figura 37 - Hidrograma da vazão simulada e observada e hietograma da precipitação média simulada para o período de janeiro de 1979 a dezembro de 2009 na sub-bacia 5.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 20 mostra os valores do HSS e do NS na sub-bacia5 para o conjunto de dias analisados, evidenciando os melhores intervalos de tempo de previsão de vazões para melhora a operação do reservatório Orós.

Tabela 20 – Análise da eficiência da vazão simulada pelo SMA forçada pelo modelo RAMS.

Sub-bacia	HSS	NS
Sub-bacia5 (1 dia)	0.12	0.03
Sub-bacia5 (2 dias)	0.16	0.18
Sub-bacia5 (10 dias)	0.22	0.28
Sub-bacia5 (15 dias)	0.25	0.36
Sub-bacia5 (21 dias)	0.32	0.41
Sub-bacia5 (30 dias)	0.38	0.53
Sub-bacia5 (45 dias)	0.53	0.75
Sub-bacia5 (60 dias)	0.41	0.73
Sub-bacia5 (120 dias)	0.38	0.61
Sub-bacia5 (180 dias)	0.32	0.54

Fonte: Elaborada pelo autor.

Valores de HSS da ordem de 0,53 e 0,41 encontram-se no intervalo entre 45 e 60 dias, mostrando por essa métrica que nesse intervalo o modelo tem um melhor desempenho. Analisando o coeficiente de NS, nota que o mesmo corrobora com os valores de HSS, indicando que o mesmo intervalo (45 a 60 dias), o modelo SMA, forçado pelo RAMS com correção PDF, pode servir de ferramenta de apoio às regras de operação do reservatório.

Os resultados apresentados até aqui mostram que existe um potencial na utilização das previsões hidrológicas com antecedência de alguns meses baseadas nas previsões climáticas sazonais de modelos de circulação global aninhado ao modelo regional. Entretanto, a utilização de uma técnica estatística de correção das previsões, com base nas precipitações observadas em um período anterior, pode sugerir que os resultados positivos obtidos são devidos, unicamente, à técnica de correção, e não à qualidade das previsões climáticas.

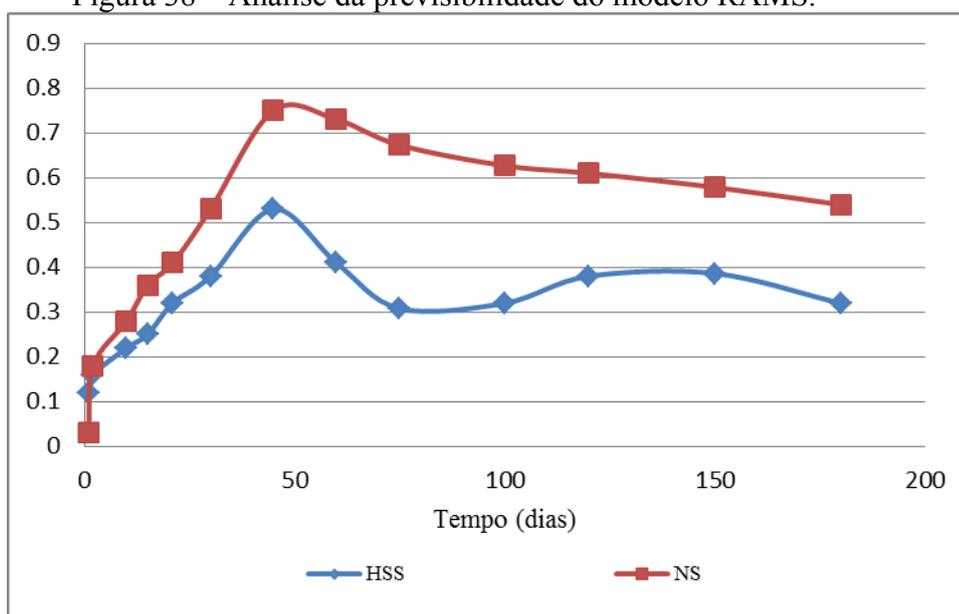
Vale mencionar, que neste estudo não foram executados testes mais rigorosos no período de observações precipitação-vazão nas sub-bacias, que por ventura pudessem

melhorar o valor da função objetivo quando da calibração do modelo hidrológico chuva-vazão. Isto é, não se pretendeu avaliar o valor da função objetivo de calibração do modelo chuva vazão, nem escolha de um período de tempo ideal. Isto porque, como parte do objetivo procurou-se mostrar o potencial da utilização do downscaling, dinâmico com correção na precipitação, acoplado ao modelo hidrológico somente na etapa de calibração.

Logo, procurou-se aproveitar um período de observação nas séries de precipitação e vazão das bacias em estudo, que estivesse compreendido no período da simulação dinâmica de precipitação; e investigar principalmente a diminuição do erro sistemático de precipitação e vazão associado ao uso da correção executada nos de precipitação simuladas pelo RAMS.

A Figura 38 mostra o ITEMP das vazões simuladas pelo SMA aninhada ao modelo climático regional RAMS.

Figura 38 – Análise da previsibilidade do modelo RAMS.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Alves *et al.* (2012) analisando as simulações do modelo hidrológico SMAP, acoplado ao RSM97 para esse mesmo reservatório encontraram correlações da ordem de 0.55, mostrando um potencial da metodologia empregada na região.

6.7. Modelo de operação do reservatório

A eficiência do modelo de cascata para auxiliar a tomada de decisão de operação do reservatório foi avaliada no período de 1979-2009, usando como base as aflúências observadas no reservatório Orós, na estação chuvosa, comparada as aflúências mensais calculadas pelo SIMRES com vazões oriundas do modelo regional RAMS.

As faixas de análises e operação foram de aflúências em hm^3 , $H \leq 500$, $500 < H \leq 1000$ e $H > 1000$, para as aflúências observadas e simuladas pelo SMA aninhado ao modelo RAMS.

Após as simulações das aflúências do reservatório Orós, com o uso do SMA, forçados pelos dados de precipitação observados e simulado pelo RAMS com correções PDFs, analisou as regras de operações com base na modelagem, com $HSS = 0,55$ para as vazões simuladas pelo SMA com a precipitação observada e $HSS = 0,39$ para as vazões simuladas pelo SMA com a precipitação do RAMS.

As simulações das aflúências médias mensal mostraram uma boa correlação quando comparada com as aflúências observadas no reservatório Orós.

Nota-se que o SMA do HEC-HMS quando forçado com dados observados tem um bom desempenho acertando 24 anos dos 31 anos simulados, (77.5%) já o SMA forçado pelo RAMS mesmo com correções PDF, obteve acerto de 19 anos dos 31 simulados (61%).

A Tabela 21 apresenta o número de acertos e falhas da previsão de aflúência do reservatório Orós, com base nas aflúências observadas, onde a célula preenchida com o número 1 (um) indica acerto da previsão e o 0 (zero) indica erro na previsão.

Entretanto erros na previsão da aflúência do reservatório podem esta associada principalmente a deficiência do modelo atmosferico na detectação de sistemas meteorológicos atuantes na região, como por exemplo, a Zona de Convergencia Inter Tropical (ZCIT), principal sistema causador de chuva na região.

Esses resultados corroboram com Galvão *et al.*(2005) que mostraram resultados promissores em escala intra-sazonal para uma dinâmica downscaling da precipitação, juntamente com um modelo de escoamento de chuva e operação do reservatório em duas bacias hidrográficas localizadas na Paraíba e Pernambuco, dois outros estados do NEB.

Georgakakos *et al.*. (2005) mostrou o potencial do uso de simulações para as variáveis climáticas de chuvas e temperatura na faixa de 10 dias em onze bacias

hidrográficas na península coreana. Chandmala e Zubair (2007) estudaram a previsibilidade da vazão e precipitação para a gestão de recursos hídricos no Sri Lanka com base no El Niño-Oscilação Sul (ENOS).

Tabela 21 – Números de acertos e falhas na previsão da afluência do reservatório Orós.

Ano	Q_{sim}	Q_{RAMS}	Ano	Q_{sim}	Q_{RAMS}
1979	1	0	1995	1	1
1980	1	1	1996	1	1
1981	1	0	1997	0	0
1982	1	1	1998	1	1
1983	1	1	1999	0	0
1984	1	1	2000	0	0
1985	1	1	2001	1	1
1986	1	1	2002	1	1
1987	1	0	2003	1	1
1988	0	1	2004	1	1
1989	1	1	2005	1	0
1990	0	0	2006	1	0
1991	0	1	2007	1	0
1992	1	0	2008	1	1
1993	1	1	2009	1	1
1994	0	0	Número de acertos	24	19

Fonte: Elaborada pelo autor.

Onde: (0) é o número de erro do modelo e (1) o número de acerto do modelo.

De modo geral as previsões das afluências obtidas com o SMA do HEC-HMS mostraram resultados aceitáveis, podendo funcionar como uma ferramenta na previsão de afluência em regiões do semiárido.

Tendo como base as simulações da afluência do reservatório Orós pelo SMA, têm-se as seguintes decisões operacionais com base na afluência média no reservatório.

A Tabela 22 mostra as decisões operacionais do reservatório com base nas regras de operação proposta, onde: (1) indica escassez de água deve ser implementada, (2) uso da água com parcimônia e (3) água liberada para atender as demandas.

Tabela 22 – Decisões de operação do reservatório Orós.

Ano	Q_{obs}	Q_{sim}	Q_{RAMS}	Ano	Q_{obs}	Q_{sim}	Q_{RAMS}
1979	1	1	2	1995	3	3	3
1980	2	2	2	1996	2	2	2
1981	3	3	1	1997	3	2	2
1982	1	1	1	1998	1	1	1
1983	1	1	1	1999	1	2	3
1984	3	3	3	2000	1	2	3
1985	3	3	3	2001	1	1	1
1986	3	3	3	2002	2	2	2
1987	2	2	1	2003	2	2	2
1988	3	2	3	2004	3	3	3
1989	3	3	3	2005	1	1	3
1990	2	1	1	2006	2	2	3
1991	2	1	2	2007	2	2	1
1992	2	2	1	2008	3	3	3
1993	1	1	1	2009	3	3	3
1994	1	2	3				

Fonte: Elaborada pelo autor.

Onde: (1) escassez de água (2) uso com parcimônia e (3) atender todas as demandas.

O modelo SMA quando aninhado às precipitações observadas obtiveram melhores resultados para as aflúências acima da média, depois para aflúências na faixa da média e desempenho inferior em aflúências abaixo da média. Já o modelo SMA aninhado ao RAMS, obteve melhores resultados para as aflúências acima da média, em seguida para aflúências abaixo da média e por fim aflúências na faixa da média.

Outro fator importante é que os anos com aflúências mais elevadas casos dos anos de 1984, 1985, 2004, 2008 e 2009, por exemplo, o SMA aninhado ao modelo regional de precipitação mostrou-se eficiente podendo ser uma ferramenta interessante na liberação das águas estocadas em eventos de cheias.

Os anos de baixa aflúência foram representados de forma satisfatória pelo acoplamento dos modelos climáticos e hidrológicos, como por exemplo, 1982, 1983,

1993,1998 e 2001, mostrando ser uma ferramenta importante nas decisões a serem tomadas para a operação do reservatório.

A seguir nas Tabela 23, Tabela 24 e Tabela 25 tem-se as vazões mensais e simulados na escala mensal pelo SIMRES, com base nos dados oriundos do método do DTR, para três diferentes condições iniciais de volume inicial do reservatório Orós, com volume inicial igual a 500 hm³, 1000 hm³ e 1500 hm³.

Tabela 23 – Vazões mensais observado e simulado, com V₀= 500 hm³/mês.

ANO	Observado						Simulado					
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN
1979	465.36	523.65	530.54	529.04	561.38	510.65	1248.3	1272.95	1503.97	1899.75	1913.85	1849.66
1980	468.13	440.15	434.07	423.32	392.18	345.22	1791.01	1769.59	1809.28	1836.14	1805.86	1726.61
1981	324.55	551.14	749.99	770.48	747.23	691.44	1687.94	1715.44	1882.12	1950	1950	1878.37
1982	646.72	620.06	623.04	619.81	588.83	537	1821.26	1799.87	1839.57	1866.43	1836.14	1756.25
1983	495.31	469.96	1082.92	1734.22	1706.54	1631.77	1712.68	1758.97	1950	1950	1949.45	1870.48
1984	1576	1553.52	1585.67	1606.35	1575.94	1501.21	1811.94	1790.52	1830.21	1857.07	1826.79	1746.89
1985	1448.31	1437.29	1481.3	1581.71	1565.19	1491.26	1690.64	1668.16	1730.26	1777.63	1750.9	1675.23
1986	1437.82	1414.32	1439.45	1454.38	1423.82	1353.78	1619.47	1596.98	1629.13	1649.81	1619.4	1544.64
1987	1300.64	1277.14	1302.49	1318.51	1287.95	1220.4	1489.89	1469.7	1566.35	1611.31	1626.67	1554.17
1988	1169.49	1145.15	1164.41	1174.52	1143.86	1077.79	1498.4	1475.46	1504.76	1525.44	1495.03	1424.4
1989	1028.52	1003.34	1041.99	1551.7	1592.11	1528.36	1378.59	1370.56	1427.07	1459.94	1439.46	1372.9
1990	1474.75	1451.31	1476.44	1493.55	1463.03	1392.99	1319.77	1296.26	1321.4	1336.33	1305.77	1237.22
1991	1371.47	1910.98	1950	1950	1950	1950	1186.31	1161.97	1181.23	1191.34	1160.68	1094.61
1992	1934.12	1912.69	1946.05	1946.05	1915.77	1835.87	1044.55	1019.36	1032.72	1037.99	1007.21	945.14
1993	1777.23	1755.81	1950	1950	1950	1950	1136.73	1168.76	1195.98	1210.7	1180.41	1114.34
1994	1891.35	1869.93	1909.62	1936.48	1906.2	1826.31	1063.44	1038.25	1051.61	1056.88	1026.1	964.03
1995	1772.41	1751	1950	1950	1950	1870.1	915.37	916.98	1226.01	1284.53	1279.57	1212.52
1996	1811.46	1790.04	1829.73	1856.59	1826.31	1746.41	1161.61	1137.27	1156.53	1166.64	1135.98	1069.91
1997	1690.21	1667.73	1820.76	1950	1950	1902.13	1924.61	1950	1946.05	1946.05	1915.77	1842.58
1998	1843.48	1822.06	1861.75	1888.61	1858.33	1778.44	1783.93	1762.51	1802.21	1829.07	1798.78	1720.12
1999	1720.51	1698.03	1882.52	1950	1950	1950	1664.35	1641.87	1685.83	1723.24	1692.83	1618.07
2000	1932.65	1933.45	1946.05	1946.05	1915.77	1881.52	1562.3	1539.82	1571.97	1592.65	1562.24	1487.57
2001	1829.24	1814.8	1874.92	1950	1950	1884.78	1434.44	1441.38	1537.66	1784.27	1883.08	1804.28
2002	1826.78	1805.37	1845.06	1871.92	1841.64	1761.74	1745.64	1723.59	1760.29	1787.15	1756.86	1680.82
2003	1704.75	1768.79	1869.11	1950	1922.26	1842.36	1625.05	1789.62	1887.27	1950	1950	1871.23
2004	1783.72	1762.3	1801.99	1828.85	1798.57	1719.93	1812.59	1791.17	1830.86	1857.72	1827.44	1747.54
2005	1664.16	1641.67	1678.78	1706.56	1679.49	1604.72	1693.24	1706.46	1950	1950	1950	1883.04
2006	1548.95	1526.47	1558.62	1579.3	1548.89	1474.76	1826.72	1807.87	1847.56	1874.42	1844.14	1764.24
2007	1421.63	1398.12	1423.56	1496.31	1499.8	1436.47	1707.57	1691.84	1773	1950	1950	1916.67
2008	1384.92	1361.42	1386.55	1401.48	1370.92	1300.87	1863.19	1842.97	1882.7	1909.55	1879.27	1799.38
2009	1576	1553.52	1585.67	1606.35	1575.94	1501.21	1690.64	1668.16	1730.26	1777.63	1750.9	1675.23

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 24 – Vazões mensais observado e simulado, com $V_0=1000 \text{ hm}^3/\text{mês}$.

ANO	Observado						Simulado					
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN
1979	959.01	1019.62	1041.63	1052.53	1085.23	1022.76	1248.3	1272.95	1503.97	1899.75	1913.85	1849.66
1980	974.1	948.91	962.36	967.62	936.85	875.4	1791.01	1769.59	1809.28	1836.14	1805.86	1726.61
1981	847.82	1077	1294.05	1328.61	1305.68	1237.28	1687.94	1715.44	1882.12	1950	1950	1878.37
1982	1186.38	1162.04	1181.3	1191.41	1160.75	1094.68	1821.26	1799.87	1839.57	1866.43	1836.14	1756.25
1983	1045.86	1022.84	1653.93	1950	1922.29	1842.39	1712.68	1758.97	1950	1950	1949.45	1870.48
1984	1783.75	1762.33	1802.02	1828.88	1798.6	1720.01	1811.94	1790.52	1830.21	1857.07	1826.79	1746.89
1985	1665.1	1655.09	1706.09	1811.1	1794.71	1716.94	1690.64	1668.16	1730.26	1777.63	1750.9	1675.23
1986	1661.17	1638.69	1670.84	1691.52	1661.11	1586.35	1619.47	1596.98	1629.13	1649.81	1619.4	1544.64
1987	1530.58	1508.1	1540.43	1562.18	1531.77	1458.78	1489.89	1469.7	1566.35	1611.31	1626.67	1554.17
1988	1405.65	1382.14	1407.28	1422.2	1391.65	1321.6	1498.4	1475.46	1504.76	1525.44	1495.03	1424.4
1989	1268.47	1244.34	1292.15	1808.17	1848.71	1779.84	1378.59	1370.56	1427.07	1459.94	1439.46	1372.9
1990	1723.41	1700.99	1733.14	1759.08	1728.77	1654	1319.77	1296.26	1321.4	1336.33	1305.77	1237.22
1991	1629.84	1950	1950	1950	1950	1950	1186.31	1161.97	1181.23	1191.34	1160.68	1094.61
1992	1934.12	1912.69	1946.05	1946.05	1915.77	1835.87	1044.55	1019.36	1032.72	1037.99	1007.21	945.14
1993	1777.23	1755.81	1950	1950	1950	1950	1136.73	1168.76	1195.98	1210.7	1180.41	1114.34
1994	1891.35	1869.93	1909.62	1936.48	1906.2	1826.31	1063.44	1038.25	1051.61	1056.88	1026.1	964.03
1995	1772.41	1751	1950	1950	1950	1870.1	915.37	916.98	1226.01	1284.53	1279.57	1212.52
1996	1811.46	1790.04	1829.73	1856.59	1826.31	1746.41	1161.61	1137.27	1156.53	1166.64	1135.98	1069.91
1997	1690.21	1667.73	1820.76	1950	1950	1902.13	1924.61	1950	1946.05	1946.05	1915.77	1842.58
1998	1843.48	1822.06	1861.75	1888.61	1858.33	1778.44	1783.93	1762.51	1802.21	1829.07	1798.78	1720.12
1999	1720.51	1698.03	1882.52	1950	1950	1950	1664.35	1641.87	1685.83	1723.24	1692.83	1618.07
2000	1932.65	1933.45	1946.05	1946.05	1915.77	1881.52	1562.3	1539.82	1571.97	1592.65	1562.24	1487.57
2001	1829.24	1814.8	1874.92	1950	1950	1884.78	1434.44	1441.38	1537.66	1784.27	1883.08	1804.28
2002	1826.78	1805.37	1845.06	1871.92	1841.64	1761.74	1745.64	1723.59	1760.29	1787.15	1756.86	1680.82
2003	1704.75	1768.79	1869.11	1950	1922.26	1842.36	1625.05	1789.62	1887.27	1950	1950	1871.23
2004	1783.72	1762.3	1801.99	1828.85	1798.57	1719.93	1812.59	1791.17	1830.86	1857.72	1827.44	1747.54
2005	1664.16	1641.67	1678.78	1706.56	1679.49	1604.72	1693.24	1706.46	1950	1950	1950	1883.04
2006	1548.95	1526.47	1558.62	1579.3	1548.89	1474.76	1826.72	1807.87	1847.56	1874.42	1844.14	1764.24
2007	1421.63	1398.12	1423.56	1496.31	1499.8	1436.47	1707.57	1691.84	1773	1950	1950	1916.67
2008	1384.92	1361.42	1386.55	1401.48	1370.92	1300.87	1863.19	1842.97	1882.7	1909.55	1879.27	1799.38
2009	1783.75	1762.33	1802.02	1828.88	1798.6	1720.01	1498.4	1475.46	1504.76	1525.44	1495.03	1424.4

Fonte: Elaborada pelo autor.

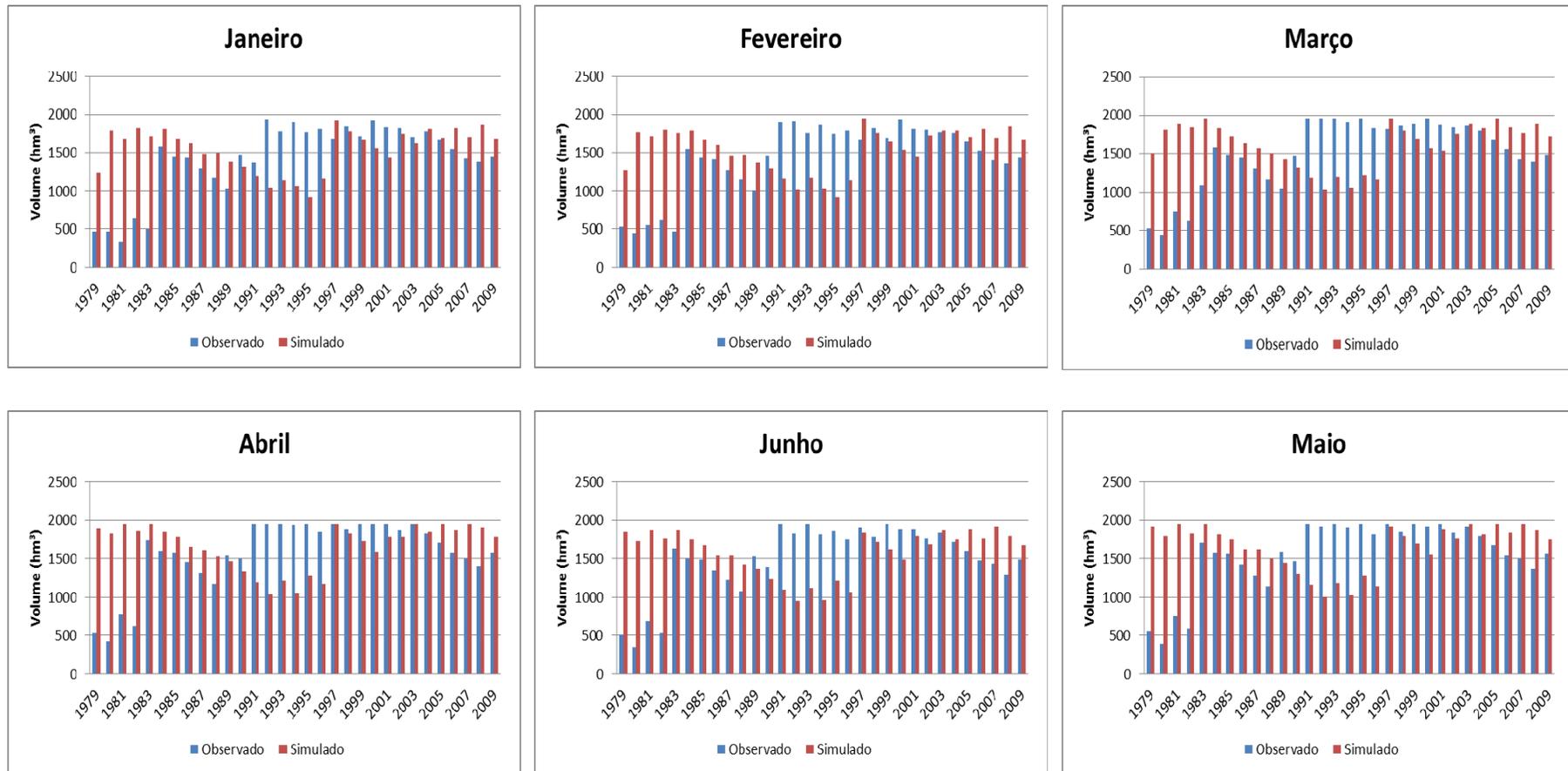
Tabela 25 – Vazões mensais observado e simulado, com $V_0= 1500 \text{ hm}^3/\text{mês}$.

ANO	Observado						Simulado					
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN
1979	1453.86	1516.53	1557.3	1583.58	1616.56	1542.89	1248.3	1272.95	1503.97	1899.75	1913.85	1849.66
1980	1487.13	1463.67	1489.79	1510.47	1480.03	1409.98	1791.01	1769.59	1809.28	1836.14	1805.86	1726.61
1981	1375.89	1607.44	1839.47	1885.96	1863.31	1783.58	1687.94	1715.44	1882.12	1950	1950	1878.37
1982	1725.52	1703.04	1735.27	1761.74	1731.45	1656.68	1821.26	1799.87	1839.57	1866.43	1836.14	1756.25
1983	1602.14	1581.8	1950	1950	1922.29	1842.39	1712.68	1758.97	1950	1950	1949.45	1870.48
1984	1783.75	1762.33	1802.02	1828.88	1798.6	1720.01	1811.94	1790.52	1830.21	1857.07	1826.79	1746.89
1985	1665.1	1655.09	1706.09	1811.1	1794.71	1716.94	1690.64	1668.16	1730.26	1777.63	1750.9	1675.23
1986	1661.17	1638.69	1670.84	1691.52	1661.11	1586.35	1619.47	1596.98	1629.13	1649.81	1619.4	1544.64
1987	1530.58	1508.1	1540.43	1562.18	1531.77	1458.78	1489.89	1469.7	1566.35	1611.31	1626.67	1554.17
1988	1405.65	1382.14	1407.28	1422.2	1391.65	1321.6	1498.4	1475.46	1504.76	1525.44	1495.03	1424.4
1989	1268.47	1244.34	1292.15	1808.17	1848.71	1779.84	1378.59	1370.56	1427.07	1459.94	1439.46	1372.9
1990	1723.41	1700.99	1733.14	1759.08	1728.77	1654	1319.77	1296.26	1321.4	1336.33	1305.77	1237.22
1991	1629.84	1950	1950	1950	1950	1950	1186.31	1161.97	1181.23	1191.34	1160.68	1094.61
1992	1934.12	1912.69	1946.05	1946.05	1915.77	1835.87	1044.55	1019.36	1032.72	1037.99	1007.21	945.14
1993	1777.23	1755.81	1950	1950	1950	1950	1136.73	1168.76	1195.98	1210.7	1180.41	1114.34
1994	1891.35	1869.93	1909.62	1936.48	1906.2	1826.31	1063.44	1038.25	1051.61	1056.88	1026.1	964.03
1995	1772.41	1751	1950	1950	1950	1870.1	915.37	916.98	1226.01	1284.53	1279.57	1212.52
1996	1811.46	1790.04	1829.73	1856.59	1826.31	1746.41	1161.61	1137.27	1156.53	1166.64	1135.98	1069.91
1997	1690.21	1667.73	1820.76	1950	1950	1902.13	1924.61	1950	1946.05	1946.05	1915.77	1842.58
1998	1843.48	1822.06	1861.75	1888.61	1858.33	1778.44	1783.93	1762.51	1802.21	1829.07	1798.78	1720.12
1999	1720.51	1698.03	1882.52	1950	1950	1950	1664.35	1641.87	1685.83	1723.24	1692.83	1618.07
2000	1932.65	1933.45	1946.05	1946.05	1915.77	1881.52	1562.3	1539.82	1571.97	1592.65	1562.24	1487.57
2001	1829.24	1814.8	1874.92	1950	1950	1884.78	1434.44	1441.38	1537.66	1784.27	1883.08	1804.28
2002	1826.78	1805.37	1845.06	1871.92	1841.64	1761.74	1745.64	1723.59	1760.29	1787.15	1756.86	1680.82
2003	1704.75	1768.79	1869.11	1950	1922.26	1842.36	1625.05	1789.62	1887.27	1950	1950	1871.23
2004	1783.72	1762.3	1801.99	1828.85	1798.57	1719.93	1812.59	1791.17	1830.86	1857.72	1827.44	1747.54
2005	1664.16	1641.67	1678.78	1706.56	1679.49	1604.72	1693.24	1706.46	1950	1950	1950	1883.04
2006	1548.95	1526.47	1558.62	1579.3	1548.89	1474.76	1826.72	1807.87	1847.56	1874.42	1844.14	1764.24
2007	1421.63	1398.12	1423.56	1496.31	1499.8	1436.47	1707.57	1691.84	1773	1950	1950	1916.67
2008	1384.92	1361.42	1386.55	1401.48	1370.92	1300.87	1863.19	1842.97	1882.7	1909.55	1879.27	1799.38
2009	1661.17	1638.69	1670.84	1691.52	1661.11	1586.35	1619.47	1596.98	1629.13	1649.81	1619.4	1544.64

Fonte: Elaborada pelo autor.

A seguir são apresentados os comparativos mês a mês para as três condições iniciais do volume inicial do reservatório, conforme a Figura 39, Figura 40 e Figura 41.

Figura 39 – Comparação das vazões observados e calculados na escala mensal, com $V_0 = 500 \text{ hm}^3/\text{mês}$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

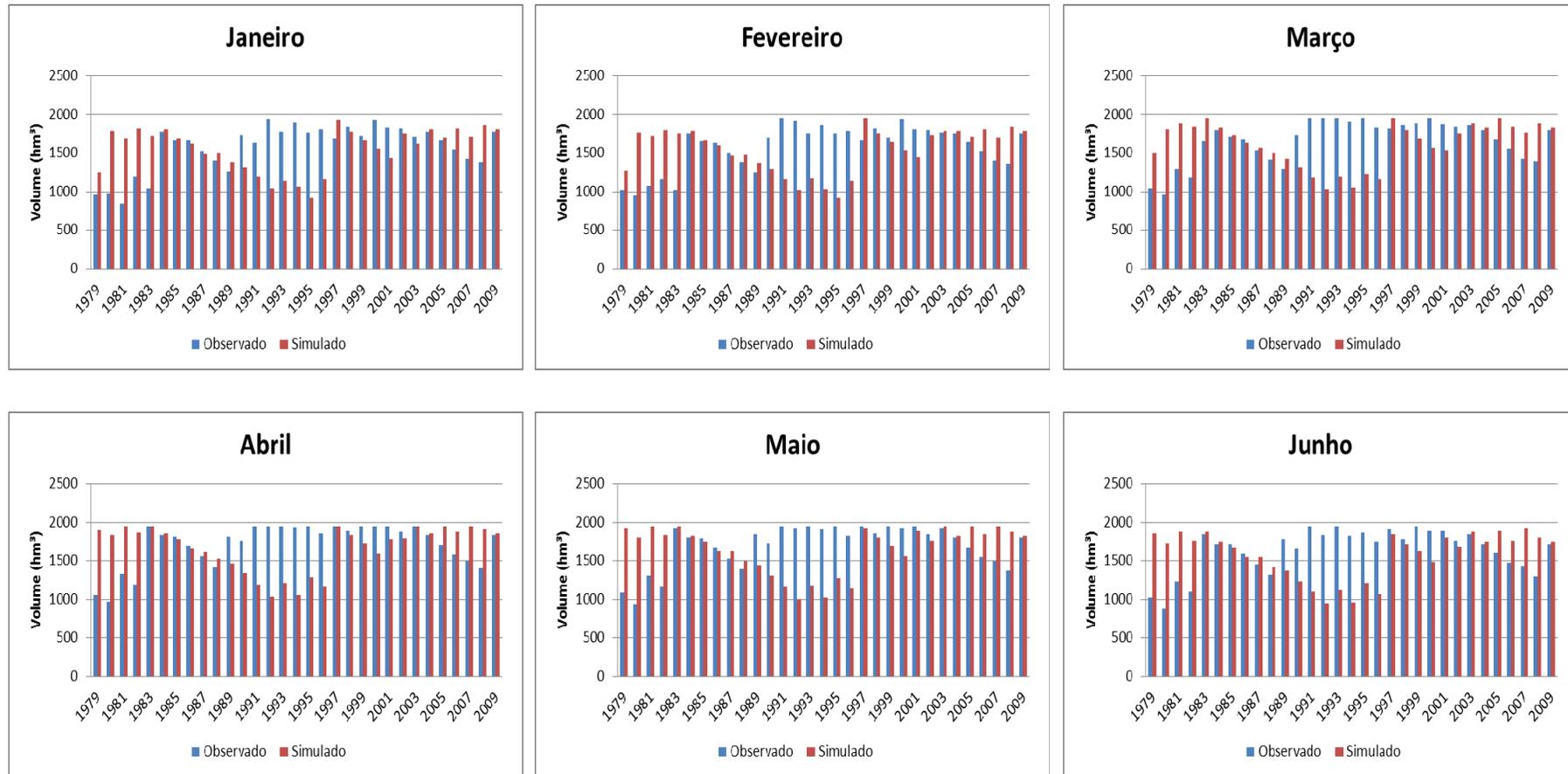
O modelo de operação do reservatório quando iniciado com volume inicial igual a 500 hm³, superestima os volumes simulados aninhados ao modelo RAMS, em todo primeiro semestre dos anos de 1979 a 1983 e subestima entre os anos de 1991 a 1996, e apresenta desempenho razoável durante o resto dos anos analisados, conforme a Figura 39.

A Figura 40 mostra a comparação dos volumes observados e calculados na escala mensal, com volume inicial igual a 1000 hm³. Percebe-se que o modelo representa bem alguns anos de volumes acima da média, como por exemplo, 1984 e 2009, entretanto durante a década de 1990 o modelo subestima em média 250 hm³. Os anos entre 2002 a 2005, o modelo representou de forma satisfatória o volume armazenado no reservatório Orós.

Por fim quando o modelo de operação de reservatório é iniciado com volume inicial igual a 1000 hm³, é onde o modelo representa melhor os volumes estocados, com exceção dos anos da década de 1990, erro esse apresentado em todos os cenários de simulação. A Figura 41 mostra a comparação dos volumes observados e calculados na escala mensal para a condição inicial igual a 1500 hm³.

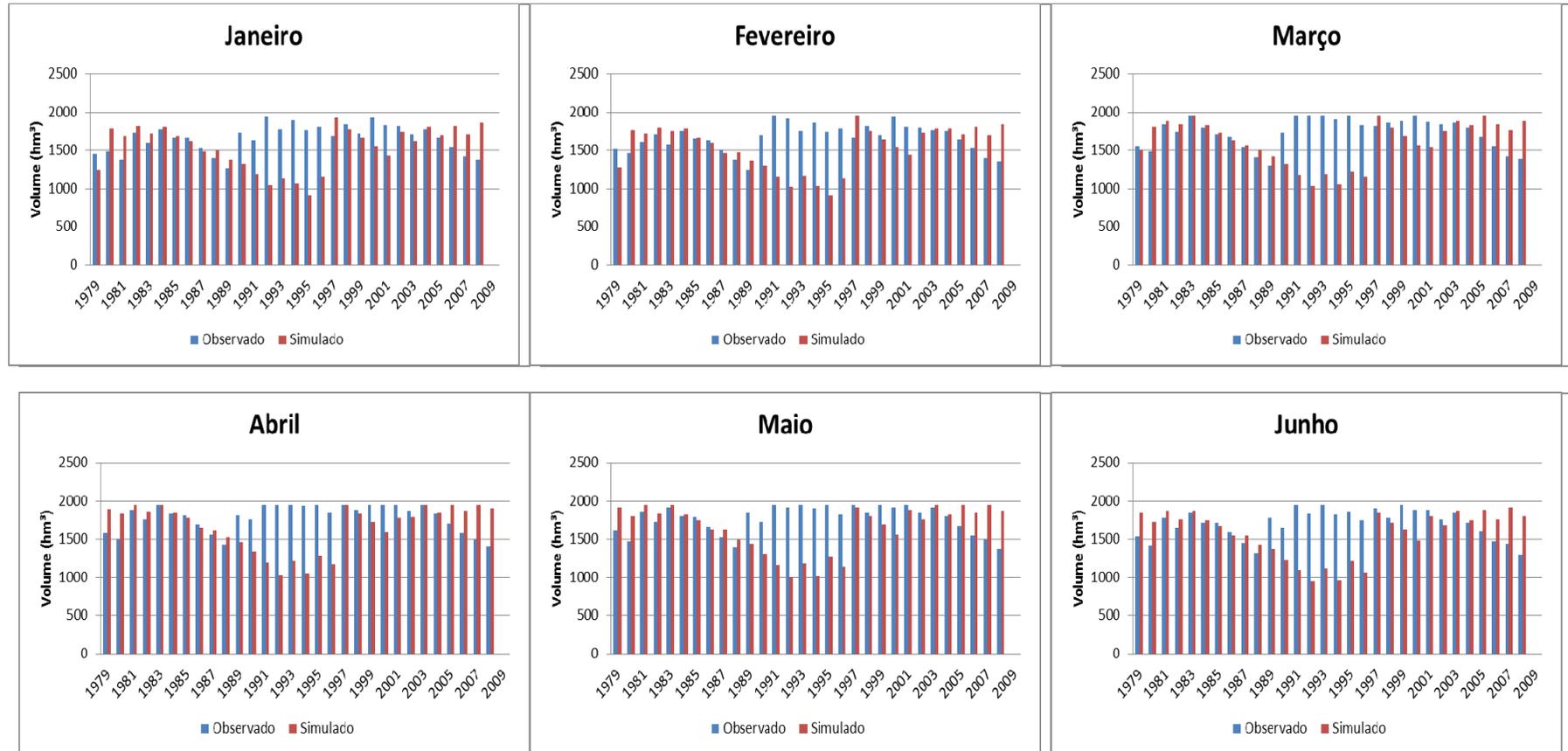
O modelo apresentou tendência de superestimava em alguns anos mais chuvosos, como 2009, por exemplo, esse fato pode se dá pelas condições iniciais da modelagem da atmosfera e/ou dos parâmetros físicos do modelo SMA, ou até mesmo na deficiência do modelo captar alguns sistemas meteorológicos.

Figura 40 – Comparação das vazões observados e calculados na escala mensal, com $V_0 = 1000 \text{ hm}^3/\text{mês}$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 41 – Comparação das vazões observados e calculados na escala mensal, com $V_0 = 1500 \text{ hm}^3/\text{mês}$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Por fim a Tabela 26 e a Tabela 27 mostra a variabilidade do HSS e das correlações na escala mensal, analisando com as diferentes condições iniciais do volume do reservatório.

Tabela 26 – HSS dos volumes estocados no reservatório.

Volume Inicial (hm ³)	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN
500	0.21	0.25	0.30	0.36	0.27	0.23
1000	0.23	0.29	0.31	0.34	0.28	0.19
1500	0.29	0.31	0.37	0.32	0.27	0.22

Fonte: Elaborada pelo autor.

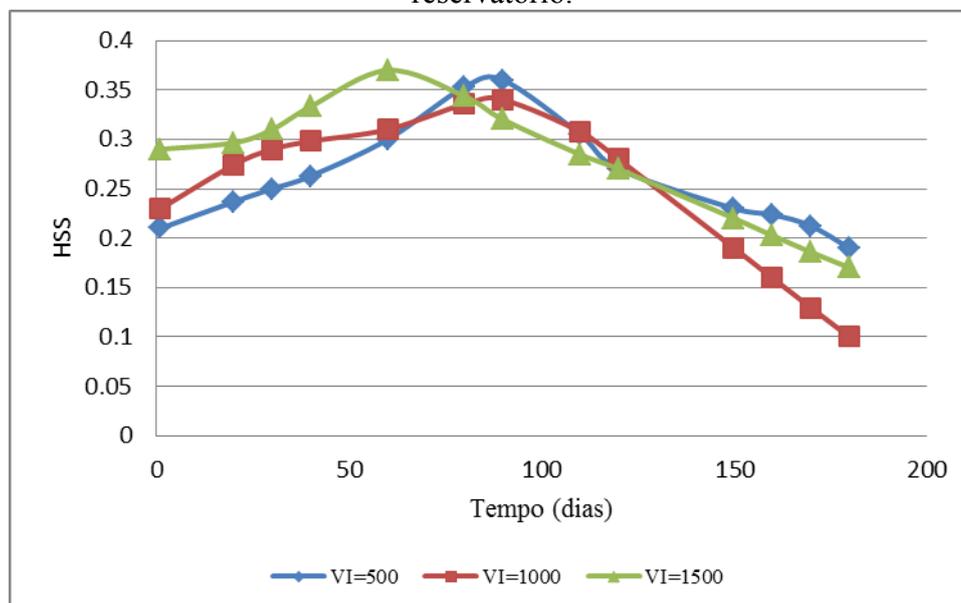
Tabela 27 – Correlação dos volumes estocados no reservatório.

Volume Inicial (hm ³)	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN
500	0.31	0.22	0.37	0.41	0.47	0.34
1000	0.36	0.34	0.45	0.39	0.44	0.41
1500	0.40	0.45	0.51	0.48	0.51	0.58

Fonte: Elaborada pelo autor.

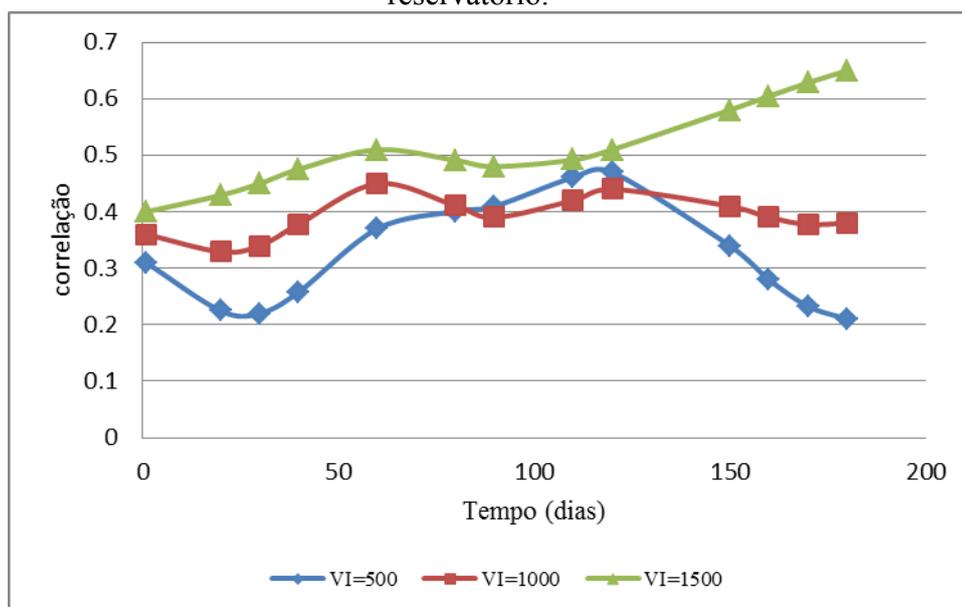
As Figura 42 e Figura 43 mostram o ITEMP dos volumes estocados ao longo do período chuvoso na região de estudo, em função do HSS e das correlações.

Figura 42 – Evolução dos HSS dos volumes calculado e simulado estocados no reservatório.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 43 – Evolução das correlações dos volumes calculado e simulado estocados no reservatório.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se a importância dos volumes iniciais no reservatório, tendo este um impulso na variabilidade do modelo em prevê os volumes estocados ao longo do período chuvoso.

Os resultados corroboram que os meses de março e abril apresentam melhor desempenho da previsão do volume estocado no reservatório, podendo servir como uma ferramenta adicional, para dar suporte as possíveis tomadas de decisões sobre as regras de operação do reservatório.

6.8. Análise dos processos hidroclimáticos

Como um dos objetivos do trabalho foi analisar a variabilidade das métricas HSS e correlações ao longo dos processos hidroclimáticos na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe, optou-se por mostrar os ganhos e perdas das métricas ao longo de cada processo, evidenciando o melhor ITEMP para cada processo, tornando possível um melhor planejamento dos recursos hídricos na região.

A Tabela 28 e a Tabela 29 apresentam de forma sistemática os principais resultados obtidos nas previsões das precipitações oriundas do modelo climático RAMS, das

previsões das vazões pelo SMA aninhado ao RAMS e dos volumes estocados nos reservatórios, com diferentes condições iniciais de volumes.

No processo da transformação da precipitação para a vazão o modelo mostrou ganho em todas as faixas de intervalo de tempo, mostrando ser uma ferramenta adicional no processo de gerenciamento de águas. Tanto na precipitação como nas vazões o melhor ITEMP foi ao dia 45 com valores de HSS da ordem de 0.51 e 0.53 respectivamente.

Os resultados demonstram também a eficiência e deficiência do modelo climático de precipitação na previsibilidade de alguns fenômenos meteorológicos, conforme a variabilidade do ITEMP na escala temporal.

Tabela 28 – Desempenho do HSS ao longo dos processos hidroclimáticos.

HSS	Precipitação (mm)	Vazão (m³/s)	Volume (500 hm³)	Volume (1000 hm³)	Volume (1500 hm³)
1	0.09	0.12	0.21	0.23	0.29
2	0.10	0.16	0.21	0.23	0.29
10	0.07	0.22	0.22	0.25	0.29
15	0.13	0.25	0.23	0.26	0.29
21	0.23	0.32	0.24	0.28	0.30
30	0.35	0.38	0.25	0.29	0.31
45	0.51	0.53	0.27	0.30	0.35
60	0.32	0.41	0.30	0.31	0.37
120	0.21	0.38	0.27	0.28	0.27
180	0.19	0.32	0.19	0.10	0.17

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com relação aos volumes estocados a variabilidade dos HSS, ficou evidenciada ganho para os dias 1 e 2, possivelmente causada pelas condições iniciais do volume inicial do reservatório, e perdas em relação às vazões no restante do intervalo de tempo. No que tange o volume estocado os melhores valores de HSS foram entre os dias 45 e 60, mostrando que o modelo prevê melhor essa variável nesse intervalo de tempo, mostrando ser o melhor ITEMP.

Com relação às correlações a Tabela 29 mostra sua variabilidade e seus ganhos e perdas, na transição dos processos hidroclimáticos.

Tabela 29 – Desempenho das correlações ao longo dos processos hidroclimáticos.

Correlação	Precipitação (mm)	Vazão (m³/s)	Volume (500 hm³)	Volume (1000 hm³)	Volume (1500 hm³)
1	0.05	0.22	0.31	0.36	0.40
2	0.02	0.24	0.30	0.36	0.40
10	-0.12	0.12	0.26	0.34	0.41
15	0.12	0.21	0.24	0.33	0.42
21	0.39	0.22	0.22	0.33	0.43
30	0.58	0.48	0.22	0.34	0.45
45	0.53	0.51	0.29	0.40	0.49
60	0.43	0.55	0.37	0.45	0.51
120	0.49	0.28	0.47	0.44	0.51
180	0.62	0.29	0.21	0.38	0.65

Fonte: Elaborada pelo autor.

No processo da transformação o da precipitação para a vazão o modelo mostrou ganho em algumas faixas de intervalo de tempo, mostrando ser uma ferramenta adicional no processo de gerenciamento de águas. Tanto na precipitação como nas vazões o melhor ITEMP foi entre os dias 45 e 60 com valores de correlação da ordem de 0,58 e 0,55 respectivamente.

Com relação aos volumes estocados a variabilidade das correlações, ficou evidenciada ganho para os dias 1, 2, 10, 15 e 21, possivelmente causada pelas condições iniciais do volume inicial do reservatório, e perdas em relação às vazões no intervalo de tempo entre 30 e 45 dias. No que tange o volume estocado os melhores valores de correlação foram entre os dias 60 e 120, mostrando que o modelo prevê melhor essa variável nesse intervalo de tempo, mostrando ser o melhor ITEMP.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O Intervalo de Tempo de máxima previsibilidade (ITEMP) dá-se para simulações com os intervalos superiores há 1 mês com HSS acima de 0,54, podendo ser usada essa simulação para auxiliar o gerenciamento dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe, no semiárido brasileiro.

O downscaling da precipitação atmosférica mostrou ser uma boa técnica quanto à regionalização de modelos atmosféricos, mostrando ser uma ferramenta promissora na gestão dos recursos hídricos, principalmente quando aplicada técnicas de correções PDFs nas previsões de precipitação a nível de bacias hidrográficas.

O modelo RAMS mostrou índices de desempenho com valores satisfatórios e coerentes com os encontrados na literatura.

O modelo apresenta deficiência no intervalo de tempo de até 10 dias, mostrando ter baixo desempenho para previsão climática em um pequeno intervalo de tempo, e uma destreza superior, com HSS em média maiores que 0,44 para um horizonte maior de tempo.

A metodologia utilizada nesse trabalho identifica o ITEMP, podendo assim auxiliar ao apoio e ao desenvolvimento de ferramentas e no sistema de previsão hidrometeorológicas, sendo predecessor para objetivo futuro, de um acoplamento eficiente do conjunto precipitação-escoamento na bacia do Alto Jaguaribe.

Usando o HSS e o Nash-Sutcliffe (NS) como coeficiente de desempenho da modelagem hidrológica, usando a precipitação observada como forçante, a pesquisa apresentou valores HSS = 0,56 e de NS= 0,89 na fase de calibração HSS = 0,48 e NS=0,67 na fase de validação do modelo. O modelo representou de forma satisfatória as vazões ao longo do período da validação do modelo, representando razoavelmente até os picos de vazões, devido principalmente à função objetiva escolhida para a parametrização do SMA.

Já com o modelo RAMS com as correções PDFs como forçante do SMA os valores de HSS = 0,53 e NS = 0,75, com o ITEMP de 45 dias, mostrando valores satisfatórios na escala de bacias hidrográficas.

Na simulação das aflúncias a fim de definir as decisões de operações do reservatório Orós, o SMA mostrou que pode ser uma ferramenta promissora. O SMA quando forçado com a precipitação observada obteve 77.5% de acerto, já o SMA forçado com o RAMS obteve 61% de acerto nas previsões.

A capacidade de simulação utilizando o SMA do HEC-HMS mostrou-se útil para avaliar as vazões, auxiliando as possíveis demandas dos recursos hídricos e garantindo a vazão mínima regularizada nas regiões do semiárido nordestino.

O modelo SMA mostra ser uma ferramenta útil nas áreas de agricultura e gestão de recursos hídricos, podendo servir como ferramenta para a irrigação no semiárido nordestino.

Os volumes estocados no reservatório na escala mensal foram representados de forma razoável pelo modelo SIMRES, quando este analisado a vazões oriundas de precipitações do modelo RAMS, mostrando ser uma alternativa nessa estimativa.

Em relação aos ganhos e perdas da precisão da previsibilidade de cada processo hidroclimáticos aqui estudado, encontram-se ganhos das vazões em relação à precipitação e uma diminuição da previsibilidade em relação ao volume estocado em comparação as previsões de vazões.

De modo geral para todos os processos o ITEMP foi do intervalo de 30 a 60 dias, mostrando que os processos de precipitação principalmente detém desempenho irregular relacionado a alguns sistemas meteorológicos.

Recomenda-se que em trabalhos futuros que se teste as várias simulações dos modelos climáticos de precipitação, para assim o gestor ter um leque de situações associada aos processos hidroclimáticos.

Verificar os resultados dos processos utilizando outras métricas, variando o número de dias da previsão dos modelos.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDRE, A. B., SOUZA FILHO, F. D. ; CAMPOS, J. B. Incorporação do impacto da rede de reservatórios superficiais artificiais de caráter intranual na modelagem hidrológica chuva-vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídrico**, v.18, n. 2, p.67-82, 2013.
- 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**, v.18, n.2, p.161-180, 2003.
- ALVES, J. M. B. *et al.*. Uma avaliação preliminar de simulações climáticas de um modelo. **Revista Brasileira de Meteorologia**,v. 20, n. 2 ,p. 191-206, 2005.
- ALVES, J. M. B. Um estudo inter-comparativo de previsão sazonal estatísticadinâmica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n.3, p.354-372, 2007.
- ALVES, J. M. B. **Estudo do regime hidrológico no semiárido brasileiro por modelagem dinâmica acoplada: aplicação em gerenciamento de reservatórios**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-Ce, p.1–176, 2008.
- ALVES, J. M. B.; CAMPOS, J. N. B.; NASCIMENTO, L. S. V. Sensibilidade intrasazonal de um downscaling dinâmico de precipitação (1971-2000): uma análise na bacia hidrográfica do açude Castanhão-Ce. **Revista Brasileira de Meteorologia**,v. 23, n. 1 ,p. 73-87, 2008.
- ALVES, J. M. B. ; CAMPOS, J. B. ; SERVAIN, J. Reservoir Management Using Coupled Atmospheric and Hydrological Models: The Brazilian Semi-Arid Case. **Water Resources Management**, v. 26, n. 5, p. 1365-1385, 2012.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil) (ANA). **HidroWeb: sistemas de informações hidrológicas**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb>>. Acesso em: 31 maio 2013.

ARAGÃO, T. G. **Transposição das águas do rio São Francisco para a bacia do rio Paraíba: uma avaliação da sinergia e sustentabilidade hídrica utilizando o modelo de rede de fluxo AcquaNet**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, p .1-125, 2008

ARAKAWA, A. The cumulus parameterization problem: past, present and future. **Journal of Climate**, v.17, n.13, p. 2493-2525. 2004.

BARNES, L. S. A Technique for maximizing Details in Numerical Weather Map Analysis. **Journal of Applied Meteorology**, Washington/US, v.3, p.396-409. 1964.

BASHAR, K.E. E ZAKI, A.F., “SMA Based Continuous Hydrologic Simulation of the Blue Nile” A paper published in the International Conference of UNESCO Flanders FUST FRIEND/NILE Project ”, **Towards a Better Cooperation**”, Sharm El- Sheikh, Egypt, 2005.

BASHAR, K. E. Comparative performance of soil moisture accounting approach in continuous hydrologic simulation of the Blue Nile. **Water Science and Engineering**, v. 5, p.1-10, 2012.

BENNETT, T. H. e PETERS, J. C. Continuous Soil Moisture Accounting in the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). **Water Resources Management**, v.10, p 1-10, 2000.

BENOIT, R.; PELLERIN, P. Toward the use of coupled atmospheric and hydrologic models at regional scale. **Monthly Weather Review**, v. 128, p. 1681-1706, 2000.

BENOIT, R.; KOUWEN, N.; YU, W.; CHAMBERLAND, S.; PELLERIN, P. Hydrometeorological aspects of the real-time ultrafinescale forecast support during the special observing period of the map. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 7, p.877-889, 2003.

BERALDO, J. M.; CORA, J. E.; FERNANDES, E. J. Measurement systems of soil water matric potential and evaluation of soil moisture under different irrigation depths. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 3, p. 467-478, 2012.

BESKOW, S. MELLO, C.R. COELHO, G., SILVA. A.M., VIOLA. M.R. Estimativa de escoamento superficial em uma bacia hidrográfica com base em modelagem dinâmica e distribuída. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 33 , n.1, p. 169-178, 2009.

BESSLER, L. T.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Water reservoir control with data mining. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 129, n. 1, p. 26-34, 2003

BLOCK, P. J. et al. Streamflow Forecasting Framework using Multiple Climate and Hydrological Models.. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 45, n. 4, 2009.

BRAGA, A. C. F. M., GALVAO, C. O., ARAÚJO, E.; SOUZA, E. P., OLIVEIRA, K. F.; CIRNE, W. Acoplamento operacional de modelos atmosféricos, hidrológicos e de gerenciamento de recursos hídricos. In: **Simpósio Internacional de Climatologia**, Fortaleza-CE. [S.l.: s.n.], 2005

CABRAL, S. L.; REIS, R. S. ; FRAGOSO JR, C. R. Avaliação do efeito da urbanização na produção de sedimentos da bacia do rio Jacarecica/AL mediante uso de modelo hidrossedimentológico distribuído. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 37, n.4, p. 1073-1080, 2013.

CABRAL, S.L, CAMPOS, J.N. B, SILVEIRA, C.S, RODRIGUES. J.M. Acoplamento dos modelos RAMS e ECHAM4. 5: o Intervalo de Tempo de Máxima Previsibilidade. **Revista Brasileira de Meteorologia**. 2014. (aceito para publicação).

CABRAL, S.L, CAMPOS, J.N. B, SILVEIRA, C.S. Modelagem de vazões e umidade do solo de uma bacia do semiárido brasileiro: aplicação do modelo *Soil Moisture Accounting* (SMA) do HEC-HMS. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. 2014. (em submissão).

CAMPOS, J.N.B. e STUDART, T. M. C. Drought and water policy in Northeast of Brazil: backgrounds and rationale. **Water Policy**,v. 10, p. 425-438, 2008.

CAMPOS, J. B. **Lições em modelos e simulação hidrológica**. Fortaleza, CE: ASTEF/Expressão Gráfica, 2009. v. 1, p. 166.

CAMPOS, J. N. Modeling the yield evaporation spill in the reservoir storage process: The regulation triangle diagram. **Water Resources Management**.,v.24 ,n.13 ,p.3487-3511 , 2010.

CELESTE, A. B. **Determinação e análise de indicadores de desempenho e de sustentabilidade de seis açudes na bacia do rio Piancó - PB e de suas potenciais demandas**. 2006. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.

CHU, X. e STEINMAN, A. Event and Continuous Hydrologic Modeling with HEC-HMS. **Journal of the Irrigation and Drainage**. En., v.135, n. 1, p. 119-124, 2009.

CHANDMALA J, ZUBAIR L. Predictability of stream flow and rainfall based on ENSO for water resources management in Sri Lanka. **Journal of Hydrology** 335:303–312.2007.

CITEU, J. et al. Position de La zone de convergence a 28°N et température de surface de l'océan. **Veille Climatique Satellitaire**, n. 21, p. 3-7, 1988.

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.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica em grandes bacias**. Porto Alegre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 194p. (Tese Doutorado) 2001.

COSTA, A. A., O. L. MENEZES NETO: **Modelagem de mesoescala da variabilidade climática interanual sobre o nordeste brasileiro**. Anais do III Simpósio Internacional de Climatologia, 2009.

COTTON, W. R. *et al.*. RAMS 2001: Current status and future directions. **Meteorology and Atmospheric Physics**, p. 5-29, 2003.

COX, P., HARRIS, P., HUNTINGFORD, C., BETTS, R., COLLINS, M., JONES, C., JUPP, T., MARENGO, J.A. e NOBRE, C. Increase risk of Amazonian drought due to decreasing aerosol pollution. **Nature** 453: 212-216.2008.

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

DOSWELL, C. A., JONES, R. D. e KELLER, D. L. On summary measures of skill in rare forecasting based on contingency tables. **Weather and Forecasting**, 5, 576-585, 1990.

ESCARIÃO, R. D., MONTENEGRO, S. L., AZEVEDO, J. G., e RIBEIRO NETO, A. **Influência do modelo hidrológico na avaliação da sensibilidade dos recursos hídricos a cenários de mudanças climáticas em região semiárida**. R. Bras. Rec. Hídr, 17(3):81-91.2012.

FLEMING, M., e NEARY, V. Continuous hydrologic modeling study with the hydrologic modeling system. **Journal of Hydrology**. 3:175-183.2004.

FUNCEME. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos do Ceará. www.funceme.br, acesso em 10 de janeiro de 2013.

GALVÃO CO, NOBRE P, BRAGA ACFM, DE OLIVEIRA KF, MARQUES R, DA SILVA SR, FILHO MFG, SANTOS CAG, LACERDA F, MONCUNNIL D (2005) **Climate predictability. Hydrology and water resources over Nordeste Brazil**. In: Wagener T, Franks S, Gupta HV, Bøgh E, Bastidas L, Nobre C, De Oliveira Galvão C (eds) Regional Hydrological Impacts of Climatic Change – Impact Assessment and Decision Making pp 211– 220. IAHS. N.295. British Library, Wallingford. Oxfordshire, UK.

GARCÍA, A., SAINZ, A., REVILLA, J. A., ALVÁREZ, C., JUANES, J. A., e PUENTE, A. Surface water resources assessment in scarcely gauged basins in the north of Spain. **Journal of Hydrology**, 356(3-4):312-326.2008.

GEORGAKAKOS KP, BAE D-H, JEONG C-S. Utility of ten-day climate model ensemble simulations for water resources applications in Korean watersheds. **Water Resources Management** 19:849–872.2005

GODDARD, L.; MASON, J. S.; ZEBIAK, S. E.; ROPELEWSKI, C. R.; BASCHER, R. CANE, M. A. Current approaches to seasonal-to-interannual climate predictions. **International Journal of Climatology**, Londres, v.21, p.1111-1152, 2001.

GOLIAN, S., SAGHAFIAN, B., e FAROKHNIYA, A. Copula-based interpretation of continuous rainfall–runoff simulations of a watershed in northern Iran. **Can. Journal of Earth Science**. 49:681-691.2012.

GYAWALI, R., e WATKINS, D.W. Continuous hydrologic modeling of snow-affected watersheds in the great lakes basin using HEC-HMS. **Journal of Hydrologic Engineering**. 18:29-39. 2013.

HAMILL, T. M.; JURAS,. Measuring forecast skill: is it real skill or is it the varying climatology? **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 2905-2923, 2006.

HARGREAVES, G. H. Estimation of potential and crop evapotranspiration. **Trans. ASAE**, 17:701-404, 1974.

HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in northeast. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 113, n. 435, p. 411-425, 1977.

JASPER,K., KAUFMANN, P.Coupled runoff simulations as validation tools for atmospheric models at the regional scale **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 129, pp. 673–693, 2003.

LANNA, A., e SCHWARZBACH, M. **Modelo Hidrológico auto calibrável - MODHAC**. Porto Alegre: UFRGS.1989.

LÁZARO, Y. M. C.; SILVEIRA, C.S. ; SOUZA FILHO, F. A. **Avaliação do desempenho dos modelos do IPCC-AR4 no nordeste setentrional do Brasil quanto à variabilidade plurianual da precipitação no século XX**. In: IV Simpósio Internacional de Climatologia, 2011, João Pessoa. Mudanças climáticas e seus impactos em áreas urbanas, 2011.

LEÃO, R. A., SOARES, A. A., TEIXEIRA, A. D., e DA SILVA, D. D. Georeferenced database generation with the purpose of hydrologic modeling in reservoirs of the hydrographic basin of Jaguaribe river in the state of Ceará, Brazil. **Revista Engenharia Agrícola**. 33(2),388-401.2013.

LELIS, T.A., CALIJURI, M.L., SANTIAGO, A.F., LIMA, D.C., ROCHA, E.O. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em uma bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, 36:623-634.2012.

LIMA, H. V. C., LANNA, A. E. L. Modelos para Operação de Sistemas de Reservatórios: Atualização do Estado da Arte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.10, n. 3, p.5-22, 2005.

LIMA, J. P. R., ALVES, J. M. B. Um estudo de downscaling dinâmico de precipitação intrasazonal acoplado a modelo chuva-vazão na bacia hidrográfica alto-médio São Francisco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.3, 323-338, 2009.

LOPES, J., BRAGA JR., B., e CONEJO, J. **Simulação hidrológica: aplicações de um modelo simplificado**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, III., Fortaleza, 1981. Anais...Fortaleza Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1981.p 42-62.

LOUCKS, D.P. e VAN BEEK, E. “Water Resources Systems Planning and Management: An **Introduction to Methods, Models and Applications**”. Paris. Unesco Publishing, 2005

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, p.59-80. 1981

KING, K. W.; ARNOLD J. G.; WILLIAMS, J. R.; SCRINIVASAN R. Soil and Water Assessment Tool – SWAT. USDA, **Agricultural Research Service**, 1996. 450p.

KOCH, R., e BENE, K. Continuous hydrologic modeling with HMS in the Aggtelek Karst region. **Hydrology**, 1:1-7, 2013.

KULIGOWSKI, R. A. self-calibrating real-time GOES rainfall algorithm for short-term rainfall estimates. **Journal of Hydrometeorology**, 112-130, 2002.

KWON. H.H., SOUZA FILHO., F.A., BLOCK. P., SUN., L., Lall., U., REIS JR., D.S. Uncertainty assessment of hydrologic and climate forecast models in Northeastern Brazil. **Hydrological Processes**. v26, p: 3875–3885. 2012.

MACHADO, RUBINEI DORNELES e ROCHA, ROSMERI PORFÍRIO DA. Previsões climáticas sazonais sobre o Brasil: avaliação do RegCM3 aninhado no modelo global CPTEC/COLA. **Revista Brasileira de Meteorologia**. [online]. 2011, vol.26, n.1, pp. 121-136. ISSN 0102-7786.

MAIDMENT D. R., **GIS and Hydrologic Modeling**, Environmental Modeling with GIS Oxford University Press, pp.147 – 167. 1993.

MARENGO JA **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. 7–20

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**. 12p. 2005

MARENGO, J. A.; SOARES, W. R. **Impacto das mudanças climáticas no Brasil e Possíveis Cenários Climáticos: Síntese do Terceiro Relatório do IPCC de 2001**. CPTEC-INPE, p. 29 2005.

MARENGO J.A., VALVERDE, MARIA C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. **Revista Multiciência** Campinas, v. 8 Maio 2007.

MARENGO J.A., NOBRE, C., TOMASELLA, J. e CARDOSO, M.M.. Oyama Hydro-climatic and eco-logical behaviour of the drought of Amazonia in 2005. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **Biological Sciences** 21: 1-6. 2008b.

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; BETTS, R.; KAY, G.; ALVES, L. M.; TORRES, R.; SANTOS, D. Development of regional climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: Part 1 Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Parana River Basins. **Climate Dynamics**, 2010.

MASON, S.J., GODDARD, L., GRAHAM, N.E., YULAEVA, E., SUN, L., ARKIN, P.A. **The IRI seasonal climate prediction system and the 1997/98 El Niño event**. *Bulletin of the American Meteorological Society* 80, 1853–1973, 1999.

MESINGER, F. Bias Adjusted Precipitation Threat Scores. **Advances in Geosciences**, 137-142, 2008.

MILLER, N. L. *et al.*. Downscaled climate and streamflow study of the southwestern United States. **Journal American Water Resources**, 1525-1537, 1999.

MOLDERS, N.; RUHAAK, W. On the impact of explicitly predicted runoff on the simulated atmospheric response to small-scale land-use changes-an integrated modeling approach. **Atmospheric Research**, v. 63, p. 338, 2002.

MOLION, L. C. B; BERNARDO, S. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro (RJ), v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.

MOLTENI, F., BUIZZA, R., PALMER, T.N., PETROLIAGIS, T. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. **Journal of the Royal Meteorological Society**. v. 122, p. 73-119, 1996.

MOURA, A. D.; J., S. On the Dynamics of Droughts in Northeast Brazil: Observations, Theory, and Numerical Experiments With a General Circulation Model.. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 38, p. 2653-2675, 1991.

NASH, J. E., e SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models, Part I — A Discussion of principles. **Journal of Hydrology**, 10:282-290.1970.

NOBRE, P.; MOURA, A. D.; SUN,. Dynamical Downscaling of Seasonal Climate Prediction over Nordeste Brazil with ECHAM3 and NCEP's Regional Spectral Models at IRI. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 2787-2796, 2001.

OLIVEIRA, K. F. **Previsão de vazão em uma bacia do semiárido usando previsões climáticas numéricas de precipitação**. 277 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Campina Grande-PB. 2006.

OLIVEIRA, R. e LOUCKS, D.P. "Operating Rules for Multireservoir system". **Water Resources Research**, Vol. 33, n. 4, p.839-852, 1997.

PAZ, A. R. D.; COLLISCHONN, W. Avaliação de estimativas de campos de precipitação para modelagem hidrológica distribuída. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 109-120, 2011.

PIELKE, R. A. *et al.*. A comprehensive meteorological modeling system – RAMS. **Meteorology and Atmospheric Physics**, 69-91, 1992.

PONCE, V. M., and HAWKINS, R. H. “Runoff curve number: Has it reached maturity?” **J. Hydrol. Eng.**, 1_1_, 11–19. 1996

ROECKNER, E., AND COAUTHORS, **The atmospheric general circulation model ECHAM4: Model description and simulation of present-day climate**. Max Planck Institut für Meteorologie Rep. 218, Hamburg, Germany, 90 pp.1996.

SALDANHA, B. C. **Previsão de longo prazo da umidade do solo na bacia do rio Uruguai**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. 173p. (Tese de Doutorado).

SANKARASUBRAMANIAN, A., LALL, U., SOUZA FILHO, F.A., SHARMA, A. Improved water allocation utilizing probabilistic climate forecasts: Short-term water contracts in a risk management framework. **Water Resources Research**. V 45, P 1-18.2009.

SANTIAGO DE MARIA, **Modelagem numérica em alta resolução para previsão de geração de Energia Eólica Ceará**. Universidade Estadual do Ceará, 2007. 122p. Dissertação de Mestrado.

SANTOS, A. K. **Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude. Estudo de caso: bacia do rio Mundaú**. Recife. Universidade Federal de Pernambuco, 2013. 126p. (Dissertação de Mestrado)

SANTOS, V. da S. **Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Análise de Sistemas de Recursos Hídricos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

SILVA FILHO VP **Previsão de vazão no Semiárido Nordeste utilizando modelos atmosféricos**: Um estudo de Caso. PhD - Tese – Universidade Federal do Ceará - Fortaleza-Ce. p105.2005.

SILVEIRA, C. S. *et al.*. Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século xx sobre a região nordeste do Brasil, Amazônia e bacia do Prata e análise das projeções para o cenário RCP8.5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 317-330, Setembro 2013. ISSN 0102-7786.

SILVEIRA, C.S. Modelagem integrada de meteorologia e recursos hídricos em múltiplas escalas temporais e espaciais: aplicação no Ceará e no setor hidroelétrico brasileiro. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Fortaleza, 2014.

SOUZA FILHO, F.A.; LALL, U. Modelo de Previsão de Vazões Sazonais e Interanuais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** v. 9, n. 2, p.61-74, ABRH, Porto Alegre, 2004.

SOUZA FILHO, F. A.; LALL, U. Seasonal to Interannual Ensemble Streamflow Forecasts for Ceara, Brazil: Applications of a Multivariate, Semiparametric Algorithm. **Water Resources Research**, v. 39, n. 11, p. 1307-1320, Novembro 2003. ISSN doi:10.1029/2002WR001373.

SOUZA FILHO, F.A.;MOURA,A.D. **Memórias do Seminário Natureza e Sociedade nos Semi-Áridos**. Fortaleza:Banco do Nordeste do Brasil; Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 332p.,2006

STEPHENSON, D. B. Use of the “odds ratio” for diagnosing forecast skill. **Weather and Forecasting**, 221-232, 2000.

SUN, L. *et al.*. Climate Downscaling over Nordeste, Brazil, Using the NCEP RSM97. **Journal of Climate**, 15 551-567, 2005.

TAVARES, P. R. L.; CASTRO, M. A. H. de. **Simulação de Perfis D'água e Planícies de Inundação relacionados a Diferentes Cenários de Urbanização**. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005.

TOTH, Z., KALNAY, E. Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. Bull. Am. **Journal of the Royal Meteorological Society**., v. 74, p. 2317-2330, 1993.

TRIPOLI, G.J., and W.R. COTTON. **The Colorado State University three-dimensional cloud/mesoscale model – 1982**. Part I: General Theoretical framework and sensitivity experiments. J.de Rech. Atmos., 16, 185-220. 1982:

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 669 p.1998.

TUCCI, C. E. M.; SILVA, B. C. DA; COLLISCHONN, W. Previsão de vazão de longo prazo na bacia do Rio São Francisco III: Previsão de vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. 13p. 2005.

TUCCI, C.E.M. (2009) **A Elasticidade da Vazão**. Disponível em: <[http://blog.rhama.net/2009/02/01/a-elasticidade-da -vazao](http://blog.rhama.net/2009/02/01/a-elasticidade-da-vazao)>. Acesso em: 25 abril 2013.

WALKO, R. L. *et al.*. Coupled Atmosphere–Biophysics–Hydrology Models for Environmental Modeling. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 931-944, 2000.

WILKS, D. S. Statistical methods in the atmospheric sciences. 2. ed. San Diego: **Academic Press**, v. 91, 2006.

WURBS, R.A. “Modeling and Analysis of Reservoir Systems Operation”. **Prentice Hall. Englewood Cliffs, N.J.**, 1996.

WURBS, R. A. Comparative Evaluation of Generalized River/Reservoir System Models. Technical Report n. 282. Texas **Water Resources Institute**, 2005