



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

N.º de ordem: MET-UFAL-MS-094.

MIKAEL TIMÓTEO RODRIGUES

**“ACOPLAMENTO DO MODELO HIDROLOGICO MGB AO MODELO
ATMOSFERICO WRF VISANDO ESTIMAR VAZÃO NA BACIA DO RIO PARAIBA
DO MEIO – AL/PE”**

Maceió

2012

MIKAEL TIMÓTEO RODRIGUES

**“ACOPLAMENTO DO MODELO HIDROLOGICO MGB AO MODELO
ATMOSFERICO WRF VISANDO ESTIMAR VAZÃO NA BACIA DO RIO PARAIBA
DO MEIO – AL/PE”**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Instituto de Ciências Atmosféricas da
Universidade Federal de Alagoas como
requisito para obtenção do título de Mestre
em Meteorologia

Orientador: **Prof. Dr. Ricardo Ferreira de
Carlos Amorim**

Coorientador: **Prof. Dr. Rosiberto
Salustiano da Silva Jr**

Maceió

2012

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale

R696a Rodrigues, Mikael Timóteo.
Acoplamento do modelo hidrológico MGB ao modelo atmosférico WRF visando
estimar vazão na bacia do rio Paraíba do Meio-AL/PE / Mikael Timóteo Rodrigues.
– 2012.
98 f. : il., grafs., tabs.

Orientadora: Maria Luciene Dias de Melo.

Dissertação (mestrado em Meteorologia : Processos de Superfície Terrestre) –
Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió,
2012.

Bibliografia: f. 85-93.

Apêndices: f. 94-98.

1. Precipitação (Meteorologia).
 2. Precipitação máxima diária. – São Paulo (SP).
 3. Cluster, Análise de.
 4. Gumbel, distribuição de.
 5. Mann-Kendall, teste de.
- I. Título.

CDU: 551. 501



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

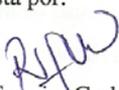
N.º de ordem: MET-UFAL-MS-094.

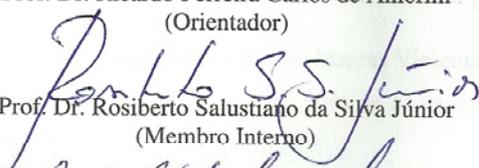
*“ACOPLAMENTO DO MODELO HIDROLÓGICO MGB AO MODELO
ATMOSFÉRICO WRF VISANDO ESTIMAR VAZÃO NA BACIA DO RIO PARAÍBA DO
MEIO – AL-PE”*

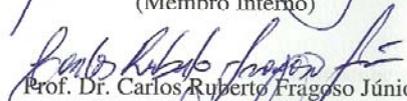
Mikael Timóteo Rodrigues

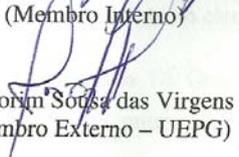
Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:


Prof. Dr. Ricardo Ferreira Carlos de Amorim
(Orientador)


Prof. Dr. Rosiberto Salustiano da Silva Júnior
(Membro Interno)


Prof. Dr. Carlos Ruberto Fragozo Júnior
(Membro Interno)


Prof. Dr. Joirim Sousa das Virgens Filho
(Membro Externo – UEPG)

Fevereiro - 2012

AGRADECIMENTOS

A Deus acima de tudo, por me ter dado forças de conseguir chegar até o fim dessa etapa tão difícil, que por diversas vezes achei que não iria conseguir.

Aos meus Pais, Evânia Timóteo Pereira Rodrigues e Jonas Luiz Rodrigues pela educação primária, no qual é à base de tudo e pelo amor.

A minha noiva Elaine Souza pelo apoio, honesta compreensão nos momentos de ausência no qual se torna inevitável na vida acadêmica, e acima de tudo, pelo amor e carinho.

Ao meu orientador Ricardo Amorim, primeiramente por ter me convidado (e me convencido) a participar do complexo mundo da Meteorologia, mesmo quando todos falavam que eu não concluiria devido às limitações de minha graduação. Em seguida, pelo estímulo a pesquisa e orientação dessa Dissertação. Por fim, ao incentivo do Doutorado em uma grande Instituição deste País, quando pedi sua ajuda e humildemente me amparou.

Aos meus Coorientadores Rosiberto Salustiano Jr. e Ruberto Fragoso Jr., pela honrada orientação, disponibilizando seu valioso tempo e paciência, me fazendo crê que tal acoplamento seria realmente possível e palpável.

Aos amigos e pesquisadores Benicio Monte, Wendel Fialho e meu irmão Bruno Rodrigues pela valiosa troca de conhecimentos científicos durante toda minha jornada acadêmica, em especial no Mestrado. Também, pela parceria nas atividades de pesquisa e extensão e acima de tudo, por serem exemplos de cidadãos de bem e de valores. Parabéns pelo exemplo!

Aos amigos-irmãos de longa data, Tiago Lima de Souza, Marcus Vinicius, Rafael Acioli e Igor Madson, pela admiração, amizade fraterna que já dura mais de 12 anos e apoio incondicional em varias etapas da minha vida.

Ao amigo Carlos Alberto Inácio da Silva, pelo companheirismo e pelos primeiros e importantes passos que buscamos juntos no conhecimento científico.

Aos meus amigos do ICAT, em especial a Thais Di Gregório, Cícero Manoel, Anderlan Sirqueira, Vinicius Banda Speling e a todos os outros companheiros de turma que tive o prazer de estudar junto.

Ao senhor Severino, meu eterno credor de lanches e cópias, que sempre me acolheu de braços abertos com sua frase: “Diga Mika, como vai essa potência?!”

A todos os amigos da Geo-praça, Marcus Antonio, Eric Fernando (Zig), José Antonio (Tony), Elvis Williams, José Henrique e a muitos outros presentes em vários momentos importantes neste momento especial da minha vida.

A FAPEAL e a CAPES por viabilizarem meus estudos com ajuda financeira durante os dois últimos anos, pois sem essa ajuda realmente não seria possível concluir mais esta etapa.

Por fim, agradeço a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, por fazerem da ciência e da extensão uma forma de minimizar as distâncias entre o conhecimento científico e a sociedade.

Meus sinceros agradecimentos... Muito obrigado a todos!

“A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein

RESUMO

Devido o avanço computacional e sua evolução em relação à velocidade e capacidade de memória nos últimos anos, juntamente com ascendência das previsões meteorológicas, o acoplamento entre modelos atmosféricos e hidrológicos tem sido o objeto de estudo em diversas pesquisas nas últimas décadas. O gerenciamento de grandes bacias hidrográficas é determinado por inúmeras variáveis, sendo a principal, o regime e volume das vazões dos rios. Como os resultados de grandes eventos de precipitação pluviométrica afetam diretamente nos regimes de vazão, este trabalho tem como o objetivo principal o acoplamento do modelo hidrológico MGB – IPH com o modelo Atmosférico WRF na geração de vazão na Bacia do Rio Paraíba do Meio (AL/PE). Os dados de precipitação prevista foram simulados pelo modelo WRF e os de precipitação observada e vazão observada concedidos pela Agência Nacional de Águas – ANA, para 3(três) postos pluviométricos e 4 (quatro) fluviométricos, respectivamente. A simulação de vazão foi realizada no modelo hidrológico precipitação-vazão MGB-IPH. As análises foram feitas de duas etapas: interpolação por Krigagem-KGM das precipitações previstas e observadas; comparação entre hidrogramas simulados a partir dos dados de precipitações previstas e observadas. Na correlação espacial foram encontrados valores na ordem de 0,54 para as precipitações previstas e 0,92 para as observadas. As simulações de vazões com dados gerados pelo WRF apresentaram testes significativos, com coeficientes de Pearson variando entre 0,46 a 0,56, valores representativos para este tipo de estudo meteorológico e hidrológico. Os coeficientes de Pearson obtidos através das simulações das vazões dos dados observados apresentaram correlações melhores com valores entre 0,4 a 0,71. O acoplamento de modelos hidrológicos (precipitação-vazão) e modelos atmosféricos podem ser considerados uma técnica útil no auxílio no prognóstico de vazões elevadas. Há uma necessidade eminente na calibração do modelo atmosférico, para que se torne uma ferramenta eficiente e real na elaboração de sistemas de alertas de cheias para bacia do Paraíba do Meio, dentre outras, que serão analisadas posteriormente.

Palavras-chave: Modelo Atmosférico WRF. Modelo Hidrólogo MGB-IPH. Acoplamento

ABSTRACT

Because of computational advances its evolution in relation to speed and memory capacity in recent years, along with adding the weather, the coupling between atmospheric and hydrological models has been the object of study in several studies in recent decades. The management of large river basins is determined by several variables, with the main system and the volume of river flows. Given volume water in a basin can be affected in different ways and many different factors, as the main factors having the variability in time and space of rainfall that produces immediate changes in the flow of a given system. As the results of large precipitation events directly affect the flow regimes, this work has as main objective the coupling of the hydrological model MGB - HPI with the WRF atmospheric model in an attempt to estimate flow in the basin of the Middle Rio Paraíba,. The rainfall data provided were simulated by WRF model and the observed rainfall and flow observed awarded by the National Water Agency - ANA, for 3 (three) station pluviometric and 4 (four) fluviometric respectively. The flow simulation was carried out hydrological rainfall-runoff model MGB-IPH. Analyses were made in two steps: Kriging interpolation in KGM-normal rainfall and observed, and comparison between simulated hydrographs (rain predicted and observed) and observed (gauging stations). In the spatial correlation values were found in the order of 0.54 to 0.92 for normal rainfall and the observed one. The flow simulations with data generated by the WRF, were correlated with Pearson coefficients ranging between 0.46 and 0.56, representative values for this type of meteorological and hydrological study. Pierson coefficients obtained from simulations of flows of the observed data showed best correlations with values between 0.4 and 0.71. The coupling of hydrologic models (rainfall-runoff) and atmospheric models can be considered a useful technique to aid in prognosis prediction of extreme events. There is a perceived need for calibration of the atmospheric model, to become a real and effective tool in developing warning systems for flood basin of the Paraíba do Meio, among others, which will be analyzed later.

Keywords: Atmospheric Model WRF. MGB-IPH hydrological model. Coupling

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Localização da Bacia do Rio Paraíba do Meio no Estado de Alagoas, 37 Fonte: Autor 2012
Figura 2 –	Bacia do Rio Paraíba do Meio. Fonte: Autor 2012 38
Figura 3 –	Localização das Regiões Hidrográficas em Alagoas. Fonte: SEMARH, 39 2007
Figura 4 –	Classificação climática de Koppen para o Estado de Alagoas. Fonte: 45 PDRH, 2001
Figura 5 –	Precipitações Médias Mensais da Bacia do Rio Paraíba do Meio e as 46 contribuições relativas de Pernambuco e Alagoas. Fonte: PDRH, 2001.
Figura 6 –	Fluxograma do sistema de modelagem WRF-ARW, e seus componentes. 47 Adaptado da NCAR ARW User Guide, 2010. Fonte: Autor 2012
Figura 7 –	Fluxograma do sistema WPS desde a entrada dos dados reais ao 48 processamento final, bem como a ordem de processamento. Adaptando da NCAR ARW User Tutorial, 2009. Fonte: Autor 2012
Figura 8 –	Domínios utilizados nas simulações. Fonte: Silva, 2009 49
Figura 9 –	Esquema de escoamento no interior de uma célula com dois blocos. 51 Fonte: Collischonn, 2001
Figura 10 –	Esquema do balanço de água vertical na camada de solo. Fonte: Tucci, 52 (1998)
Figura 11 –	Postos Fluviométricos. Fonte: Autor 2012 54
Figura 12 –	Localização dos postos gerados pelo WRF sobre a Bacia do Paraíba do 56 Meio. Fonte : Adaptado de Paiva, 2011.
Figura 13 –	Formato de saída do WRF. Fonte: Autor 2012 56
Figura 14 –	Formato de entrada. Fonte Autor 2012 57
Figura 15 –	43 pontos de precipitação prevista pelo modelo WRF. Fonte, Autor 2012 58
Figura 16 –	Amostra do arquivo INTERPLU.HIG adaptado para todos os pontos de 60 precipitação prevista pelo modelo WRF. Autor 2012
Figura 17 –	Mapa de Isoietas da Bacia do Rio Paraíba do meio a partir dos pontos do 62 WRF. Fonte: Autor 2012
Figura 18 –	Mapa das precipitações anuais médias. Fonte: PDRH do PARAíba do Meio 63

Figura 19 –	Mapa de precipitação prevista pelo WRF e o coeficiente de determinação ($r^2 = 0.543$). Fonte: Autor 2012.	65
Figura 20 –	Postos pluviométricos da Bacia do Rio Paraíba do Meio e suas ISOIETAS. Fonte: Autor 2012	67
Figura 21 –	Mapa de precipitação observada ($r^2 = 0.926$), onde E = entrada da bacia e S = saída da bacia. Autor 2012	68
Figura 22 –	Figura 22 - Imagens do satélite GOES-10, canal infravermelho, ilustrando a formação de aglomerados de nuvens associados à propagação de Perturbações Ondulatórias no campo dos Alísios, em MAIO/2008, no Oceano Atlântico Sul. Fonte: INPE/DSA, 2008.	70
Figura 23 –	Imagens realçadas do satélite GOES-10, ilustrando a formação de aglomerados de nuvens. Fonte: INPE/CPTEC, 2008	70
Figura 24 –	Imagem realçada do satélite GOES-10 para o dia 27 de maio de 2008, associada à ocorrência de altos valores de vazão no posto 308700000 (Atalaia).	71
Figura 25 –	Posição do centro dos Vórtices em Altos Níveis (VCAN) com a indicação dos dias de atuação sobre a América do Sul em junho de 2008. O centro do VCAN foi localizado subjetivamente, a partir das análises diárias do NCEP/EUA, Fonte: Adaptado do CPTEC/INPE (2008).	72
Figura 26 –	Imagens realçadas do satélite GOES-10, ilustrando episódios de Perturbações Ondulatórias dos Alísios nos dias 18 e 25 de julho de 2008, associadas às vazões nos postos de Quebrangulo (A) e Atalaia (B).	74
Figura 27 –	Imagens realçadas do satélite GOES-10, ilustrando episódios de Perturbações Ondulatórias dos Alísios no dia 17 de agosto de 2008, associadas às vazões nos postos de Quebrangulo (A), Atalaia (B) e Viçosa (C).	76
Figura 28 –	Hidrograma de vazão simulada e observada na Estação Fluviométrica de Quebrangulo (39850000) no período de Janeiro de 2008 a Março de 2009 simulado pelo modelo MGB-IPH.	77
Figura 29 –	Hidrograma de vazão simulada e observada na Estação Fluviométrica de Atalaia (39870000) no período de Janeiro de 2008 a Março de 2009 simulado pelo modelo MGB-IPH.	78
Figura 30 –	Hidrograma de vazão simulada e observada na Estação Fluviométrica de Viçosa (39890000) no período de Janeiro de 2008 a Março de 2009 simulado pelo modelo MGB-IPH.	79
Figura 31 –	Hidrograma de vazão simulada com dados de precipitação do modelo WRF e vazão observada na Estação Fluviométrica de Quebrangulo (39850000) no período de Janeiro de 2008 a Março de 2009 simulado pelo modelo MGB-IPH.	80

- Figura 32 – Hidrograma de vazão simulada com dados de precipitação do modelo WRF e vazão observada na Estação Fluviométrica de Atalaia (39870000) no período de Janeiro de 2008 a Março de 2009 simulado pelo modelo MGB-IPH. 82
- Figura 33 – Hidrograma de vazão simulada com dados de precipitação do modelo WRF e vazão observada na Estação Fluviométrica de Viçosa (39890000) no período de Janeiro de 2008 a Março de 2009 simulado pelo modelo MGB-IPH. 83

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1 –	Características Físicas da Bacia do Rio Paraíba do Meio	43
Tabela 2 –	Média Anual dos Principais Parâmetros Meteorológicos em Alagoas	46
Tabela 3 –	Valores dos coeficientes de Pearson para as series das vazões simuladas com chuva observada. Fonte: Autor 2012.	84
Tabela 4 –	Valores dos coeficientes de Pearson para as series das vazões simuladas com chuva prevista. Fonte: Autor 2012.	85
Tabela 5 –	Amostra dos nomes e Coordenadas Geográficas de todos os pontos de precipitação prevista pelo WRF	100
Quadro 1 –	Dados dos postos fluviométricos e pluviométricos utilizados no estudo	55

LISTA DE ABREVIATURAS

3DVAR:	3-dimensional variacional
AFWA:	Air Force Weather Agency (Agência Tempo Força)
CCM:	Complexo Convectivo de Mesoescala
CCS:	Complexos Convectivos de escala Subsinótica
CPTEC:	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
FAA:	Federal Aviation Administration (Administração Aviação Federal)
ENOS:	El Niño Oscilação Sul
FLS:	Laboratório de Sistemas de Previsão
HN:	Hemisfério Norte
IME:	Índice Multivariado de El Niño Oscilação Sul
INPE:	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
KGM:	Krigagem
LI:	Linhas de Instabilidade
MGB - IPH:	Modelo para Grandes Bacias – Instituto de Pesquisas Hidráulicas
NCAR:	Centro Nacional de Pesquisa Atmosférica
NCEP:	Centro Nacional de Previsão Ambiental
NEB:	Nordeste Brasileiro
MNT:	Modelo Numérico do Terreno
ODP:	Oscilação Decadal do Pacífico
PDRH:	Plano Diretor da Região Hidrográfica
POAs:	Perturbações Ondulatórias no Campo dos ventos Alísios
PNM:	Pressão ao Nível do Mar
PNMM:	Pressão ao Nível Médio do Mar
ROL:	Radiação de Onda Longa
SF:	Sistemas Frontais

SIG:	Sistema de Informação Geográfica
SHE:	Sistema Hidrológico Europeu
SMAP:	Soil Moisture Accounting Procedure
SSARR:	Sistema de Regulamento Vazões e Reservatório
VCAN:	Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis
TSM:	Temperatura da Superfície do Mar
WRF:	Weather Research Forecasting
ZCIT:	Zona de Convergência Intertropical
ZCAS:	Zona de convergência do Atlântico Sul
SUDENE:	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Bacia do Rio Paraíba Do Meio	19
2.2	Aspectos Climatológicos da Área de Estudo	19
2.2.1	Mecanismos que influenciam as chuvas na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio	20
2.2.1.1	Perturbações Oscilatórias no campo dos ventos Alísios (POAs)	21
2.2.1.2	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN)	22
2.2.1.3	Brisas marítima e terrestre	22
2.3	Regimes de Vazão	23
2.4	Modelos hidrológicos	25
2.5	Modelos hidrológicos Distribuídos	27
2.6	Modelo Atmosférico de Mesoescala WRF	31
2.6.1	Aplicações do modelo WRF	33
2.7	Acoplamento de Modelos Atmosféricos e Modelos Hidrológicos	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	Área de Estudo	37
3.2	Características físicas da bacia	40
3.2.1	Relevo da Bacia do Paraíba do Meio	40
3.2.2	Tipos de Solos	40
3.2.3	Vegetação	41
3.2.4	Rede de Hidrográfica	42
3.3	Aspectos Climáticos	44
3.3.1	Precipitação Pluviométrica	45
3.4	Descrição do modelo Atmosférico WRF	46

3.4.1	Pré-Processamento	47
3.4.2	Processamento	48
3.4.3	Pós-processamento	48
3.4.4	Configuração de domínio do modelo	49
3.4.5	Dados de entrada do modelo	49
3.5	Descrições do modelo Hidrológico MGB-IPH	50
3.5.1	Descrição da interpolação dos dados Hidrometeorológicos	53
3.5.2	Preparação dos dados	53
3.6	Análise espacial de precipitação	57
3.7	Análises Meteorológicas de chuvas intensas para o período estudado	59
3.8	Acoplamento dos modelos atmosféricos e hidrológicos	60
4	RESULTADO E DISCUSSÕES	62
4.1	Análise espacial da precipitação (Dados de Precipitação Prevista)	62
4.2	Análise espacial da precipitação (Dados de Precipitação Observada)	66
4.3	Análise meteorológica dos casos de chuva intensa ocorridos no período de estudo, observando a chuva-vazão	69
4.4	Análise da eficiência do acoplamento do Modelo de Mesoescala WRF e o Modelo Hidrológico MGB-IPH	77
4.4.1	Simulações da Precipitação e Vazão Observadas	77
4.4.2	Simulações da Vazão Observada com Precipitação Prevista pelo WRF	79
5	CONCLUSÕES	86
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
	APÊNDICES	97
	APÊNDICE A	98
	APÊNDICE B	99
	APÊNDICE C	100

1 INTRODUÇÃO

A aplicação do acoplamento do modelo hidrológico Modelo de Grandes Bacias – Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH) ao modelo atmosférico WRF visando estimar vazão na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio pode permitir que sejam realizados prognósticos de vazão de curto, médio e longo prazo, para controle de cheias, previsão de fenômenos como a seca, avaliação de impactos de mudanças climáticas de acordo com a mudança de cenários de ocupação na bacia, disponibilidade hídrica, entre outras aplicações. Embora o público em geral associe Nordeste do Brasil com secas severas, os eventos de tempo severos são recorrentes em sua costa leste (FIALHO, 2012), devido a mecanismos sinóticos como Perturbação Ondulatória no campo dos Alísios (POAs) que confluem com restos de um Sistema Frontais (SF) associadas a Linhas de Instabilidade (LI) e Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) sobre o nordeste de Alagoas e sudeste de Pernambuco, ocorrendo assim, tempestades tropicais com totais pluviométricos diários na ordem de 300 mm em Barreiros (PE), 280 mm Garanhuns (PE) e 200 mm Palmeira dos Índios (AL).

O Relatório sobre os danos causados pelas chuvas de 1988 e 1989, elaborado pelo Governo de Alagoas em conjunto com o Governo Federal e do PNUD da Organização dos Estados Americanos (OEA) foi publicado na década de 1990, onde o mesmo sugeriu aplicação de medidas mitigadoras na prevenção contra cheias, a partir da implantação de um sistema de alerta de prevenção de enchentes, que nunca foi executado pelos seus idealizadores (FRAGOSO JR. et al., 2010).

Nos últimos 100 anos, sete grandes cheias nas bacias dos rios Paraíba e Mundaú assolaram a região (1914; 1941; 1969; 1988; 2000; 2010), trazendo prejuízos ao estado, e principalmente, a população ribeirinha, inclusive com relato de perdas humanas. No Estado de Alagoas, uma das regiões que sofrem com frequência os impactos dos fenômenos atmosféricos são os municípios de União dos Palmares, Quebrangulo, Branquinha, Muricí, Santana do Mundaú, Rio Largo e seus entornos, que se desenvolveram nas margens dos rios Paraíba do Meio e Mundaú, ambos formando o Complexo Lagunar Mundaú-Manguaba. Devido ao grande número de usinas canavieiras nos estados de Alagoas e Pernambuco, foram construídas diversas barragens ao longo da bacia do Mundaú, o que levou parte da população a ocupar os vales de inundação, gerando outro problema social sem precedentes.

Devido essa série histórica de grandes cheias agregados a vários outros problemas localizados às margens dos grandes rios, tonar necessário um sistema de alerta de cheias e uma análise integrada considerando o uso acoplado de modelos de previsão de tempo e hidrológicos no estado de Alagoas.

Além de todo seu histórico de cheias e catástrofes ambientais, outro motivo que levou a escolha da bacia do Paraíba para a realização deste estudo de caso, foi a atual situação que a modelagem da mesma se encontrava, pois pesquisadores do Centro de Tecnologia - CTEC da Universidade Federal de Alagoas – UFAL calibraram e validaram o modelo hidrológico MGB-IPH para a bacia do Paraíba do Meio.

Para esta simulação hidrológica foi indispensável a calibração para as condições e características do local, baseado nos procedimentos descritos por Collischonn (2001), onde foram gerados os arquivos de parâmetros fixos, de parâmetros calibráveis e os que continham as informações da bacia como: geometria da bacia; estrutura de blocos; clima; e tempo. As informações para determinação destes arquivos foram obtidas a partir de dados de entradas como: imagens de satélites, mapas de tipos de solos/modelos numéricos, séries históricas de variáveis hidroclimáticas (precipitação pluviométrica, temperatura, radiação solar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e pressão atmosférica).

Desta forma, o acoplamento do modelo hidrológico MGB-IPH com o modelo atmosférico WRF, aplicado na Bacia do Rio Paraíba do Meio, visa minimizar perdas futuras para toda sociedade ribeirinha, tanto no que se diz respeito à estruturas, bem como à vidas humanas, com algumas horas de antecedência ou até mesmo um largo período, favorecendo assim, a sociedade local de uma maneira geral.

O objetivo principal deste trabalho é o acoplamento do modelo hidrológico MGB – IPH com o modelo Atmosférico WRF na tentativa de estimar vazão na Bacia do Rio Paraíba do Meio.

Esta ação poderá em um futuro próximo aumentar com antecedência e previsão das cheias em tempo real, utilizando informações de precipitação disponíveis como dados de entrada em um modelo precipitação-vazão de grandes bacias, neste caso, como projeto piloto, a Bacia do Rio Paraíba do Meio.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Comparar simulação da precipitação prevista pelo WRF com a vazão observada;
- Comparar a precipitação observada com a vazão observada;
- Analisar casos de precipitação pluviométrica intensa ocorridos no período de estudo, que influenciaram no acoplamento chuva-vazão;
- Analisar a variabilidade espacial da precipitação prevista e observada através de interpolação, utilizando o método de Krigagem.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Meio

A bacia hidrográfica é composta por regiões assoladas por eventos adversos - desde sistemas sinóticos a mecanismos de grande escala – que proporcionam eventos de secas ou enchentes. O escoamento nas cabeceiras do rio é temporário devido á má distribuição de chuvas na região Nordeste do Brasil, mas no período chuvoso, com o aumento da precipitação, o escoamento cresce e torna-se lento devido á presença das lagoas Mundaú e Manguaba, cujas águas escoam lentamente para o oceano devido á topografia local (SILVA *et. al.* 2005).

No curso médio da bacia, as enchentes já causaram prejuízos tendo, inclusive, provocado a relocação de assentamentos urbanos. Historicamente, as maiores enchentes ocorrem nos trechos médio e baixo da bacia do rio Paraíba do Meio. Em Santana do Mundaú, a máxima enchente registrada ocorreu em 03/03/1993 (SUDENE, 1999), sendo superada em 18/06/2010, quando ocorreu na mesma região complexos convectivos de mesoescala (CCM's), causando desconforto as comunidades ribeirinhas e relocação urbana total do município de Branquinha (RODRIGUES *et al.*, 2010).

2.2 Aspectos Climatológicos da Área de Estudo

O Nordeste do Brasil (NEB) é conhecido por apresentar em alguns anos secas severas ou chuvas excessivas, que têm sido relacionadas aos padrões anômalos de grande escala da circulação atmosférica global associadas aos padrões anômalos de grande escala da circulação atmosférica global associados ao fenômeno El-Niño Oscilação sul (ENOS) (KOUSKY, 1979).

As secas severas no NEB, objeto de inúmeros estudos por seus impactos sociais e econômicos, tem sido relacionados á ocorrência do El-Niño e/ou La Niña podem (fortes ou moderados), Andreoli *et al.*, 2004.

Sabe-se também que a precipitação no NEB é resultante do acoplamento de diversos sistemas atmosféricos, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (Uvo, 1989), os Vórtices Ciclônicos de Ar Superior (KOUSKY E GAN 1981), os Sistemas Frontais

(KOUSKY, 1979), e os Distúrbios de Leste (ESPINOZA, 1996), que podem ser modificados pelas características fisiográficas da região e por anomalias atmosféricas de escala planetária.

2.2.1 Mecanismos que influenciam as chuvas na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio

Os efeitos dinâmicos da atmosfera são os principais responsáveis por causar precipitações na região do NEB. Em dezembro e janeiro admite-se que o principal efeito dinâmico favorável à precipitação, principalmente ao sul da região, é a penetração de frentes frias oriundas do sul do continente da América do Sul, afirmação reforçada por Kousky (1979).

Por volta dos meses de Janeiro, Fevereiro e Março ocorrem uma alta convergência de massa de ar nos baixos níveis, associada a movimentos verticais ascendentes favorecendo a precipitação. Segundo Molion e Bernado (2002), de abril em diante essa convergência ocorre nos médios e altos níveis, sendo associados aos movimentos verticais descendentes, dissipando assim células de chuvas. As ocorrências de anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) tipo dipolo sobre o Atlântico Tropical, assim referida por apresentar configurações que mostram anomalias de sinais opostos ao norte e ao sul do equador, e o aparecimento de anomalias de TSM sobre o Pacífico Equatorial central leste durante as ocorrências de episódios de ENOS (KAYANO, 2005) estão entre os principais fatores de grande escala que contribuem para as mudanças na circulação atmosférica responsáveis pela variabilidade interanual de precipitação sobre o NEB. Molion e Bernardo (2002) sugerem que a variabilidade interanual da distribuição de chuvas sobre o NEB, tanto nas escalas espacial quanto temporal, esteja relacionada com as mudanças nas configurações atmosféricas de grande escala e com a inter-relação oceano-atmosfera nos Oceanos Pacífico e Atlântico. Segundo Silva, (2009) *apud* Molion e Bernador, (2002), apontam para o norte do NEB, que os principais mecanismos de formação de chuva são a ZCIT, a convergência de umidade (Brisas e Perturbações Ondulatórias no campo dos ventos Alísios – POA's), a convecção local e muito raramente a influência direta das frentes frias provenientes do sul. O sul do NEB tem, como principal mecanismo de precipitação, os sistemas frontais estacionários alimentados pela umidade proveniente do Atlântico Sul, que definem a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), sistemas pré-frontais, convecção local e brisas de mar e terra no litoral. O regime do sul Nordeste é semelhante ao da parte norte da região Sudeste do Brasil. O máximo de chuvas na faixa costeira do leste do NEB estaria ligado a maior atividade de circulação de brisa que advecta bandas de nebulosidade para o continente e a ação das frentes

frias, ou seus remanescentes, que se propagam ao longo da costa. Foi sugerido ainda que esse Máximo de chuvas estaria possivelmente associado a máxima convergência dos ventos Alísios com a brisa terrestre, as POAs que, por sua vez, associam-se à topografia e a convergência de umidade.

2.2.1.1 Perturbações Oscilatórias no campo dos ventos Alísios (POAs)

Estes sistemas são de extrema importância para o NEB, porque causam intensas precipitações sobre o continente, quando se deslocam sobre superfícies oceânicas superaquecidas com temperatura por volta de 28° C (SILVA, 2009).

As POAs se originam quando os sistemas Frontais do Hemisfério Norte (HN) penetram profundamente em latitudes equatoriais durante o inverno-primavera daquele hemisfério, dezembro a abril, e a ZCIT está em sua posição mais ao sul, tanto sobre o Atlântico quanto sobre a África equatorial produzindo, na região da ZCIT, grandes complexos convectivos de escala subsinótica (CCS) que por sua vez, geram perturbações Ondulatórias no campo dos Alísios (POAs) (MOLION E BERNADO, 2000).

Molion e Bernado (2002) apud Silva (2009) analisaram imagens de satélites para as faixas de Latitudes 5° -10° S e 10° -15°S e concluíram que as POAS poderiam ser causadoras de chuvas na costa leste do NEB nos meses de junho e agosto.

As POAs se propagam para oeste com velocidades de 6° a 8° de longitude por dia, cruzando o equador, mas não tem condições de se desenvolverem na costa, devido à forte inversão psicotérmica (de umidade e temperatura do ar) sempre presente sobre o campo dos ventos Alísios. Porém, geralmente se intensificam quando chegam a costa, devido ao aumento da convergência do fluxo de umidade e ao contraste térmico entre continente e oceano. Quando em fase com a brisa marítima, essas perturbações chegam a penetrar até 300 Km para o interior do continente. Se confluírem com a brisa terrestre, o que ocorre com frequência próximo à costa leste do Nordeste, podem intensificar e causar tempestades com totais pluviométricos superiores a 50 mm/dia e rajadas de vento superiores a 50 Km/h. Sua maior frequência é observada em anos de La Niña devido a maior troca de energia entre as regiões tropicais, ao contrário do que ocorre em anos de El Niño, que causa um bloqueio das frentes frias que são uma das causas de POAs (MOLION E BERNARDO, 2002).

2.2.1.2 Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN)

. Consistem em uma circulação ciclônica fechada, de escala sinótica, cujo núcleo é mais frio que a periferia e que se forma na alta troposfera. Surgem na alta troposfera tropical e são inicialmente detectados nas cartas sinóticas de 200 mb. Penetram gradualmente para baixo atingindo a média troposfera. Apenas em 60% dos casos atingem a 700 mb e só em cerca de 10% conseguem atingir a superfície. Na vertical, o eixo do vórtice normalmente se inclina em direção ao ar mais frio. Podem ter um tempo de atividade curto ou persistirem por vários dias consecutivos, ou mesmo semanas, mantendo-se quase-estacionários ou movendo-se rápida e irregularmente. O movimento vertical é subsidente no centro do vórtice e ascendente na periferia, especialmente na área de máxima atividade convectiva visível em imagens de satélites (KOUSKY E GAN, 1981 *apud* VAREJÃO 2005).

O sistema nebuloso é intenso, revelando forte convecção adiante da direção do movimento do vórtice. Em vórtices estacionários a convecção envolve todo o centro. Eventualmente podem ser observadas formações de cumulonimbos na parte interior quando o vórtice ciclônico atinge o continente ou quando se move sobre águas quentes. Há uma tendência de se moverem para oeste e atingirem o NEB (VAREJÃO, 2005).

2.2.1.3 Brisas marítima e terrestre

Durante os dias ensolarados, a superfície do continente, na orla marítima, se aquece mais rapidamente que a do oceano adjacente. Como consequência, já pela manhã, surge uma faixa de pressão mais baixa sobre o litoral, ensejando o desenvolvimento de correntes convectivas ascendentes sobre o continente, as quais geram nuvens convectivas. Acima do oceano a pressão continua elevada, face à menor temperatura da água à superfície. Dessa maneira, se estabelece uma circulação fechada, com movimentos ascendentes na costa e subsidentes sobre o mar. O vento, à superfície, sopra do oceano para o continente, em direção aproximadamente perpendicular à linha da costa e é chamado brisa marítima (ou "viração") (VAREJÃO, 2005). Para Molion e Bernardo (2002), as brisas, por si só, são mecanismos que produzem chuvas leves e de curta duração e estão sempre presentes em todo o litoral nordestino.

2.3 Regimes de Vazão

Para Collischon e Tassi (2008), vazão é o volume de água que passa por uma determinada seção de um rio dividido por um intervalo de tempo. Assim, se o volume é dado em litros, e o tempo é medido em segundos, a vazão pode ser expressa em unidades de litros por segundo ($l.s^{-1}$). No caso de vazão de rios, entretanto, é mais usual expressar a vazão em metros cúbicos por segundo ($m^3.s^{-1}$), sendo que $1 m^3.s^{-1}$ corresponde a $1000 l.s^{-1}$.

Durante as chuvas intensas, a maior parte da vazão que passa por um rio é a água da própria chuva que não consegue penetrar no solo e escoar imediatamente, atingindo os cursos d'água e aumentando a vazão. É desta forma que são formados os picos de vazão e as cheias ou enchentes (COLLISCHON 2006).

Coelho e Oliveira (2000) *apud* Souza (2005), estimaram a vazão máxima de drenagem pluvial da micro bacia urbana do rio da Pajuçara, em Maceió-AL. Para estimar as vazões, utilizaram o método racional, pela simplicidade de obtenção dos parâmetros, porém de aplicação limitada às pequenas bacias. Adotaram as precipitações pluviométricas intensas com o tempo de retorno de seis meses e tempo de concentração da bacia igual a duração da tempestade. Devido a drenagem ser efetuada por gravidade para o mar, a situação ideal ocorre nos mínimos de maré. O tempo de retorno de seis meses representa um alto risco de drenagem ser superada por uma tempestade, porém, aceitável, visto que não coloca em risco vidas humanas.

Tucci (2000) *apud* Souza (2005) apresentou a relação do coeficiente de escoamento de bacias urbanas brasileiras em função da área impermeável e a vazão máxima correspondente. O método proposto para determinar a vazão máxima foi o ideal, que utiliza o coeficiente de escoamento, a intensidade de precipitação e a área total da bacia. Os resultados apresentaram bom ajuste com os dados observados com coeficiente de regreção de aproximadamente 0,81, no entanto foram limitados por:

1. Bacias pequenas, onde o método pode ser aplicado
2. Ao uso para situações limites como a de projetos sem um compromisso com um evento específico

3. variabilidade que o coeficiente de escoamento possui em função dos outros componentes da bacia (declividade, tipo de solo, cobertura vegetal, entre outros)
4. os valores médios obtidos foram ajustados com dados de bacias com dimensões as mais variadas e superiores ao que seria para o método racional.

Souza (2005) apresentaram um modelo para grandes bacias, permitindo simular o comportamento físico dos processos envolvidos, considerando as características físicas distribuídas das bacias hidrográficas. Apesar das escalas das bacias analisadas, o modelo avalia de forma distribuída a variação da cobertura vegetal, tipo e uso do solo e a propagação de escoamento. O mesmo foi aplicado a duas bacias de características físicas distintas, e de 27 Km², com vários postos pluviométricos e fluviométricos. A comparação entre as vazões diárias estimadas pelo modelo e as observadas em diversos postos fluviométricos na bacia mostrou bons resultados. O modelo permitiu, depois de ajustado, uma análise preliminar dos cenários de uso de solo para uma das bacias, e permitiu o melhor entendimento do comportamento hidrológico das mesmas, através da comparação dos resultados.

Cruciani *et. al.* (2002) analisaram e previram eventos hidrológicos extremos para cidade de Piracicaba-SP, com dados pluviométricos de 1966 a 2000, o qual determinou a distribuição temporal de precipitações intensas de 60 a 120 minutos de duração. As chuvas de 60 minutos foram subdivididas em três intervalos de 20 minutos, e as de 120 minutos em quatro intervalos de 30 minutos. Os resultados mostram que para as chuvas de 60 minutos, com altura pluviométrica média de 20,7mm, a distribuição foi de 72,3; 21,4 e 6,2% do total precipitado, respectivamente, nos três intervalos sucessivos de 20 minutos. Para as precipitações pluviométricas de 120 minutos, com altura pluviométrica média de 33,3 mm, o resultado foi de 60,1; 25; 2; 11,1 e 3,6%, respectivamente, nos quatro intervalos sucessivos de 30 minutos.

Campos *et al.* (2003) *apud* Souza (2005) analisaram o comportamento da vazão regularizadora em um reservatório, em diferentes cenários de distribuição de vazões mensais, denominada de padrão sazonal, que serviu para desagregar as vazões anuais em mensais nas disponibilidades hídricas em reservatórios isolado. Para analisar tal influência, selecionou-se um rio intermitente (Rio Caxioré – CE). Suas vazões anuais foram desagregadas em mensais pelo padrão sazonal do próprio rio.

Benini, et al. (2004) obtiveram e compararam valores da vazão do escoamento superficial da bacia di córrego do mineirinho, a qual esta situado no Campus II da USP, localizada em São Carlos-SP. Para isso, foi necessário identificar as diferentes situações de uso atual do solo através de sensoriamento remoto(imagens de satélite LANDSAT 7) e classificação através de Sistema de Informação Geográfica (SIG). A bacia foi dividida em sete sub-bacias, permitindo a análise dos hidrogramas separadamente. Devido à urbanização deverá ocorrer um drástico aumento da vazão em todas as sub-bacias. Estimou-se que para umas das sub-bacias, deverá ocorrer um aumento de 11,7 para 28,59m³/s, correspondendo aproximadamente a 140%.

2.4 Modelos hidrológicos

Um modelo é a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas, segundo a definição de Tucci (1998).

Os modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão têm por objetivo representar as fases do ciclo hidrológico, entre a precipitação e o escoamento em uma exutória, em um ponto de interesse. Alguns dos processos que ocorrem nessas fases, como a propagação de ondas de cheias em rios e canais, são bem conhecidos em relação à física de seus processos e apresentam uma descrição matemática relativamente simples. Nesses casos, o escoamento pode ser simulado por modelos matemáticos hidrodinâmicos (OLIVEIRA, 2006).

Nas ultimas décadas, novos recursos computacionais e novas técnicas de medição e obtenção de dados permitiram o desenvolvimento de modelos hidrológicos distribuídos, de forte base física. Entretanto, a maioria destes modelos hidrológicos distribuídos foi desenvolvida com o objetivo de representar apenas pequenas bacias, e seu grau de detalhamento torna inviável a aplicação em grandes bacias. (COLLISCHONN 2001).

Para Collischonn (2006), os modelos hidrológicos devem procurar incorporar os processos que compõem de balanço vertical de energia na superfície, de forma que sejam mais consistentes com os modelos atmosféricos. Os processos envolvidos nas interações entre superfície e atmosfera determinam, por exemplo, qual parcela da chuva irá infiltrar ou escoar superficialmente, bem como a redistribuição da água entre a superfície, solo, aquífero

subterrâneo e canais (TROCH *et. al.*, 2003). Entretanto, torna-se muito importante para aplicações em atividades agrícolas, estudos de cunho climático, geração de energia, qualidade da água e prevenção de danos causados por fenômenos naturais.

Segundo Rhamar (2007) *apud* Paiva (2011), a modelagem hidrológica pode ser aplicada para diversas aplicações, como analisar projetos e os impactos causados por eventos extremos, orientação no planejamento de recursos hídricos na verificação da disponibilidade hídrica, qualidade da água e do transporte de sedimentos, aperfeiçoar sistemas de reservatórios e os sistemas de abastecimento d'água, de redes coletoras de esgotos e de águas pluviais, prever vazões em curto e médio prazo, dentre outros.

A maioria dos modelos hidrológicos conceituais ainda é do tipo concentrado, tendo em vista que os mesmos são adequados para pequenas bacias, pois não representam a variabilidade espacial das características da bacia (HARTMANN *et. al.* 1999). Embora tenham sido desenvolvidos diversos modelos do tipo distribuído, apropriados para captar as variações espaciais, o seu uso ainda continua restrito em pequenas bacias, devido à limitações na quantidade de dados necessários para sua aplicação (COLLISCHONN 2006).

Segundo Tucci (2008) *apud* Paiva (2011), os primeiros modelos hidrológicos tratavam as etapas dos modelos hidrológicos isoladamente (i.e. infiltração e escoamento em rios). Com o avanço das pesquisas e o desenvolvimento tecnológico, estes modelos passaram a simular processos de transformações, a exemplo de chuva em vazão.

Collischonn (2001) utilizou a estrutura do modelo LARSIM, com algumas adaptações do modelo VIC-2L, e desenvolveu o Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH). Foram feitas modificações importantes, como a simplificação do módulo de balanço de água no solo. O modelo tem sido aplicado com sucesso em bacias brasileiras, com diferentes características, como exemplo a Bacia do Rio São Francisco, Rio Madeira, Rio Paraíba do Sul, Alto do Rio Paraguai, Rio Uruguai, tanto para simulação quanto para previsão (COLLISCHONN 2006).

A utilização de Modelos de Grandes Bacias tem permitido extrair informações processar informações com bastante relevância de dados de bacias muito extensas, verificando informações de características físicas como comprimento de trechos de rios, drenagens, áreas, declividade, fluxo de drenagens entre outras informações que, associado aos modelos hidrológicos, tem permitido obter simulações hidrológicas em macro-escalas, tudo

isso também com o avanço computacional, onde tem possibilitado armazenar e processar velozmente grandes volumes de informações. Logo, os modelos hidrológicos em grandes escalas tem sido um avanço no campo da hidrologia, onde pode ter grande contribuição para o gerenciamento da água a nível regional e global, (DÖLL *et. al.*, 2002).

Essa representação pode ser feita, ainda, considerando a variabilidade espacial dos eventos de precipitação e das características da bacia. Nesses casos, os modelos são classificados como modelos distribuídos (KAISER, 2006). Para justificar a consideração de características distribuídas, é necessário um certo embasamento físico.

Gewex (1998) aconselha que os trabalhos devem apresentar uma atenção ao desenvolvimento de modelos hidrológicos de grandes bacias, que expandam seus limites geográficos para áreas de escala em nível regional e/ou continental. Dessa forma a hidrologia tem sido uma área de estudo destinada à criação de modelos hidrológicos que pode dar resposta de escoamento, vazões, em grandes escalas, a nível global, sendo uma alternativa para contribuir no prognóstico de mudanças climáticas no globo terrestre, (MENDES, 2001).

Segundo Gama (2011), são diversos os modelos existentes, alguns deles são antigos, outros desenvolvidos recentemente. Na evolução dos modelos os que se destacam são: Muskingum, Stanford IV, Texas Watershed Model (adaptação do Stanford IV), IPH-II, SMAP, TOPMODEL, SHE, SSARR, MGB-IPH. Para Tucci (1998), cada modelo hidrológico tem sua limitação e vantagem. A correta aplicação de cada um deles depende das características físicas da bacia, da relevância que cada processo hidrológico desempenha no contexto, dos dados que serão utilizados, da discretização adotada e dos objetivos da simulação. Dessa forma, é importante o entendimento da metodologia do modelo para que o seu uso seja realizado corretamente.

2.5 Modelos hidrológicos Distribuídos

Modelos hidrológicos distribuídos são aqueles que consideram a distribuição espacial de algumas variáveis. Neste sentido é impossível dissociar os modelos distribuídos dos modelos hidrológicos de base física. É necessário, pelo menos um pouco de base física, para justificar a consideração de características distribuídas (COLLISCHONN 2001). Ainda segundo Colloschonn (2001), os modelos conceituais, cujos parâmetros exigem um período

de dados para o ajuste, não poderiam ser utilizados. A formulação concentrada dos modelos não permitia a resposta até de questões mais simples, tais como, se o que aconteceria se a chuva ocorresse de forma concentrada sobre parte da bacia. As necessidades de resposta em diferentes pontos da bacia, a heterogeneidade dos processos físicos, a disponibilidade de informações sobre a superfície terrestre e o avanço da informática criaram as condições para o desenvolvimento de modelos hidrológicos distribuídos, (COLLISCHONN 2006).

De acordo com Tucci (1998), modelo é a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas, onde é possível discernir a possibilidade de criação de estruturas de dados particulares, que se destinem a representar sistemas e permitir seu estudo, estas estruturas de dados são os *modelos* e podem assumir diversas formas e níveis de complexidade (OLIVEIRA 2006).

A qualidade do modelo distribuído é avaliada pela capacidade em representar melhor a variabilidade espacial do sistema, sujeito as condições também da entrada, como a precipitação. O grau de detalhamento está ligado diretamente as informações disponíveis e à precisão desejada para retratar a bacia. Para Tucci, (2005), um modelo distribuído pode apresentar resultados praticamente aos de um modelo concentrado, quanto ao ajuste dos valores simulados aos observados, no entanto somente o modelo distribuído permite estudar a variabilidade do comportamento físico de diferentes partes do sistema.

Quanto mais complexos os sistemas, mais desafiadores e necessários são os modelos. Os modelos hidrológicos tem se tornado uma das ferramentas de extrema significância e é objeto de estudo da hidrologia, onde o desenvolvimento científico, mediante novas fundamentações vem desenvolvendo novos modelos para melhor compreender e representar espacialmente o comportamento hidrológico em bacias hidrográficas (GAMA, 2011).

Para a representação do sistema hidrológico as bacias hidrográficas são relacionadas de maneira simplória, onde consiste no entendimento da bacia hidrográfica como um sistema hídrico semelhante a um reservatório, constituídos de entradas e saídas cuja representação desse sistema é o ciclo hidrológico. Dentro da complexidade do sistema, tem-se a dinâmica de troca de energia, que pode ser explicada através das fases do ciclo hidrológico, que representa a interação entre a bacia hidrográfica, principalmente através dos componentes verticais, como a precipitação, a evapotranspiração, a evaporação e a infiltração, assim como

o balanço de energia regional de forma que a entrada no sistema corresponde à precipitação, e a saída vazão.

Dessa forma a resposta da bacia as quantidades de água está associada às características físico-naturais e alterações antrópicas (GAMA, 2011). Onde os modelos hidrológicos distribuído permitem representar o funcionamento da bacia hidrográfica, a fim de obter espacialmente as vazões, em bacias hidrográficas, de acordo com as características climáticas e situação atual da bacia em análise.

Para tanto Silans *et.al* (2000), a diferença dos modelos hidrológicos distribuídos dos concentrados, é definida quando os modelos hidrológicos concentrados consideram a bacia como homogenia, e utiliza dados médios de precipitação, enquanto que os modelos hidrológicos distribuídos levam em consideração a distribuição espacial das características físicas da bacia, como tipos de solos, vegetação, morfologia da bacia e antrópicas como o uso e cobertura do solo. Além disso, leva em consideração a distribuição espacial da precipitação e eventualmente a evaporação potencial e variáveis climáticas.

O emprego de modelos hidrológicos distribuídos ganha cada vez mais êxito e importância quando dentro de seus métodos estão a obtenção de hidrogramas em diferentes pontos na rede de drenagens em grandes bacias hidrográficas, não apenas num único ponto de saída, ganhando assim, mais valores no tempo e no espaço. Exemplos são estimativas de vazões distribuídas no perímetro da bacia, como também previsões de vazões, risco de enchente e ainda pode ser possível a sua utilização em estudos de mudanças climáticas, Rodson (1992).

Modelos hidrológicos distribuídos estimam vazão na rede hidrográfica a partir de dados hidroclimáticos e das características físicas e antrópicas da bacia. Dessa maneira tornam-se importantes, pois os modelos hidrológicos distribuídos são capazes de estimar espacialmente vazões a partir de técnicas estatísticas de extrapolação de dados na área geográfica delimitada (TUCCI, 2006).

A previsão da vazão em rios é realizada em algumas grandes bacias utilizando combinações de modelos hidrológicos concentrados e propagação em rios, como é o caso do sistema de previsão do *National Weather Service*, dos Estados Unidos. Esta metodologia tem alguns problemas: é trabalhosa (cada sub-bacia exige um ajuste diferente) e os modelos

concentrados de sub-bacias são inerentemente incompatíveis com a estrutura de modelos atmosféricos.

Modelos hidrológicos com variáveis distribuídas no espaço permitem estimar vazões a partir de cenários futuros de acordo com as condições atuais na bacia de drenagem. Segundo Yu et. al. (2000), os modelos chuva-vazão distribuídos são capazes de realizar simulação a partir da distribuição espacial das chuvas e características da bacia de drenagem, sendo uma alternativa promissora para simulação de hidrogramas de escoamento em bacias hidrográficas.

À medida que os modelos atmosféricos vêm fornecendo previsões melhores de variáveis como a chuva e a temperatura, a previsão hidrológica poderá melhorar, principalmente quanto a antecedência de suas previsões (COLLISCHONN 2001).

Gama (2011), afirma que algumas características físicas que são consideradas como variáveis hidrológicas no modelo podem ter uma heterogeneidade muito forte na bacia como, por exemplo, a geologia, o uso e ocupação do solo (antrópica), o solo (pedologia), a geomorfologia, a distribuição espacial da precipitação, a cobertura vegetal, dentre outros. Modelos hidrológicos distribuídos ganham mais êxito e importância quando são obtidos hidrogramas em diferentes pontos na rede de drenagem, não apenas em um único ponto de saída, como ocorre nos modelos concentrados (GAMA 2011 *apud* PAIVA 2011).

Segundo Beven (1985) *apud* Collischonn (2001), os modelos distribuídos de base física têm aplicação potencial em:

- Previsão das conseqüências de alterações do uso do solo;
- Previsão da heterogeneidade espacial de variáveis de entrada e saída;
- Previsão do movimento de poluentes e sedimentos;
- Previsão hidrológica em bacias sem dados para a calibração de modelos conceituais.

Já para Gama (2011), a vantagem é que, por incorporar a variabilidade espacial da precipitação e dos parâmetros hidrológicos, podem ser usados na previsão de vazões em tempo real, na previsão de vazão sazonal, na estimativa de disponibilidade hídrica em locais sem dados e análise de impactos da construção e operação de múltiplas obras hidráulicas sobre regime hidrológico.

Tucci (1998), afirma que a dificuldade de encontrar dados disponíveis e representativos para o desenvolvimento e calibração do modelo, o emprego de relações simplificadas entre as variáveis intervenientes e a difícil incorporação de fatores, como os sociais (malha urbana), são elementos que dificultam a utilização desse tipo de modelo.

2.6 Modelo Atmosférico de Mesoescala WRF

O modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) é um modelo da nova geração do sistema de previsão numérica de tempo de mesoescala concebido para servir tanto a previsão de funcionamento e as necessidades de pesquisa atmosférica. Ele possui vários núcleos dinâmicos, um 3-dimensional variacional (3DVAR) sistema de assimilação de dados e uma arquitetura de software que permite paralelismo computacional e extensibilidade do sistema. WRF é adequado para um amplo espectro de aplicações em escalas que variam de metros a milhares de quilômetros.

O esforço para desenvolver WRF tem sido uma parceria de colaboração, principalmente entre o Centro Nacional de Pesquisa Atmosférica (NCAR), a Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e do Laboratório de Sistemas de Previsão (FSL), the Air Force Weather Agency (Agência AFWA), o Naval Research Laboratory, da Universidade de Oklahoma, e da Federal Aviation Administration (FAA). WRF permite aos pesquisadores a capacidade de realizar simulações em função tanto de dados reais ou configurações idealizadas. WRF fornece dados operacionais de previsão de um modelo que é flexível e eficiente, enquanto oferece os avanços na física, dados numéricos, e assimilação de dados contribuídos pela comunidade científica.

WRF tem uma crescente comunidade de usuários, workshops e tutoriais são realizadas a cada ano no NCAR. WRF está atualmente em uso operacional do NCEP, AFWA e outros centros. Este site fornece informações sobre o esforço WRF e sua organização, referências a projetos e previsão envolvendo WRF, e links para a página de usuários WRF, aplicações em tempo real, WRF e eventos relacionados.

Oliveira (2006) afirma em seu estudo que o modelo WRF foi desenvolvido para ser flexível, com código portátil eficiente em ambientes de computação paralela. Oferece uma

diversidade de opções físicas, além de sistemas avançados de assimilação de dados que estão sendo desenvolvidos e testados em conjunto com o modelo. Oliveira (2009) ainda afirma que o WRF pode ser usado em aplicações de diferentes escalas espaciais, desde alguns metros até milhares de quilômetros. Estas aplicações incluem previsões numéricas do tempo operacionais e voltadas para a pesquisa, pesquisas de parametrizações físicas e assimilação de dados, modelos dirigidos de qualidade do ar, acoplamento oceano-atmosfera e simulações idealizadas (ondas baroclínicas, convecção, etc).

Segundo Yamasaki (2006), um dos aspectos de sucesso do modelo, são as utilizações extensivas, mediante testes de avaliação em todo o globo. De acordo com Klemp (2005) *apud* Silva (2009) o desenvolvimento do modelo foi designado, também, para uma melhora na precisão da previsão de sistemas sinóticos e de nuvens, precisamente na resolução das simulações de 1 e 10 km.

Os resultados preliminares para previsão de chuvas convectivas no Brasil foram estudadas por Sakamoto *et al* (2006), que verificaram a eficácia do modelo WRF no prognóstico de um CCM (Complexo Convectivo de Mesoescala) ocorrido em janeiro de 2006, na região sul do país. Silva (2009) analisou a potencialidade de se prognosticar eventos de precipitação convectiva em Alagoas, e os resultados mostraram que as simulações realizadas pelo modelo foram satisfatórias, face às características observadas do evento.

Segundo Silva (2009) as parametrizações são responsáveis por resolverem estimativas das taxas de calor por convecção, turbulências (entre as superfícies da terra e oceano), e transferência radiativa no sistema, sendo transformados os resultados não lineares em resultados numéricos de onda e espacial. As parametrizações no WRF são, de uma maneira geral, separadas por blocos principais (SCKAMAROCK, 2008) no qual destacam:

- LW radiation (Radiação de Ondas Longas - LW),
- SW radiation (Radiação de Ondas Curtas - SW),
- Microphysics (Microfísica - MP),
- Surface Layer (Camada Superficial - SL),
- Land Surface Model (Modelo de Superfície Terrestre - LSM),

- Planetary Boundary Layer (Camada Limite Planetária - PBL),
- Cumulus Parametrization (Parametrização de Cumulus - CP),

2.6.1 Aplicações do modelo WRF

O WRF tem ampla aplicação descrita por Silva (2009), podendo auxiliar em diversas linhas de pesquisa, por vários locais do globo, independente de sua latitude e longitude, podendo simular dados de potencialidade de energia eólica, força e direção do vento, precipitações mínimas e extremas, precipitação acumulada diária, radiação global, camada limite planetária, Vorticidade em baixos, médios e altos níveis, umidade relativa, cobertura de nuvens, índice de conforto térmico, Linhas de corrente em vários níveis, temperatura da superfície do mar, temperatura do ar, dentre outros, que com o subsídio de outros modelos e ajustes nas equações poderá fazer previsão em tempo real.

Silva (2009) citou a variável possibilidade existe da opção de acoplamento com modelos oceânicos e hidrológicos. Pesquisas e trabalhos como o de Da Silva (2005), onde foi introduzido um método de melhoria na previsão de vazão do Rio São Francisco, com o modelo hidrológico MGB-IPH usando o modelo ETA como condições de contorno para dados meteorológicos. Estudos já realizados por Oliveira (2006), que acoplou o modelo WRF ao modelo hidrológico de chuva-vazão TOPMODEL, o qual apresentou resultados eficientes para a bacia do Rio Paraná.

2.7 Acoplamento de Modelos Atmosféricos e Modelos 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 (Oliveira, 2006).

No acoplamento unidirecional, os dados meteorológicos gerados pelos modelos atmosféricos são usados como dados de entrada nos modelos hidrológicos. Operacionalmente,

este tipo de acoplamento apresenta uma maior flexibilidade devido à autonomia entre os modelos de cada categoria. Assim, viabilizam previsões em conjunto, utilizando como membros diferentes previsões atmosféricas (BRAGA *et al.*, 2005).

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 geoordenadas (MOLDERS, RUHAAK, 2002).

Para Collischonn (2001), o acoplamento de modelos já foi alvo de estudos no passado. Porém a compatibilidade entre escalas tornou complicado o desenvolvimento do tema, uma vez que a simulação do comportamento da atmosfera considera análises em escalas globais ou continentais, enquanto que os modelos hidrológicos eram adaptados a uma análise hidrológica local. A integração entre estas duas realidades é o que justifica o desenvolvimento de técnicas que tenham como base a análise integrada entre modelos hidrológicos e atmosféricos, visando à simulação dos processos hidrológicos e suas diversas finalidades.

Cada vez mais vêm sendo realizados avanços significativos no desenvolvimento de modelos, tornando os modelos climáticos regionais interessantes para serem aplicados na previsão hidrológica. Vários autores já utilizaram a integração de forma unidirecional, forma geralmente usada, ou seja, os resultados dos modelos atmosféricos alimentam os hidrológicos (COLLIER E KRZYSZTOFOWICZ *apud* PICCILLI, 2007).

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.

Tradicionalmente, a quantificação do escoamento é feita através de modelagem hidrológica. A limitação existente na maioria dos modelos que quantificam o escoamento é

que apenas consideram os parâmetros que influenciam a fase terrestre do ciclo hidrológico (Braga *et al.*, 2006). A fase que ocorre na atmosfera é representada à parte em modelos atmosféricos. Entretanto, a disponibilidade da água depende tanto das condições físicas da superfície da terra quanto também das condições e variabilidade do clima. Além disso, a componente atmosférica traz, ao gerenciamento de recursos hídricos, a previsibilidade das chuvas, que é um grande aliado do planejamento de curto e médio prazos.

Nas últimas décadas, numa tentativa de se melhorar estas previsões, o acoplamento entre modelos atmosféricos e hidrológicos tem sido realizado (MÖLDERS e RÜHAAK, 2002; TUCCI *et al.* 2003; CHANG *et al.*, 2004). No acoplamento unidirecional, as informações meteorológicas (precipitação, evapotranspiração) simuladas ou previstas pelos modelos atmosféricos têm sido usadas como dados de entrada em modelos hidrológicos, como nos casos de avaliação de mudança climática, sendo a saída de um modelo utilizada como entrada ao seguinte.

Em alguns trabalhos Braga *et al.* (2006) afirmaram que os resultados do modelo atmosférico são considerados como dados de entrada a modelos hidrológicos em bacias hidrográficas. Passa-se assim a ter uma previsão de vazão dinâmica que pode ser fornecida ao mesmo passo de tempo que as previsões de precipitação.

Collier e Krzysztofowicz (2001) afirmam que as previsões numéricas de tempo e clima apresentam, ainda, erros relativamente grosseiros na previsão da precipitação. Esses erros são maiores quando são consideradas, na análise, condições pontuais. No entanto, para grandes bacias, ou seja, utilizando escalas superiores à resolução espacial dos modelos, estas previsões estão se tornando adequadas para conferir mais qualidade nas previsões hidrológicas.

O desenvolvimento do acoplamento bidirecional (interação simultânea dos processos atmosfera-superfície) é a demonstração da existência de estudos e pesquisas correntes nessa área, visando encontrar resultados mais consistentes e reais. Picilli (2007) *apud* Paiva (2011), afirma que por conta da melhora na qualidade dos dados de saídas dos modelos meteorológicos, começaram a aparecer limitações na representação da interface solo-atmosfera e sugere que uma possível solução seria o acoplamento bidirecional.

As bacias hidrológicas, em uma macroescala, podem ser vistas como medidores de precipitação com áreas de interceptação variáveis. Essa variabilidade da área permite

diagnosticar diferentes problemas associados às simulações atmosféricas. A qualidade de eventos meteorológicos simulados de larga escala pode ser estimada através de grandes bacias. Pequenas bacias fornecem informações sobre eventos de precipitação localizados (BENOIT; PELLERIN, 2000).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

O Rio Paraíba do Meio nasce no Estado de Pernambuco, a cerca de 800 m de altitude, a Latitude sul de 9°00' e Longitude 36°40' e deságua no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM) no litoral de Alagoas (Figura 1). Possui uma direção geral noroeste-sudeste ao longo dos seus 172 km de extensão, dos quais 126,57 km no Estado de Alagoas, e aproximadamente 46 km no Estado de Pernambuco. Nasce no município de Bom Conselho, e sua bacia hidrográfica abrange uma área de 3.330 Km² em oito (8) municípios pernambucanos (Bom Conselho, Brejão, Terezinha, Paratama, Caetés, Garanhuns, Saloá e Lagoa de Ouro) e doze municípios em território alagoano (Quebrangulo, Palmeira dos índios, Paulo Jacinto, Viçosa, Cajueiro, Capela, Atalaia e Pilar). Após percorrer seus 122 Km após a nascente, deságua na lagoa Manguaba, no município de Pilar, no estado de Alagoas

Figura 1 - Localização da bacia do rio Paraíba do Meio no Estado de Alagoas.



Fonte: Autor desta dissertação, 2012.

Segundo à Agência Nacional de Águas – ANA, a bacia do rio Paraíba do meio encontra-se localizada na parte sul da Região Hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental do Brasil. Dentro desta região, encontra-se a bacia do Paraíba do Meio (Figura 2), uma das 16 bacias hidrográficas presentes no Estado de Alagoas.

A Bacia do Rio Paraíba do Meio possui uma área total de 3.127,83 km², representando 11,2% da área do Estado de Alagoas (27.933,1 km², In: Anuário Estatístico de Alagoas, 1998), totalizando um perímetro de captação de 459,60 km.

De sua área total, 1.175,33 km², 37,6% da bacia localizam-se no Estado de Pernambuco, limitada por um perímetro de 217,96 km (considerando o limite da bacia incluída na soma), percorrendo 45,41 km neste Estado, sendo complementada por 1.952,5 km² (62,4% do total) pertencente ao território alagoano com perímetro de 241,64 km (considerando o limite da bacia não incluída na soma), neste percorrendo mais 126,57 km até à desembocadura no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba no litoral de Alagoas (Plano Diretor Região Hidrográfica – PARAIBA DO MEIO).

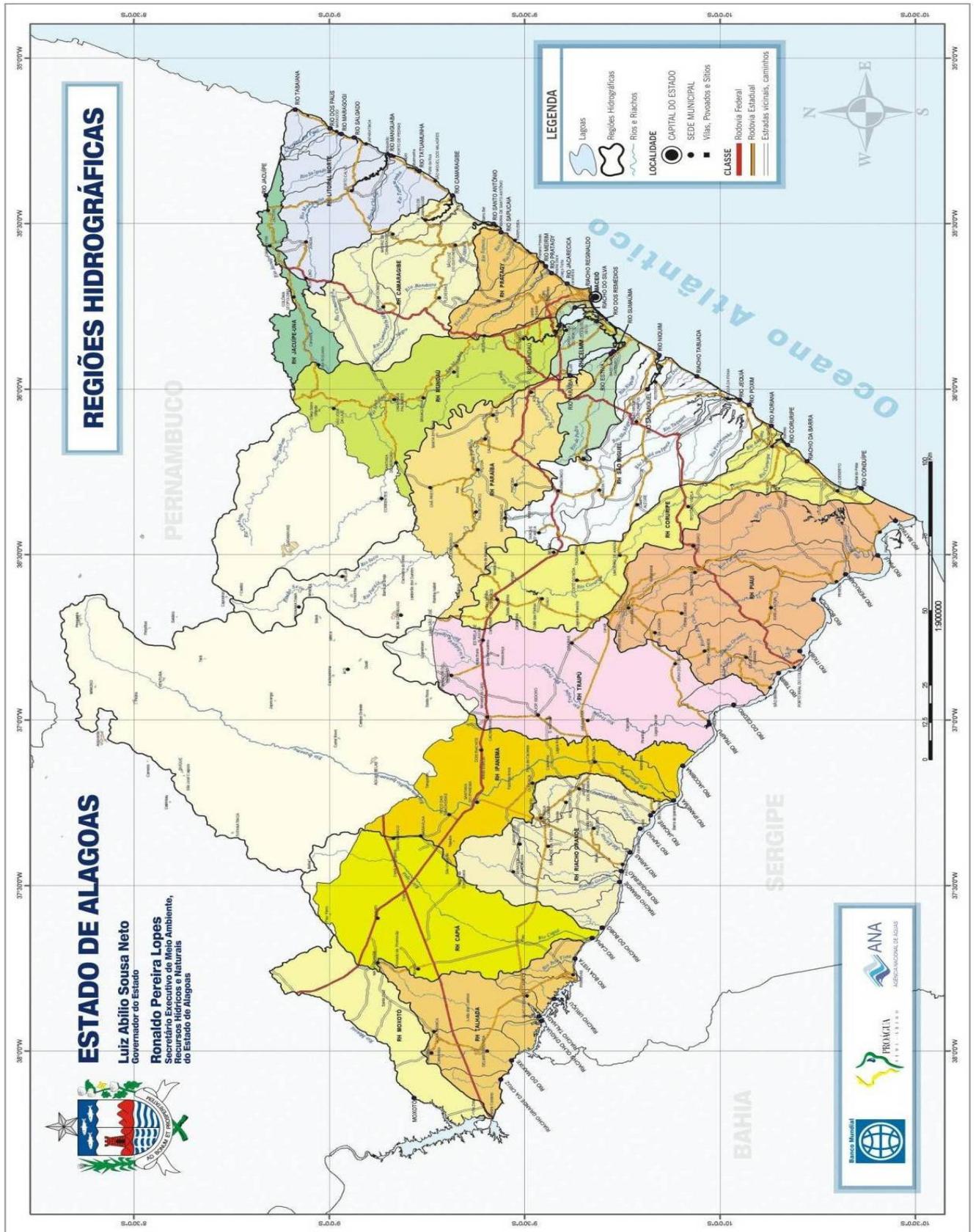
Figura 2 – Bacia do Rio Paraíba do Meio.



Fonte: Autor desta dissertação, 2012.

A Figura 3 apresenta todas as 16 (dezesesseis) regiões hidrográficas do Estado de Alagoas delimitadas pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos – SEMARH (2002).

Figura 3 – Localização das Regiões Hidrográficas em Alagoas.



Fonte: SEMARH, (2007)

As nascentes da Bacia do rio Paraíba do Meio estão localizadas na região semi-árida pernambucana. Os leitos do seu principal rio e de seus afluentes cruzam a fronteira PE-AL atingindo a região da zona da mata alagoana, até que deságüe na lagoa Manguaba, que tem conexão com o oceano Atlântico por meio do Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM).

3.2 Características físicas da bacia

3.2.1 Relevo da Bacia do Paraíba do Meio

A Bacia do Rio Paraíba do Meio drena por duas estruturas geológicas distintas, uma cristalina, representada pelo maciço Pernambuco-Alagoas de idade Arqueana, e outra sedimentar, constituída pelos sedimentos pliopleistocênicos da Bacia Sedimentar Alagoas. A área é definida no alto curso por uma superfície aplanada, de relevo ondulado com altitude entre 600 e 800 m. O médio curso caracteriza-se pela presença de formas estruturais e de dissecação homogênea e o baixo curso por uma superfície sedimentar dissecada em interflúvios tabuliformes e colinas.

Com vale em “V” em todo alto curso, após confluir com o Riacho Seco e ainda em território pernambucano, alcança o nível dos 500 m, no qual, se encrava entre encostas erodidas que formam colinas, serras e cristas, até a confluência com o Paraibinha, a montante da cidade de Capela. Nesse trecho, a bacia ocupa uma superfície dissecada em três níveis distintos 600 – 700m, 450 – 550m, nível dominante, e 230 – 350m, que formam degraus de acesso aos níveis mais elevados do maciço, (PDRH, 2001).

As correlações entre geomorfologia, geologia, solos, cobertura vegetal e declividade, permitiram identificar ao longo da área drenada pela bacia dois domínios morfoesculturais: Planalto da Borborema, com três unidades morfológicas, Superfície Pediplanada Central, Superfície Dissecada do Rio Paraíba e Depressão Periférica, e o Baixo Planalto Sedimentar com as unidades: Tabuleiros Costeiros e Planície Flúvio-Lagunar, (PDRH, 2001).

3.2.2 Tipos de Solos

A Bacia do Rio Paraíba no Estado de Pernambuco está inserida principalmente na região do Agreste, além de abranger, no seu trecho superior, parte do microclima de altitude de Garanhuns e adjacências. Refletindo esta diversidade fisiográfica, a área apresenta uma variada ocorrência de solos com propriedades bastantes distintas, destacando-se em termos de extensão, Podzólicos, Regosolos, Planosol Solódico e Solos Litólicos. Outras classes de solos são também encontradas na bacia, porém com representatividade bem menor.

A Bacia do Rio Paraíba no Estado de Alagoas está inserida nas regiões da zona do Agreste, Zona da Mata e Zona do Litoral. A área no Estado de Alagoas também apresenta uma variada ocorrência de solos com propriedades bastante distintas, destacando-se em termos de extensão, Solos Hidromórficos (Gleyzados e Orgânicos), Solos Aluviais, Planossolos Solódicos, Latossolo Vermelho Amarelo, Podzólico Vermelho Amarelo e Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico, (PDRH, 2001).

3.2.3 Vegetação

A cobertura vegetal apresenta características fitogeográficas da zona da caatinga, representada pelo Agreste, Mata e Litoral no Estado de Alagoas e, no Estado de Pernambuco, pela Zona do Agreste. O revestimento vegetal apresenta características distintas em função das condições edafoclimáticas e relevo.

Na Bacia do Rio Paraíba no Estado de Alagoas, encontra-se a Mata Tropical de encosta do tipo subperenifólio e subcaducifólio, no alto e médios vales, no baixo a mata de tabuleiro, com algumas manchas de cerrado, e na Baixada Litorânea vegetação de restinga (Francês - Taperaçuá - Massagueira) um pouco conservada. Na margem em que chega a água do mar aparecem os mangues dos solos salobros, e nos mais arenosos, o mangue de porte lenhoso, chamado Seriba, (PDRH, 2001).

No Estado de Pernambuco nas áreas mais úmidas dos municípios de Lagoa do Ouro e Bom Conselho, observa-se o revestimento vegetal correspondente à floresta tropical perenifólia, atualmente bastante degradada. Por sua vez, as áreas menos úmidas dos municípios de Bom Conselho, Terezinha, Saloá e Garanhuns apresentam o predomínio da vegetação de caatinga hipo e hiperxerófila de espécie decíduas, que variam de arbórea a

arbustiva, dotadas de espinhos e com abundância de cactáceas e bromeliáceas, correspondentes às subzonas do agreste e sertão central, (SECTMA/PE, 1997).

Com o crescimento da pecuária extensiva e a expansão da monocultura da cana-de-açúcar, após a implantação do PROÁLCOOL na década de 80, o desmatamento atingiu altos índices, substituindo quase que totalmente a vegetação original pela cana-de-açúcar, restando apenas manchas de mata nos vales com altas declividades, (PDRH, 2001).

3.2.4 Rede de Hidrográfica

O Rio Paraíba nasce no Estado de Pernambuco, a cerca de 800 m de altitude, a latitude sul de 9°00' e longitude 36°40' e deságua no Complexo Estuariano Lagunar de Mundaú-Manguaba no litoral de Alagoas. Possui uma direção geral noroeste-sudeste ao longo dos seus 172 km de extensão, dos quais 126,57 km no Estado de Alagoas, e aproximadamente 46 km no Estado de Pernambuco.

Vários afluentes de pequeno porte formam a Bacia do Rio Paraíba, que apresentam um regime de enxurrada durante a estação chuvosa (março a setembro). Os principais tributários nos Estados de Pernambuco e de Alagoas e são: Riacho Bálsamo e Riacho Seco em Pernambuco e em Alagoas os Rios Quebrangulinho, Rio Porongaba, Rio Caçamba, Rio Paraibinha, Riacho Lunga, Riacho do Canto, Riacho Pedra de Fogo, Riacho Riachão, Riacho Itapicuru, Riacho Isabel, Riacho do Carapa, Riacho Carangueja, Riacho Riachão, Riacho Cavaco, Riacho dos Veados, Riacho Limoeiro, Riacho Jundiá, Riacho Riachão.

O Rio Paraíba do Meio localiza-se entre os paralelos 08° 44' e 09° 39' de latitude sul e Meridianos 35° 45' e 36° 45' de longitude oeste ao longo dos seus 171,98 km apresenta 126,57 km de extensão que percorre áreas do Estado de Alagoas com um regime fluvial perene, e 45,41 km no Estado de Pernambuco com um regime fluvial intermitente. Na Tabela 1 são apresentadas várias características da Bacia do Rio Paraíba, consolidando as informações já apresentadas dentre outras ainda mais específicas.

Tabela 1- Características Físicas da Bacia do Rio Paraíba do Meio

Características Físicas da Bacia Rio Paraíba do Meio	
Área Total =	3127,83 km ²
Perímetro Total =	459,60 km
Área em Alagoas =	1952,5 km ²
Área em Pernambuco =	1175,33 km ²
Extensão Total =	171,98 km
Extensão Total de todos os rios =	1983,95 km
Coefficiente de Compacidade Kc =	2.30
Fator de Forma Kf =	0,106
Ordem da Bacia =	5ª ordem
Densidade de Drenagem Dd =	0,63 km / km ²
Densidade de Rios Dr =	0,437 km / km ²
Extensão Média do Escoamento Superficial E =	0,397 km
Sinuosidade Sin =	1,75
Razão de Bifurcação Rb =	4
Declividade Média da Bacia lmed =	16,77 m / km = 1,67 %
Elevação Máxima Hmax =	940 m
Elevação Mínima Hmin =	2 m
Elevação Média da Bacia Hmed =	369,05 m
Coefficiente de Massividade Km =	0,117 m / km ²
Coefficiente Orográfico Ko =	42,94 m ² / km ²
Perfil do Rio Paraíba	
Nascente =	800 metros de altura
Declividade Total I₁ =	4,64 m / km = 0,46 %

Fonte: PDRH (2001).

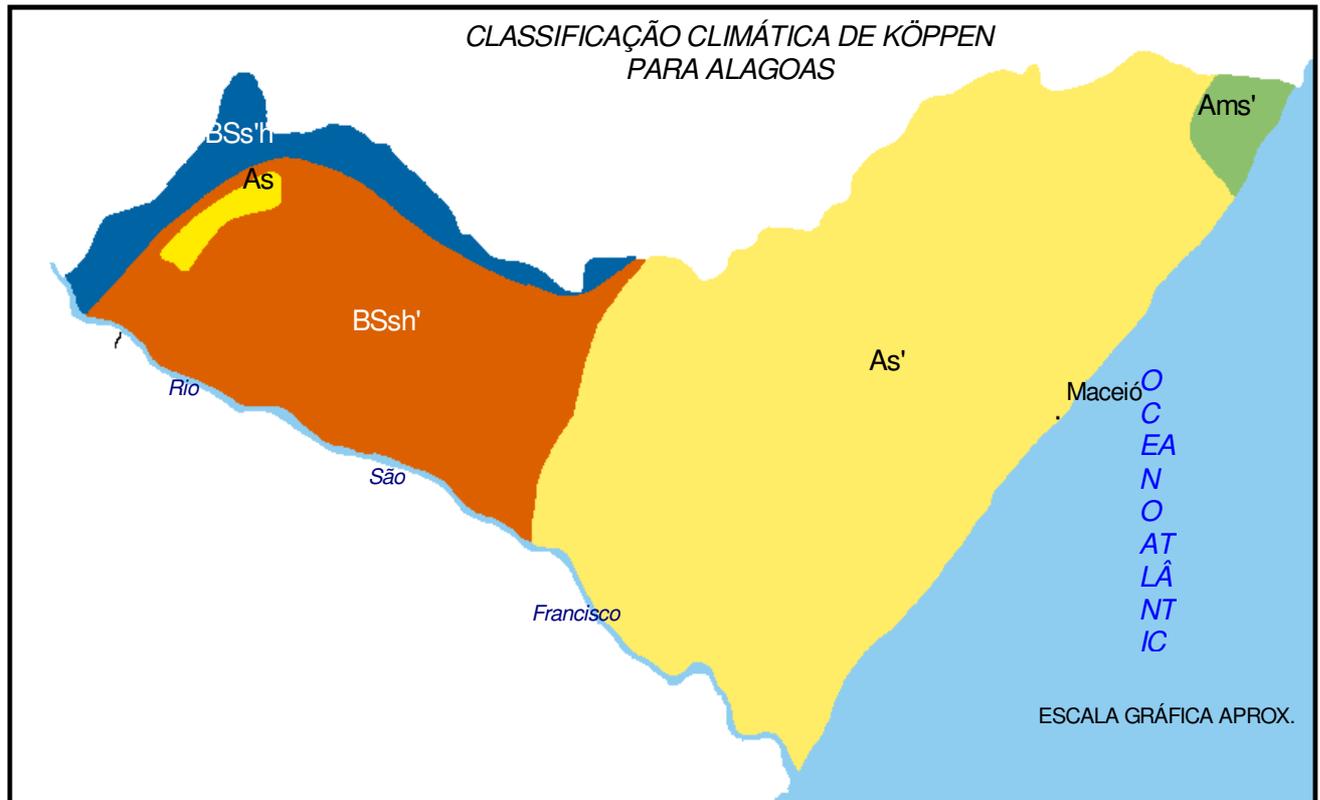
3.3 Aspectos Climáticos

Entre os principais sistemas meteorológicos que atuam no leste do Nordeste do Brasil e, conseqüentemente, influenciam as condições do tempo e no clima da região, destacam-se os Sistemas Frontais, Vórtices Ciclônicos de altos Níveis - VCANs, Ondas de Leste, Perturbações Ondulatórias no campo dos ventos Alísios e Linhas de Instabilidade tropical e, em grande escala, o fenômeno ENOS “El Niño” e “La Niña”, que é um fenômeno físico decorrente do aquecimento ou resfriamento das águas do oceano Pacífico Equatorial.

A atuação do fenômeno “El Niño” favorece a intensificação da alta subtropical do Atlântico Sul, influenciando significativamente a estação chuvosa da região, durante o período de abril a julho. Uma destas influências é a barragem das frentes frias oriundas do sul do continente, com isto os mecanismos que desencadeiam as precipitações do leste são inibidos, diminuindo assim a atuação das linhas de instabilidade.

A parte da Bacia do Rio Paraíba no Estado de Alagoas (figura 4) está localizada numa região de clima tropical quente e chuvoso com verão seco do tipo As', segundo a classificação de Köppen. O início da sua estação chuvosa de abril a julho é adiantado para outono. A pluviosidade média anual na bacia é 1.400 mm, de acordo com os índices pluviométricos obtidos pelos postos pertencentes a SUDENE e ao DNAEE, nos municípios de Pilar, Atalaia, Capela, Mar Vermelho, Palmeira dos Índios, Pindoba, Quebrangulo e Viçosa - AL.

Figura 4 - Classificação climática de Köppen para o Estado de Alagoas.

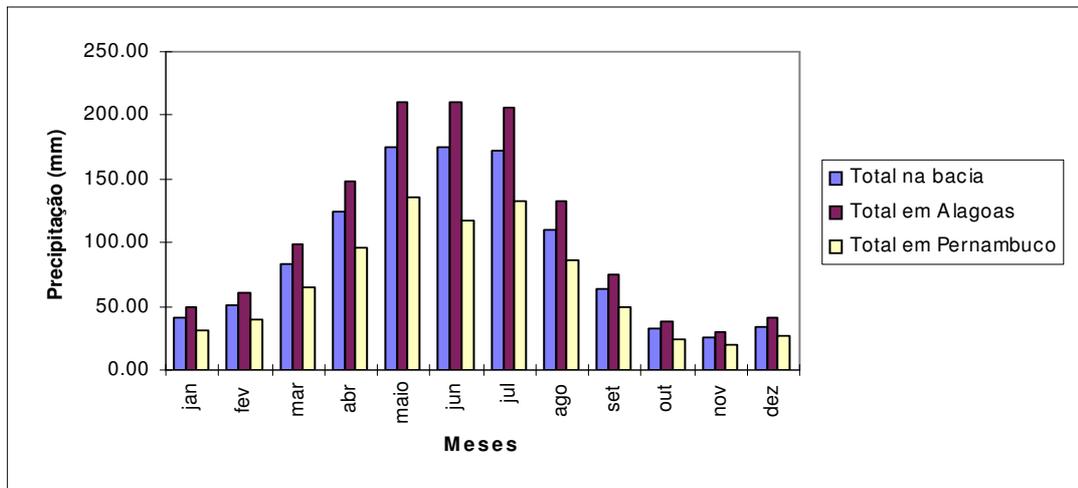


Fonte: PDRH (2001).

3.3.1 Precipitação Pluviométrica

A distribuição da precipitação pluviométrica na área da bacia está concentrada no período de abril a agosto, onde neste intervalo se concentra 69,8 % da precipitação anual. No trimestre maio a julho ocorre as maiores precipitações, correspondendo a 48,2 % da precipitação média anual com intensidade média em torno de 175 mm. No restante dos meses (janeiro a março e setembro a dezembro) ocorre 30,2 % da precipitação anual com uma distribuição ao longo do tempo de forma errática com uma variabilidade espacial e temporal bem característica da região do nordeste do Brasil, (PDRH, 2001). A figura 5, ilustra a variação espacial da precipitação média anual, de precipitação em relação a parte alagoana, pernambucana e a Bacia do Rio Paraíba como um todo.

Figura 5 - Precipitações Médias Mensais da Bacia do Rio Paraíba do Meio e as contribuições relativas de Pernambuco e Alagoas.



Fonte: PDRH, 2001.

De acordo com a análise dos dados climatológicos que caracterizam a área em estudo no território alagoano para o Plano Diretor da bacia do Paraíba do Meio, determinou-se a variação média anual dos principais parâmetros meteorológicos (tabela 2).

Tabela 2 - Média Anual dos Principais Parâmetros Meteorológicos em Alagoas.

PARÂMETROS	TOTAL MÉDIO ANUAL
Pressão atmosférica	995,8 hPa
Temperatura média do ar	24,7 °C
Temperatura máxima do ar	29,5 °C
Temperatura mínima do ar	20,8 °C
Amplitude térmica	8,7 °C
Umidade relativa do ar	79,2 %
Direção do vento	C – E
Velocidade do vento	2,2 m/s
Precipitação pluviométrica	1.400,0 mm

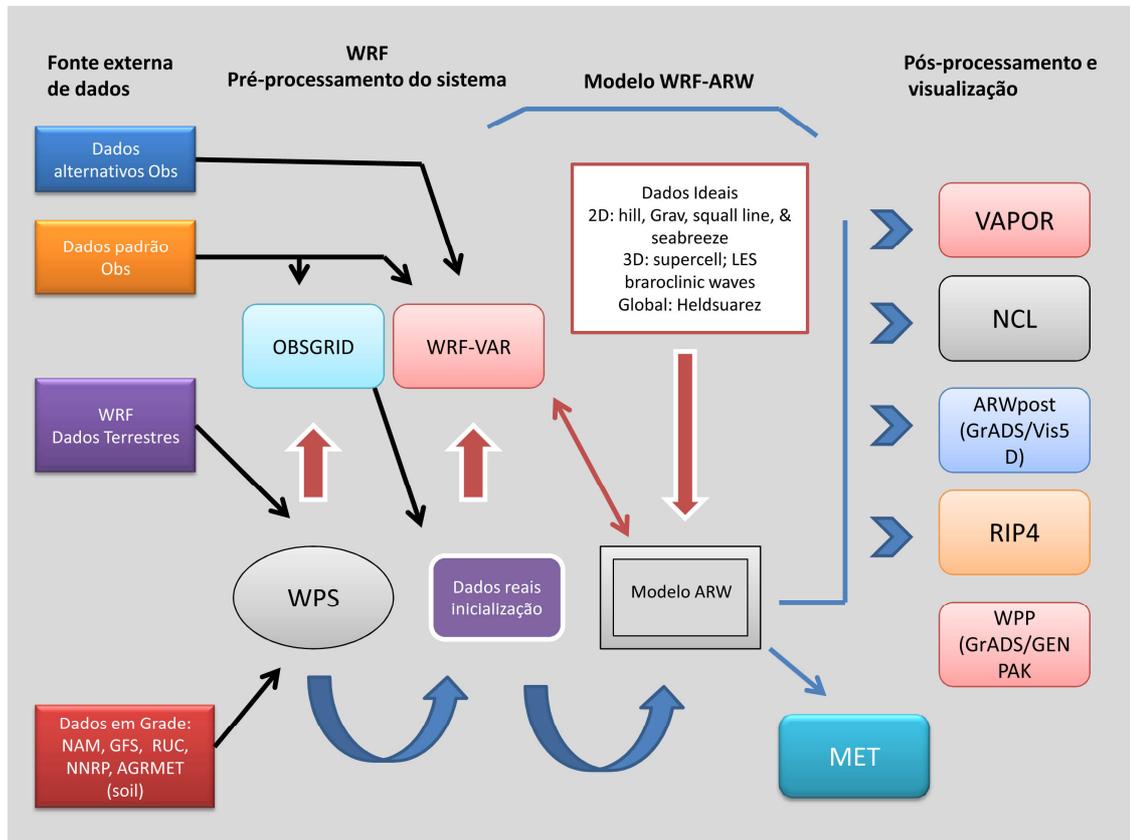
Fonte: Autor desta dissertação, 2012

3.4 Descrição do modelo Atmosférico WRF

O sistema WRF consiste dos principais programas: Pré-processamento do WRF (*WRF preproccessing system* - WPS), WRF - ARW Solver e o pós-processamento (ferramentas de visualização). A Figura 6 mostra o fluxograma dos componentes do sistema de modelagem

WRF-ARW, contendo os programas, seqüência de execução, formatos dos dados de entrada e saídas, visualizadores e recursos adicionais.

Figura 6 - Fluxograma do sistema de modelagem WRF-ARW, e seus componentes.



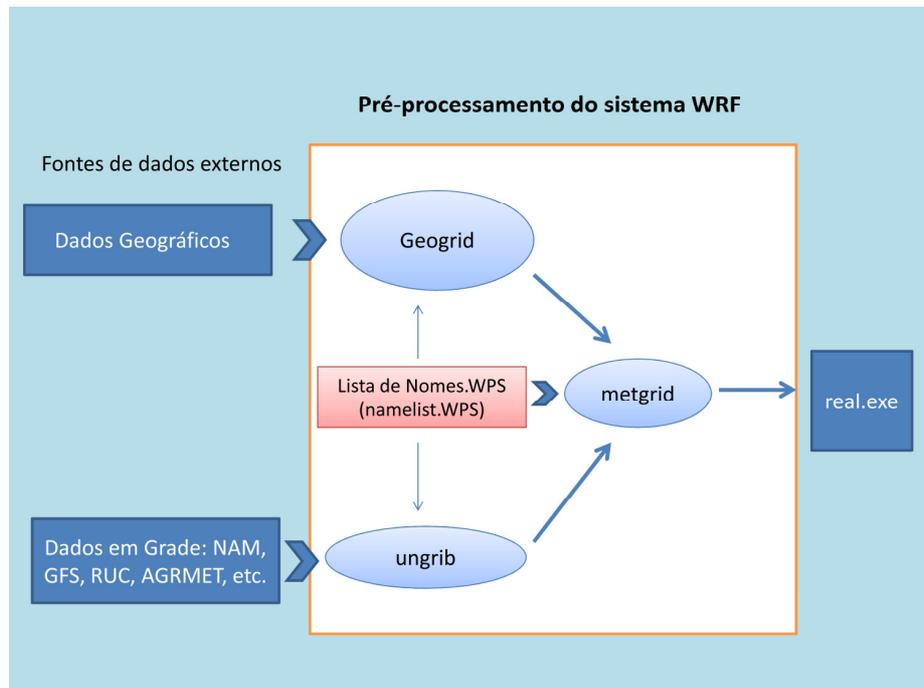
Fonte: Autor 2012. Adaptado da NCAR ARW User Guide, 2010.

3.4.1 Pré-Processamento

O sistema de pré-processamento do WRF (WPS) é um conjunto de três programas, onde o seu papel é preparar os dados de condição de contorno, para alimentar o programa *real*. Cada programa realiza uma etapa da preparação: *geogrid* define o domínio do modelo (região limitada ao cálculo da simulação ou previsão) e interpola dados fixos da geografia para a malha; *ungrib* extrai os campos meteorológicos dos arquivos em formato *GRIB*; em *metgrid* interpola horizontalmente os campos meteorológicos extraídos pelo *ungrib* para a malha do modelo definido pelo *geogrid*. O trabalho da interpolação vertical em níveis de pressão (ETA ou Sigma), dos campos meteorológicos para o WRF é realizado no programa *real*. Todos os programas do WPS lêem parâmetros de um arquivo *namelist*. Este arquivo determina as características de processamento a serem executados os programas contidos no

WPS irão realizar. A Figura 7 representa o esquema de funcionamento do sistema WPS desde a coleta dos dados ao processamento final, bem como a ordem de processamento.

Figura 7 – Fluxograma do sistema WPS desde a entrada dos dados reais ao processamento final, bem como a ordem de processamento.



Fonte: Autor desta dissertação, 2012. Adaptando da NCAR ARW User Tutorial, 2009.

3.4.2 Processamento

O modelo WRF é totalmente compressível e não hidrostático (com opção hidrostática). Possui coordenada vertical que segue o terreno na seqüência de pressão hidrostática, (níveis sigma) e grade de escalonamento Arakawa-C. Método de Runge-Kutta 2^a e 3^a ordem para tempo de integração e 2^a-6^a ordem no esquema de advecção horizontais e verticais. Usa um time-split de pequeno passo para modos de ondas acústicas e de gravidade. A dinâmica conserva variáveis escalares (NCAR, 2009).

3.4.3 Pós-processamento

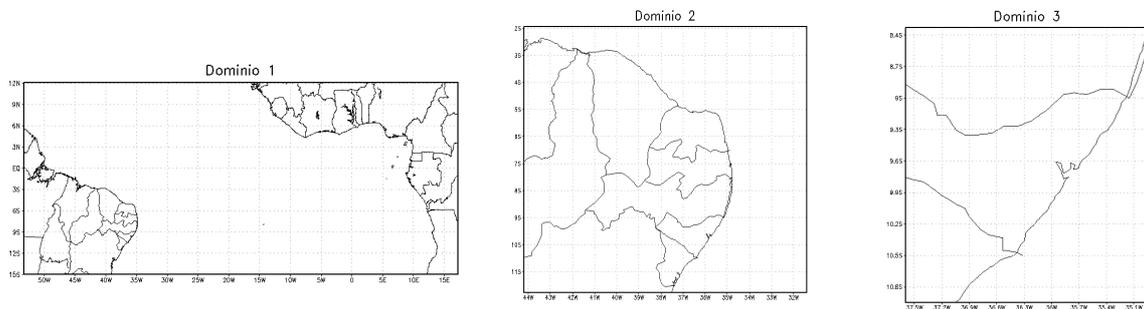
O pós-processamento faz com que o arquivo bruto gerado pelo modelo, passe a ser visível em forma de figuras com o auxílio dos programas auxiliares, tais como Vis5D, GEMPAK, GrADS e outros. Atualmente, são disponibilizados conversores que padronizam o

arquivo do modelo para um que seja manipulado por um dos programas de gráficos, como por exemplo, WRF2GrADS e o ARWPost, sendo o último utilizado neste trabalho.

3.4.4 Configuração de domínio do modelo

Foram utilizados três domínios aninhados no sistema “*two-way nesting*” onde os processos de domínios secundários interferem nos resultados do domínios primário e vice-versa. O domínio 1, possui área 100 pontos zonal com 40 pontos na meridional. O espaçamento entre estes é de 80 km; O domínio 2, com área de 47 pontos em x 34 pontos em y com espaçamento entre grade de 20 km; Domínio 3, com área de 61 pontos em x, 61 pontos em y com espaçamento de 5 km entre pontos de grade, e na vertical utilizado 27 níveis, onde a melhor resolução encontra-se dentro da camada limite planetária. A Figura 8 representa os domínios utilizados nas simulações do modelo de mesoescala WRF.

Figura 8 – Domínios utilizados nas simulações.



Fonte: Silva (2009).

3.4.5 Dados de entrada do modelo

Os dados meteorológicos de entrada do WRF foram os dados de análise FNL (Final Analysis GFS), resultante do modelo global GFS (Global Forecast System). Estes apresentam uma resolução espacial de 1° x 1° e uma resolução temporal de 6 horas, encontram-se disponíveis no endereço eletrônico <http://dss.ucar.edu/datazone/ds083.2/> onde neste existem scripts em *perl* ou *c-shell* para automatização dos downloads dos dados.

3.5 Descrições do modelo Hidrológico MGB-IPH

O modelo hidrológico distribuído utilizado é denominado MGB-IPH, e foi desenvolvido para a simulação de grandes bacias. A estrutura do modelo, descrito aqui, foi baseada na estrutura dos modelos LARSIM (O modelo hidrológico *Large Area Runoff Simulation Model* - LARSIM foi desenvolvido para ser o módulo de hidrologia superficial acoplado a um modelo atmosférico (Bremicker, 1998 apud Collischonn, 2001) e VIC-2L, com algumas adaptações. O módulo de balanço de água no solo foi simplificado, o módulo de evapotranspiração foi desenvolvido de acordo com os textos de Tucci (1998), foi utilizada no módulo de escoamento na rede de drenagem. O MGB-IPH é um modelo hidrológico distribuído que foi desenvolvido pelo centro de pesquisa do Instituto de pesquisas hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS.

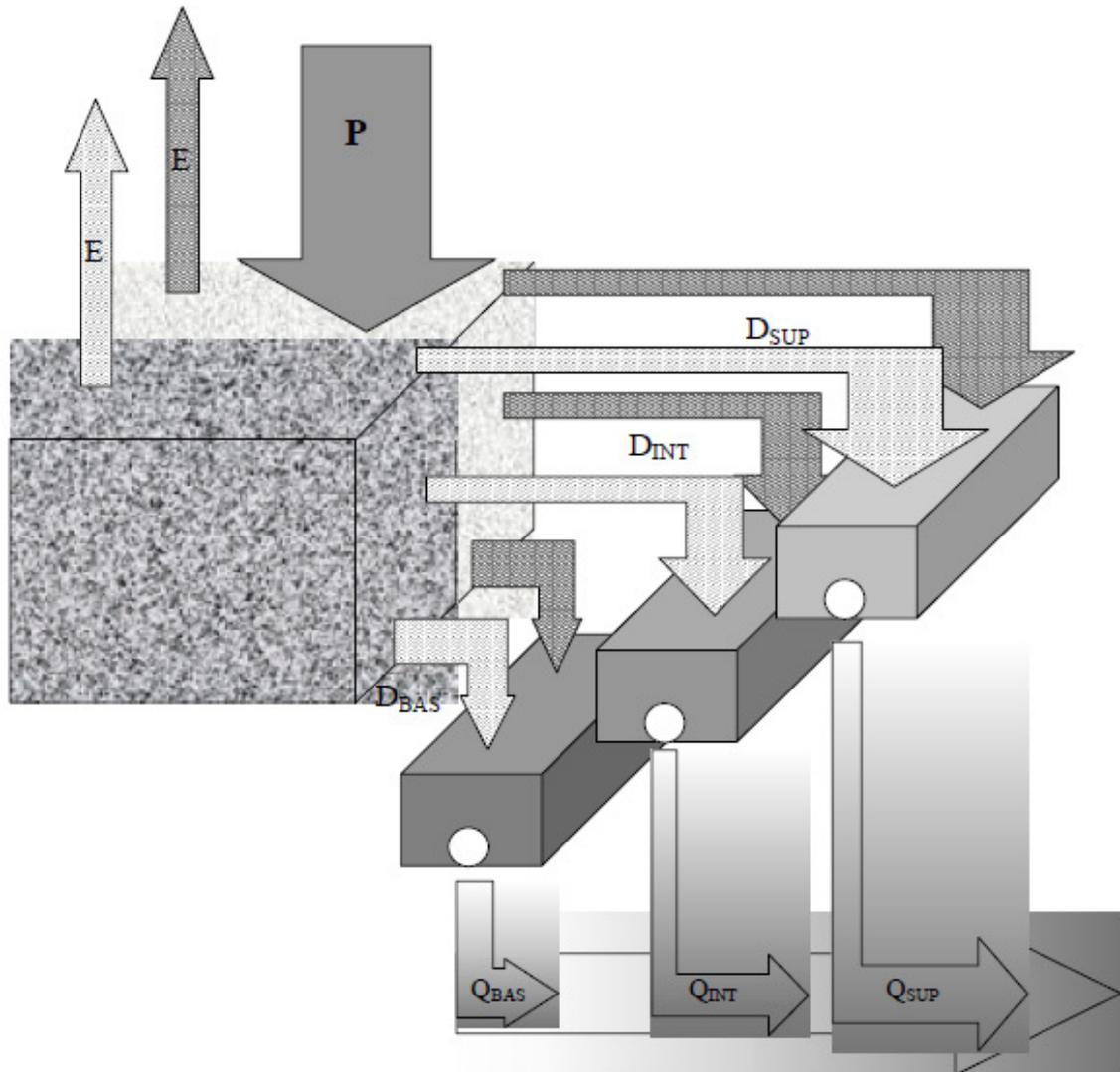
O modelo foi concebido para preencher a lacuna que existia na simulação do comportamento hidrológico em grandes bacias. Até o momento, a maioria dos modelos analisava processos hidrológicos apenas em pequenas ou médias bacias.

O escoamento difuso da vazão no interior das células é realizado integrando a contribuição dos blocos e propagando a vazão resultante através de reservatórios lineares simples. A figura 9 apresenta a estrutura de cálculo de uma célula do modelo. O tamanho das células é suficientemente grande para que se possa considerar que o transporte da água entre células ocorra apenas por escoamento ao longo dos principais rios. Células pequenas exigiriam a representação do escoamento subterrâneo e sub-superficial entre células (COLLISCHONN, 2001).

Os volumes drenados de cada bloco da célula são somados, segundo o seu tipo – subterrâneo (D_{BAS}), subsuperficial (D_{INT}) e superficial (D_{SUP}) – em três reservatórios. Após passar por estes reservatórios os escoamentos subterrâneos (Q_{BAS}), subsuperficial (Q_{INT}) e superficial (Q_{SUP}) são somados, resultando no escoamento gerado no interior da célula, que chega à rede de drenagem (COLLISCHONN, 2001).

Na rede de drenagem o escoamento é propagado e somado, conforme as características dos rios e das confluências, chegando ao exutório da bacia. Os hidrogramas de vazão podem ser avaliados no exutório da bacia bem como em qualquer outro ponto ao longo da rede de drenagem representada.

Figura 9 - Esquema de escoamento no interior de uma célula com dois blocos.

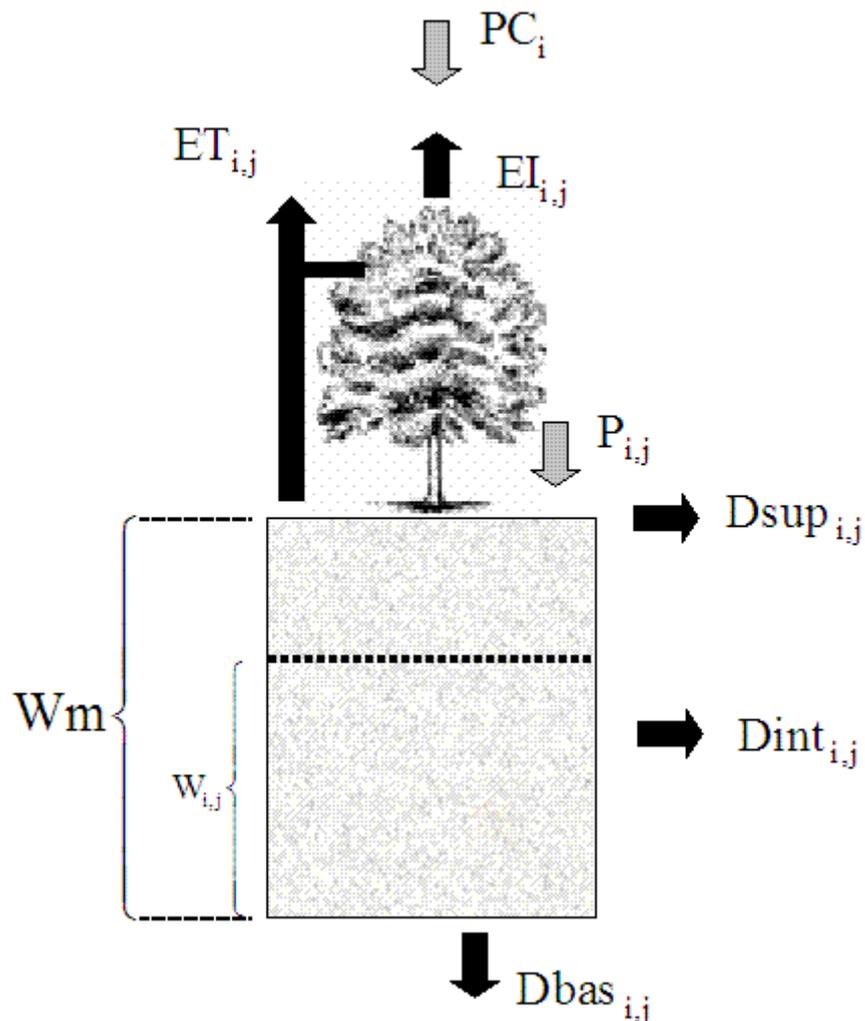


Fonte: Collischonn e Tucci (2001).

Quando entra no sistema de drenagem da bacia o modelo não distingue mais o tipo de escoamento. A geração de escoamento superficial se dá por excesso de capacidade de armazenamento, sendo simplificado por relações estatísticas entre a umidade do solo e a fração de área de solo saturada.

O modelo por ser distribuído, considera a heterogeneidade da bacia. Dessa forma, a bacia é dividida em mini-bacias que subdivididas em blocos em função do uso do solo. Desta forma, o modelo divide a bacia hidrográfica em células quadradas. Cada célula, por sua vez, é dividida em blocos, definidos pela cobertura e pela capacidade de armazenamento do solo. O balanço de armazenamento no solo é realizado de maneira independente para cada um destes blocos, utilizando o esquema apresentado na figura 10.

Figura 10 - Esquema do balanço de água vertical na camada de solo.



Fonte: Tucci, (1998).

Existem três reservatórios independentes para cada mini-bacia, uma para o escoamento superficial, outro para o sub-superficial e um terceiro para o subterrâneo. Estes reservatórios armazenam o escoamento de todos os blocos de uma mesma célula, ou seja, o que foi produzido de escoamento sub-superficial após o balanço vertical em um bloco, irá ser armazenado no reservatório sub-superficial (Figura 9).

A vantagem do modelo hidrológico distribuído é que em todas as mini-bacias (células) é possível obter a vazão média diária como variável de saída. Além disso, o modelo fornece em todos os blocos de todas as células sub-divididas pelo Modelo, o valor diário das seguintes

variáveis: escoamento superficial, sub-superficial e subterrâneo, armazenamento no solo e evaporação da água interceptada na vegetação (COLLISCHONN e TUCCI, 2001).

3.5.1 Descrição da interpolação dos dados Hidrometeorológicos

O aplicativo INTERPLU.exe é um executável auxiliar do MGB-IPH (COLLISCHONN, 2001), que foi elaborado para interpolar espacialmente os dados hidrometeorológicos. O programa “INTERPLU.exe” tem a finalidade preencher falhas e interpolar espacialmente os dados de precipitação observados nos postos pluviométricos. Esse programa é executado na fase de entrada, os arquivos “CELL.HIG”(as numerações, ordem e localização das células do modelo), o “INTERPLU.HIG” (Coordenadas Geográficas dos postos) e as séries históricas com os dados observados dos posto pluviométricos.

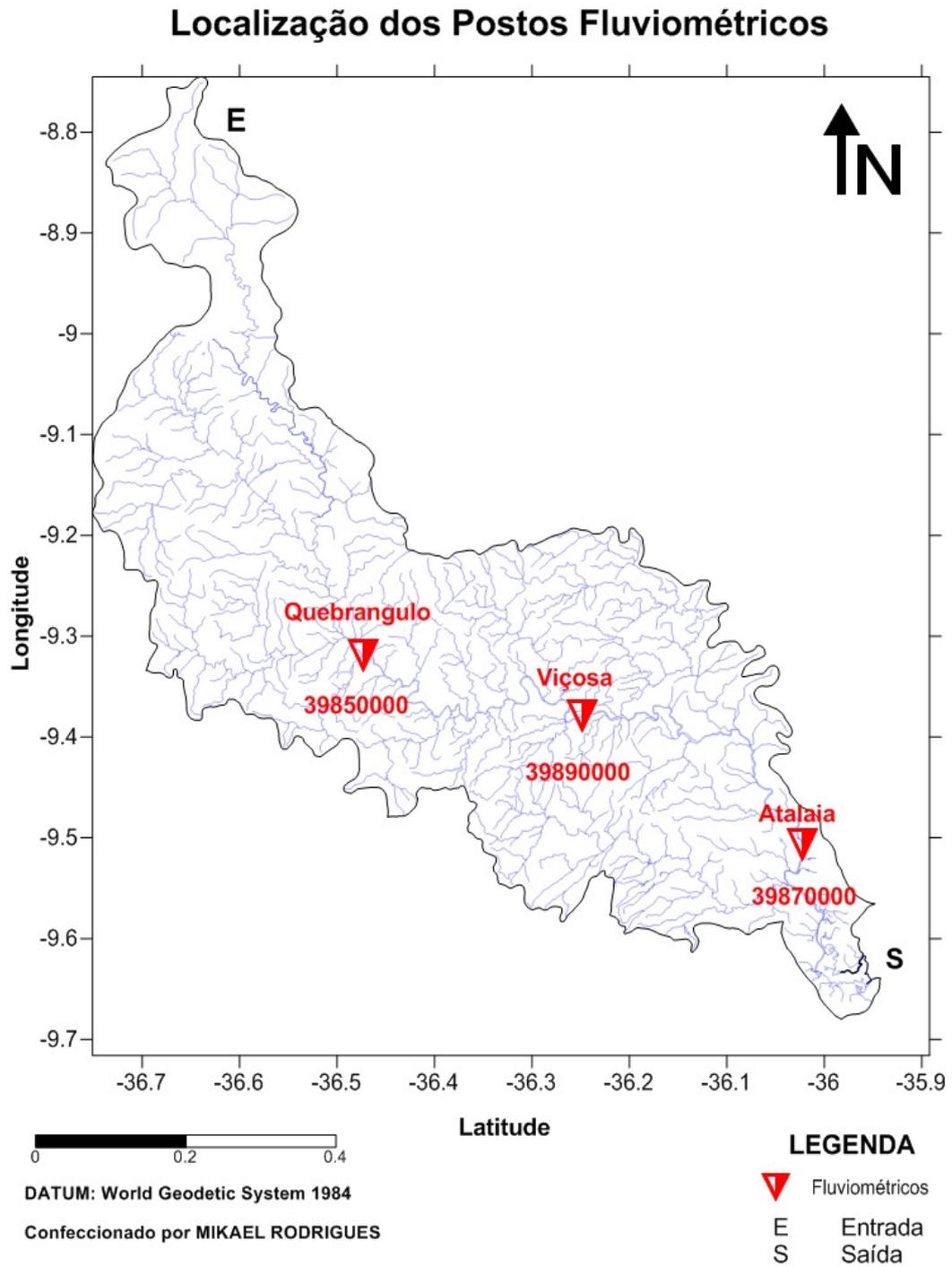
Para a realização desta pesquisa, o INTERPLU foi utilizado nas duas vezes em que foi necessário interpolar as informações pluviométricas para os centróides das mini-bacias do modelo hidrológico, contendo as informações das precipitações previstas e observadas.

3.5.2 Preparação dos dados

Os dados necessários para a execução deste trabalho foram os de precipitação prevista pelo WRF, dados de precipitação observada e dados diários de vazão e precipitação observada nas estações localizadas na bacia do Rio Paraíba do Meio, para o período entre janeiro de 2008 e março de 2009.

Os dados de vazão e precipitação observadas foram disponibilizados pela Agência Nacional de Águas – ANA, através do software HIDROWEB 2011, disponibilizado no próprio site (www.ana.gov.br). As estações fluviométricas escolhidas, dos quais foram obtidos os dados, são localizadas nos municípios de Quebrangulo, Atalaia e Viçosa-AL (Figura 11).

Figura 11 - Postos Fluviométricos.



Fonte: Autor desta dissertação, 2012.

Sobre estes postos, a Tabela 3 dispõe de informações como identificação dos Postos Pluviométricos e Fluviométricos, bem como as Coordenadas Geográficas dos mesmos.

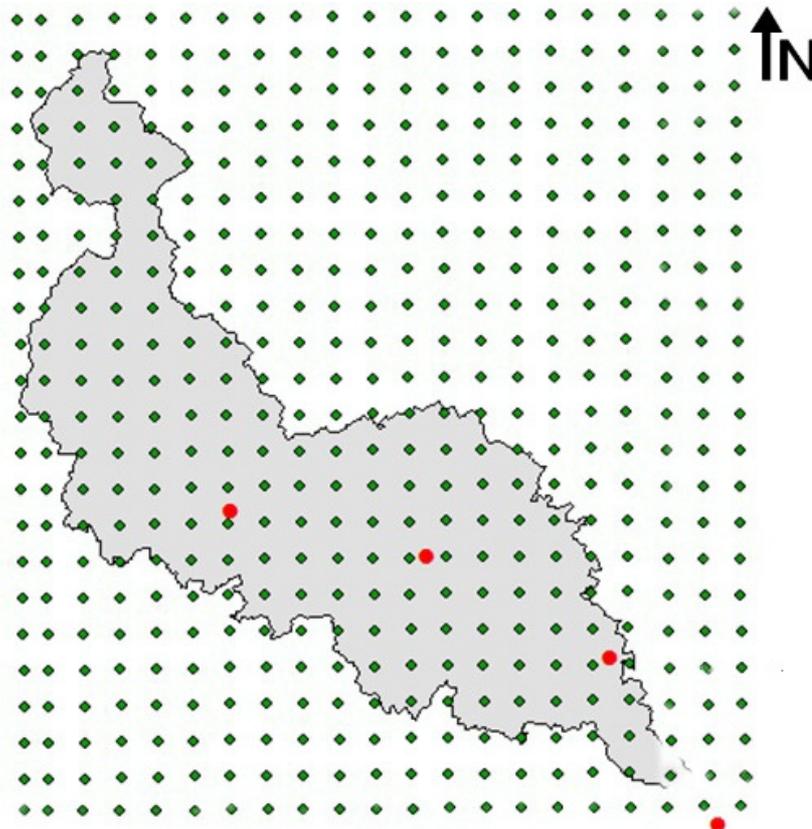
Quadro 1 – Dados dos postos fluviométricos e pluviométricos utilizados no estudo

POSTOS PLUVIOMÉTRICOS								
Código	Nome	Sub-bacia	Rio	Estado	Responsável	Operadora	Longitude	Latitude
935057	MARECHAL DEODORO	39 -		AL	ANA	CPRM	-35.892	-9.716
936110	ATALAIA	39 -		AL	ANA	CPRM	-36.023333	-9.506667
936111	VIÇOSA	39 -		AL	ANA	CPRM	-36.249167	-9.379167
936115	QUEBRANGULO	39 -		AL	ANA	CPRM	-36.491944	-9.320278
POSTOS FLUVIOMÉTRICOS								
Código	Nome	Sub-bacia	Rio	Estado	Responsável	Operadora	Longitude	Latitude
39850000	QUEBRANGULO	39	RIO PARAÍBA	AL	ANA	CPRM	-36.491944	-9.320278
39870000	ATALAIA	39	RIO PARAÍBA	AL	ANA	CPRM	-36.022778	-9.506667
39890000	VIÇOSA	39	RIO PARAÍBA	AL	ANA	CPRM	-36.249167	-9.379167

Fonte: HIDROWEB (2011)

Os dados de entrada simulados no modelo WRF, foram gerados com antecedência de um dia, com resolução espacial de 5 km (domínio 03) para o período entre janeiro de 2008 á março 2009. A malha utilizada e gerada pelo WRF apresentou um total de 391 (trezentos e noventa e um) pontos geográficos, onde cada um deles fornece a previsão de chuva diária para os 456 dias do período em estudo. O WRF obtém os dados sempre à meia noite (Meridiano de Greenwich - 00:00:00 UTC, o que corresponde a 21 horas no horário local, desconsiderando o horário de verão. Os pontos geográficos que compõem a malha, formam uma matriz de 23x18, como pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 - Localização dos postos e dos pontos gerados pelo WRF sobre a Bacia do Paraíba do Meio.



Fonte: Adaptado de Paiva, 2011.

Depois que o WRF gerou os dados de precipitação prevista, observou-se que os arquivos precisavam ser convertidos do formato original (Figura 13) para o formato de entrada do programa “INTERPLU.exe” para servir como dado de entrada do MGB-IPH (Figura 14).

Figura 13 – Formato de saída do WRF.

```
Est: ponto_1x1 Lat: -8.66 Long: -36.75
data chuva
Open file
00Z02APR2008 20.5724
00Z03APR2008 8.44194
00Z04APR2008 0.00856403
00Z05APR2008 0.00353609
00Z06APR2008 13.9961
00Z07APR2008 15.7496
00Z08APR2008 0.0339285
00Z09APR2008 2.883
00Z10APR2008 0.00902385
00Z11APR2008 4.93908e-05
```

Fonte: Autor desta dissertação, 2012.

Figura 14 – Formato de entrada.

01	01	2008	-1.00
02	01	2008	0.00
03	01	2008	0.00
04	01	2008	0.08
05	01	2008	0.00
06	01	2008	0.00
07	01	2008	0.00
08	01	2008	0.00
09	01	2008	0.00
10	01	2008	0.00
11	01	2008	0.00
12	01	2008	1.10
13	01	2008	0.77
14	01	2008	0.00
15	01	2008	0.00
16	01	2008	0.32
17	01	2008	0.07
18	01	2008	0.01
19	01	2008	0.00
20	01	2008	0.00
21	01	2008	1.55

Fonte: Autor desta dissertação, 2012.

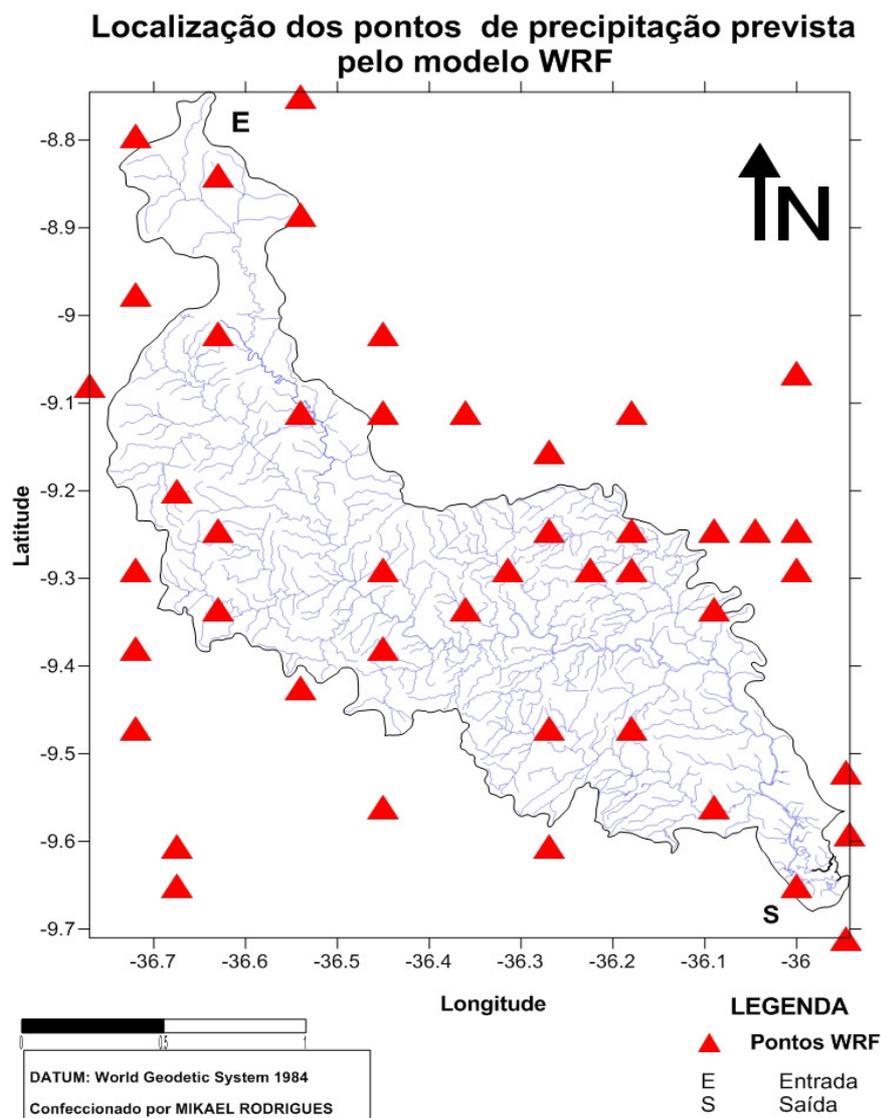
3.6 Análise espacial de precipitação

Foram utilizados dados de 43 (quarenta e três) pontos de precipitação prevista pelo modelo de mesoescala WRF (Figura 15), com valores de precipitação acumulada dos 456 dias (2008 e janeiro, fevereiro e março de 2009), retirados da grade inicial de 391 (trezentos e noventa e um) pontos geográficos da malha (Figura 12), para serem correlacionadas aos 4 (quatro) postos pluviométricos da Agência Nacional de Águas – ANA: 935057 (Marechal Deodoro), 936110 (Atalaia), 936111 (Viçosa) e 936115 (Quebrangulo).

Já para análise dos dados de precipitação observada, foram utilizados dados de chuva dos pluviômetros da ANA, posteriormente, foi elaborada uma extrapolação dos dados, tendo em vista o baixo número de pluviômetros espalhados na bacia estudada, pois apenas existiam valores de precipitação entre Coordenadas $-36^{\circ}50' S / -9^{\circ}33' W$ e $-35^{\circ}90' S / -9^{\circ}72' W$. Feito a extrapolação, passou a existir valores para toda área da bacia, com Coordenadas entre $-36^{\circ}75' S / -8^{\circ}85' W$ e $35^{\circ}90' S / -8^{\circ}85' W$.

Posteriormente foi elaborado um mapa de isoietas por meio do software ArcGis 9.0 com saída no *software* Surfer – versão 10, utilizando o método estatístico de interpolação Krigagem-KRG, fundamental para a análise espacial da chuva prevista em todo território da bacia estudada. O interpolador espacial foi aplicado às precipitações acumuladas para o ano de 2008 e Janeiro, Fevereiro e Março de 2009. Segundo Vieira (2000), este interpolador pondera os vizinhos do ponto a ser estimado, obedecendo aos critérios de não-tendenciosidade. Uma avaliação preliminar sobre esta dependência pode ser realizada pelo coeficiente de Determinação (r^2) utilizando o método de Santos (2007).

Figura 15 – 43 pontos de precipitação prevista pelo modelo WRF.



Fonte: Autor desta dissertação, 2012.

Quanto a interpolação, o método utilizado foi o de kringagem por não apresentar uma tendência e de mínima variância como citaram Carvalho e Assad (2005) e Vieira (2000) *apud* Viola, (2010). Através de kringagem é possível obter uma distribuição espacial mais homogênea, devido a sua ponderação ser considerada otimizada e a dependência espacial traz consigo um controle parcial do erro aleatório, dando resultados satisfatórios. Logo, o método tem a característica de mostrar a variabilidade espacial da precipitação pluvial através de dados de modelagem WRF e o de kringagem de forma mais homogênea e as influências das dependências e tendências reduzindo consideravelmente as tendências. A Interpolação de dados é um método utilizado para encontrar valores de uma sucessão entre dois valores consecutivos conhecidos, é uma técnica utilizada para estimativa do valor de um atributo em locais não amostrados a partir de pontos amostrados na mesma área ou região. Carvalho (2005) verificou que o método de kringagem apresentou distribuição espacial muito mais homogênea do que os demais métodos interpoladores. Esse resultado é obtido principalmente pelo fato desse interpolador ser não-viciado, com variância mínima.

3.7 Análises Meteorológicas de chuvas intensas para o período estudado

Para analisar os casos de precipitação intensa, que conseqüentemente causaram vazões maiores, em alguns casos, superiores a série histórica e em outros abaixo do esperado como foi visto no mês de junho de 2008, foi utilizado como auxílio, o Boletim de Monitoramento e Análise Climática – CLIMANÁLISE, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE e Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC.

As imagens do satélite GOES – 10 do canal Infravermelho e imagens realçadas – cedidas pela Divisão de Satélites Ambientais – DGA do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE - foram utilizadas para análise de mecanismos sinóticos causadores de chuva intensa na costa leste do NEB, sobre o Estados de Alagoas e Pernambuco, onde está localizada a bacia do rio Paraíba do Meio.

3.8 Acoplamento dos modelos atmosféricos e hidrológicos

Foi utilizado o executável INTERPLU, no auxílio do MGB-IPH, para interporlar as precipitações previstas pelos 391 pontos aos centróides das 53 sub-bacias delimitadas na bacia do rio Paraíba do Meio. Um novo arquivo “INTERPLU.HIG” foi criado, considerando as informações dos 391 pontos de precipitação prevista pelo WRF (Figura 16).

Figura 16 - Amostra do arquivo INTERPLU.HIG adaptado para todos os pontos de precipitação prevista pelo modelo WRF.

```
!inicio
  DIA      MES      ANO
    1      1      2008
!fim
  DIA      MES      ANO
  31      3      2009
  NC      NU      NT      NP      (numero de celulas,
bloco, intervalos de tempo, postos)
  53      456      414
!DE QUAL INTERVALO DE TEMPO PRETENDE COMEÇAR A INTERPOLAÇÃO?
  1      !CORRESPONDE A 1/4/2008
!Geracao de arquivo grads (1 para ligar - 0 desligar, tamanho de
célula da grade)
  0      0.1      '09:00z01jan1968      1dy'
      codigo      long dec      lat dec
99110101.txt      -36.000      -8.660
99110102.txt      -36.045      -8.660
99110103.txt      -36.090      -8.660
99110104.txt      -36.135      -8.660
99110105.txt      -36.180      -8.660
99110106.txt      -36.225      -8.660
99110107.txt      -36.270      -8.660
99110108.txt      -36.315      -8.660
99110109.txt      -36.360      -8.660
99110110.txt      -36.405      -8.660
99110111.txt      -36.450      -8.660
99110112.txt      -36.495      -8.660
99110113.txt      -36.540      -8.660
99110114.txt      -36.585      -8.660
99110115.txt      -36.630      -8.660
99110116.txt      -36.675      -8.660
99110117.txt      -36.720      -8.660
99110118.txt      -36.750      -8.660
99110201.txt      -36.000      -8.705
99110202.txt      -36.045      -8.705
99110203.txt      -36.090      -8.705
99110204.txt      -36.135      -8.705
99110205.txt      -36.180      -8.705
99110206.txt      -36.225      -8.705
99110207.txt      -36.270      -8.705
99110208.txt      -36.315      -8.705
99110209.txt      -36.360      -8.705
99110210.txt      -36.405      -8.705
99110211.txt      -36.450      -8.705
99110212.txt      -36.495      -8.705
99110213.txt      -36.540      -8.705
99110214.txt      -36.585      -8.705
99110215.txt      -36.630      -8.705
99110216.txt      -36.675      -8.705
```

Fonte: Autor desta dissertação, 2012.

As informações de cada ponto de precipitação prevista: (nome, longitude, latitude e numero de referencia da estação) tiveram que ser adicionadas nos arquivos: “Nomes.txt”,

“Longitudes1.txt”, “Latitudes1.txt”, “Estações.txt, pois são postos fictícios e não existem essas informações no banco de dados do MGB - IPH.

O programa INTERPLU foi executado e obteve-se o arquivo “CHUVABIN.HIG”, contendo informações da chuva prevista interpolada para as 53 sub-bacias.

Este procedimento descrito foi repetido com os dados de chuvas observados nos postos pluviométricos ao invés dos dados de chuvas previstas, a fim de gerar outro binário “CHUVABIN.HIG” com os dados observados interpolados para as sub-bacias.

As simulações hidrológicas foram realizadas por meio do software MapWindows®, contendo o plugin do MGB-IPH, para estimar a vazão a partir das chuvas previstas pelo modelo de mesoescala WRF.

Análise da eficiência do acoplamento do Modelo de Mesoescala WRF e o Modelo Hidrológico MGB-IPH, cada estação fluviométrica (Estações de Quebrangulo – 39850000; de Viçosa – 3989000; e Atalaia - 39870000), tiveram seus valores simulados pelo MGB-IPH e posteriormente, os resultados das simulações de vazões com chuva prevista, simuladas primeiramente pelo WRF no domínio 03 e acopladas ao modelo hidrológico MGB-IPH, em seguida com a chuva observada foram comparados com as vazões observadas. Para comparar os resultados obtidos e verificar se houve melhoria na obtenção dos resultados ao utilizar o acoplamento, foram adotados 2 (dois) procedimentos de comparação: hidrogramas e estatística, utilizando o coeficiente de Pearson para avaliar a qualidade deste ajuste de modelos. Todos eles tiveram como base de comparação as vazões reais observadas nas estações fluviométricas.

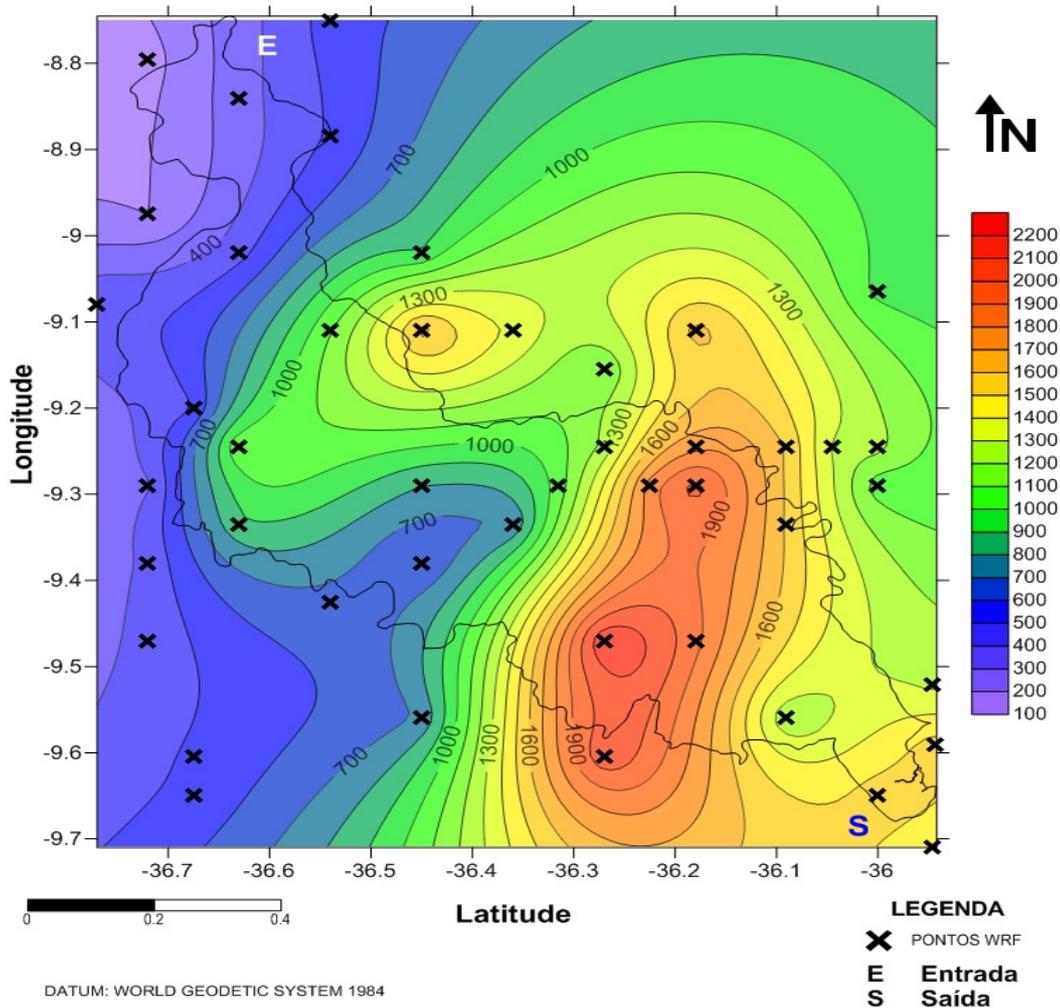
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise espacial da precipitação (Dados de Precipitação Prevista)

A obtenção de dados em campo através de pluviômetros ou pluviôgrafos em uma bacia hidrográfica normalmente não se encontram em grandes quantidades e talvez de forma mal distribuída pela a área da bacia. Então a utilização de modelagem de precipitação quando calibrada e, principalmente, validada, dando importante suporte para entender de forma qualitativa e quantitativa a distribuição das chuvas na bacia hidrográfica. Na Figura 17, o mapa com análise espacial de precipitação com os 43 pontos gerados pelo WRF sobre a bacia do Rio Paraíba do Meio com valores de precipitação acumulada dos 456 dias.

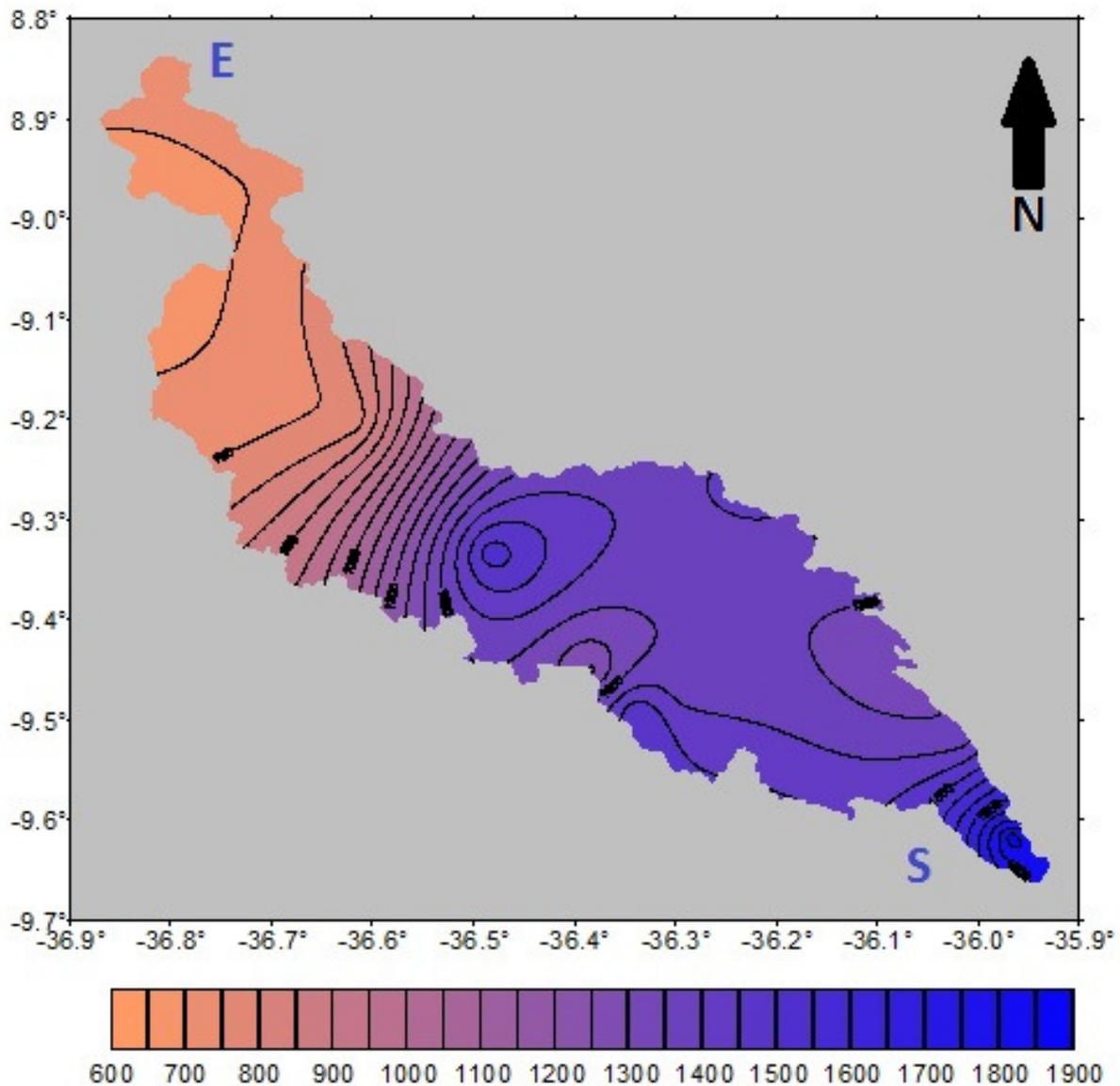
Figura 17 – Mapa de ISOIETAS da Bacia do Rio Paraíba do Meio a partir dos pontos do WRF com os valores de precipitação acumulado dos 456 dias.

ISOIETAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO MEIO - KRIGING



Pela visualização da figura 17 gerado a partir da metodologia de interpolação, pode-se obter uma avaliação importante da consistência no produto final do processo de interpolação. A Figura 18 apresenta a precipitação média anual para o Estado de Alagoas, obtido por krigagem a partir de série histórica de 79 anos (1913 a 1992), exposto do Plano Diretor dos Recursos Hídricos (PDRH) da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Meio.

Figura 18 - Precipitações Anuais Médias da Bacia do Rio Paraíba do Meio (2001), onde E = entrada da bacia e S = saída da bacia.



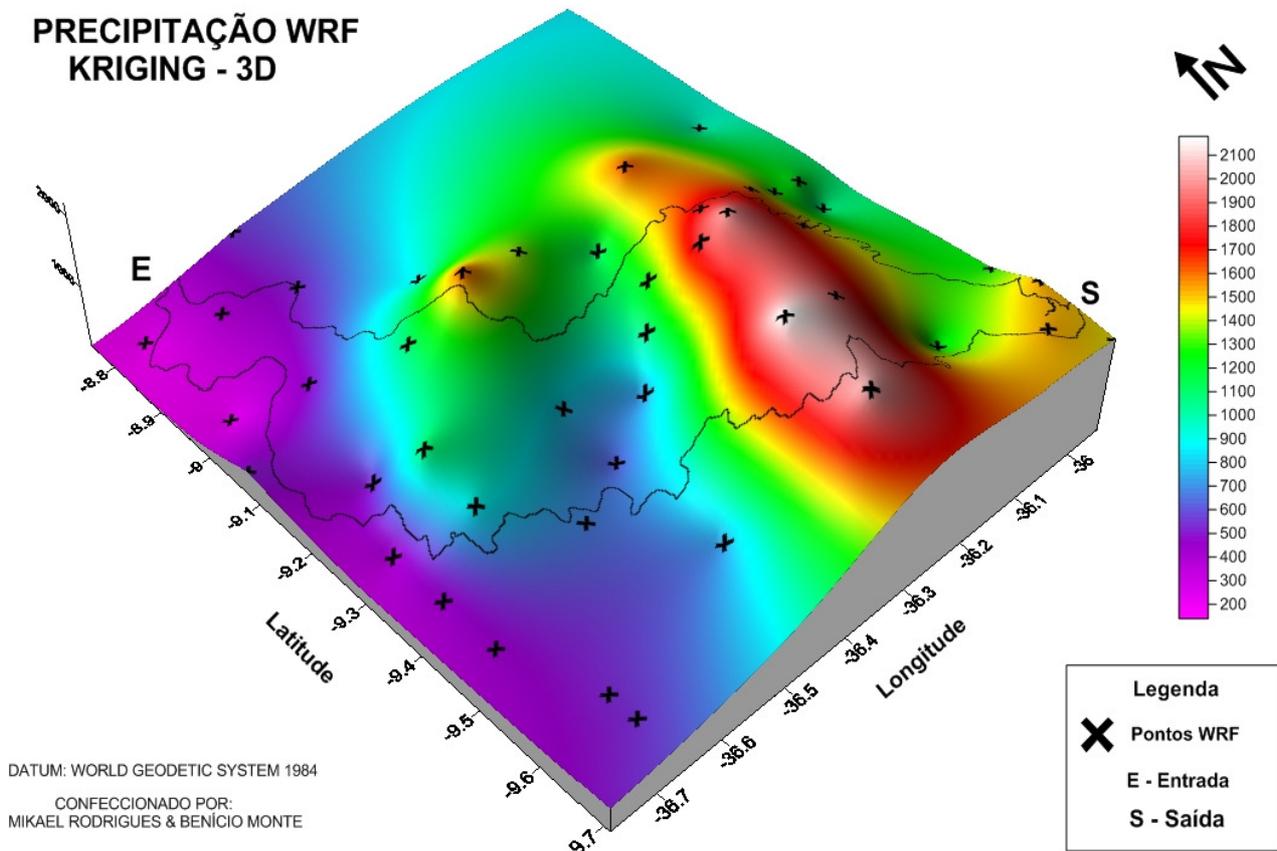
Fonte: Adaptado do PDRH.

Nota-se, que a distribuição espacial da precipitação é semelhante nos mapas, com valores variando de forma decrescente no sentido Sul-Norte do Estado, devido possivelmente

as características do relevo, que influenciam nas chuvas orográficas, bem como os mecanismos que produzem precipitação na costa do Nordeste, como a convergência de ventos de sul associados aos sistemas frontais e aos Alísios de nordeste (NE), provocando perturbações ondulatórias no campo dos Alísios (POA's) que se propagam para oeste na região da Bacia do Rio Paraíba do Meio, causando intensas precipitações e gerando vazões elevadas, na ordem de acima de 450 m³/s. Contudo, quando a análise é realizada em termos regionais nos mapeamentos obtidos por krigagem, pode-se visualizar maior detalhamento da distribuição espacial da precipitação (DEUS *et al*, 2010) ao longo do Estado, na distribuição espacial da precipitação média anual. Uma análise importante adicional que pode ser desenvolvida nas Figuras 17 e 19 se ligam ao fato de que se percebe clara influência do relevo na estimativa dos índices pluviométricos, uma vez que o setor norte-nordeste da bacia encontra-se sobre grande altitude devido o planalto da Borborema, influenciando diretamente no regime pluviométrico da região, com valores na ordem de 300 e 400 mm (Figura 17) e 600 mm (Figura 18), demonstrando a relevância da altitude para estimativa da precipitação. Esse setor da bacia encontra-se sob a influência de clima úmido e sub-úmido (RODRIGUES *et al*, 2011), especialmente na fachada oriental, em virtude da influência dos alísios de sudeste. A porção central e ocidental é marcada pela escassez e má distribuição das chuvas, propiciando um relevo de aplanamento.

Uma avaliação preliminar sobre esta dependência pode ser realizada pelo coeficiente de determinação (r^2). Na Figura 19, apresenta-se a precipitação prevista para Bacia do Rio Paraíba do Meio – 3D, onde o mesmo mostra o coeficiente de determinação da precipitação prevista pelo modelo WRF com valor na ordem de 0.543. De acordo com Santos (2007), o coeficiente de determinação é dito fraco em situações em que $0,1 < r^2 < 0,5$ e moderado entre 0,5 e 0,8, informando assim, que a precipitação do Modelo WRF tem valor significativo.

Figura 19 - Mapa de precipitação prevista pelo WRF e o coeficiente de determinação ($r^2 = 0.543$).



Fonte: Autor desta dissertação, 2012.

Como o acoplamento espacial foi usada para estimar valores em pontos não-amostrados, utilizando os dados de precipitação prevista do modelo WRF, obteve-se por meio da krigagem que os mesmos são não-viciados e por apresentar variância mínima (Vieira, 2000). São também consideradas ideais na construção de mapas de isolinhas ou Tridimensionais na verificação e na interpretação da variabilidade espacial. As informações mostradas nesses mapas de isolinhas e/ou Tridimensionais (3D) são extremamente necessários no entendimento da variabilidade de precipitação e pode identificar áreas que necessitam de maiores ou menores cuidados, como pode ser visto na Figura 19, onde o setor Sudeste da Bacia apresenta picos de precipitação entre 1.600 a 2.100 mm.

A precipitação espacial tridimensional prevista pelo modelo (Figura 19) aponta uma faixa de alta precipitação pluviométrica na zona da mata do Estado de Alagoas e porção oriental da bacia do Rio Paraíba do Meio, com valores de precipitação média na ordem de 1900 mm para o Mapa de Precipitações Anuais Médias do PDRH da Bacia do Rio Paraíba do Meio e 2100 mm para os valores do acoplamento gerados pelo Modelo WRF.

Isso ocorre devido à encosta ocidental dos Tabuleiros Costeiros, correspondendo a uma área, com altimetria de 250 a 500m, às vertentes a barlavento (lado de onde sopra o vento) são mais expostas aos ventos úmidos, que se formam no campo da pressão atmosférica (Ondas de Leste), deslocando-se de leste para oeste, capazes de causar precipitações acentuadas ao encontrarem alta pressão do relevo local, como os Tabuleiros Costeiros (VAREJÃO, 2005). O ar depara-se com a barreira de parte da encosta oriental do Planalto da Borborema, também encontra-se com os Tabuleiros Costeiros e é obrigado a subir. Ao subir, arrefece e satura, dando-se a condensação do vapor de água e a formação de nuvens originando a queda de precipitação do tipo orográfico ou de relevo. As vertentes opostas são mais protegidas pelos ventos, e o ar é mais seco, pelo que a distribuição de precipitação é mais constante.

4.2 Análise espacial da precipitação (Dados de Precipitação Observada)

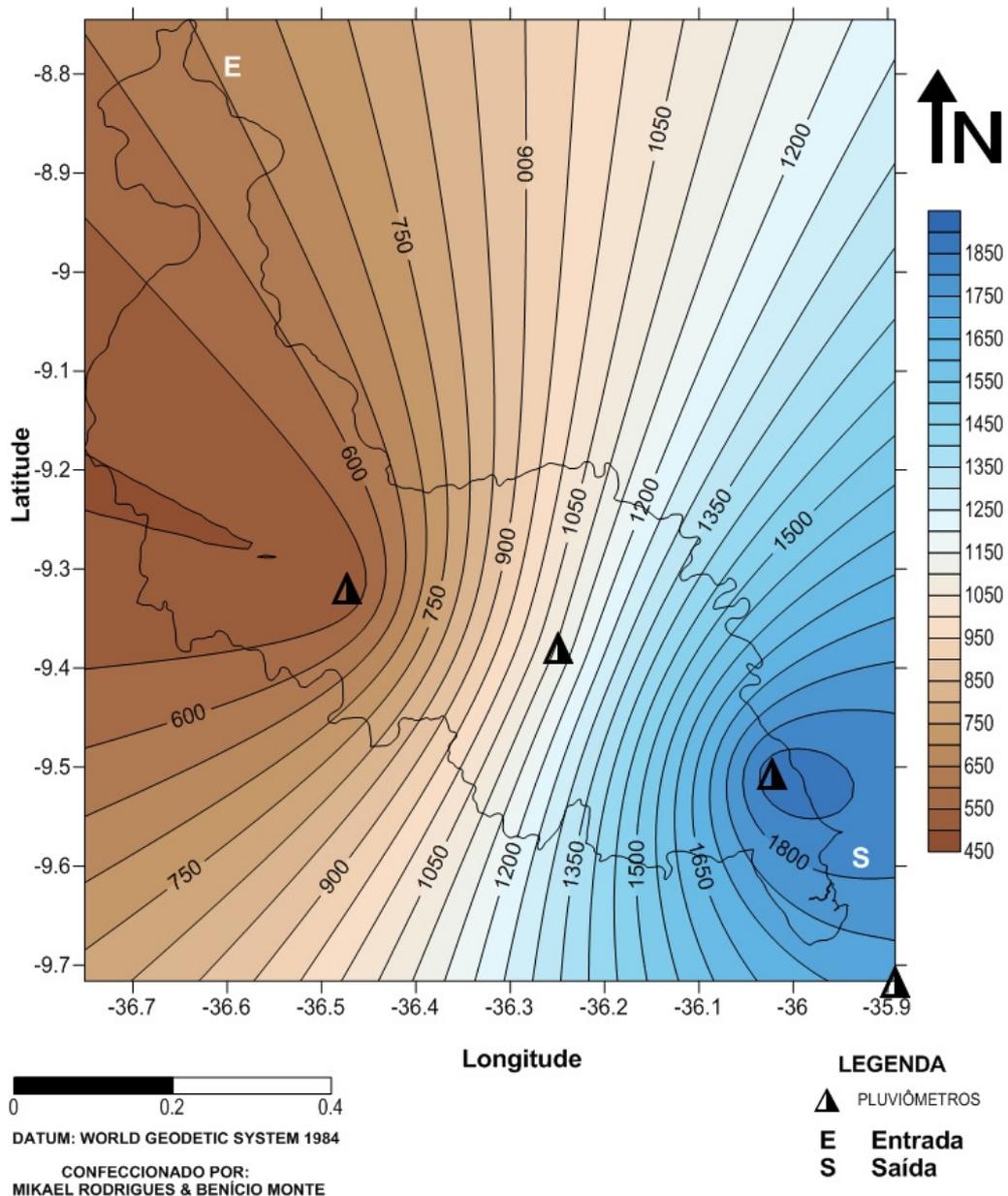
A Figura 20 apresenta os dados de precipitação observada acumulada para Bacia do Rio Paraíba do Meio, obtidos por krigagem.. Através da interpolação dos dados que gerou isolinhas de precipitação observada nas 4 (quatro) estações pluviométricas (Quebrangulo, Viçosa, Atalaia e Marechal Deodoro) permitiu observar os diferentes valores de precipitação acumulada para o período de estudo da bacia.

A Figura 20 apresenta a distribuição espacial da precipitação desse acumulado observada nas respectivas estações. Nota-se que a precipitação varia entre 450 mm a 1.850 mm e aumenta de oeste para leste e de norte para sul que se deve ao surgimento de uma faixa de pressão mais baixa sobre o litoral (Sistema Frontal – SF), desenvolvendo assim, correntes convectivas ascendentes sobre o continente (VIANELLO e ALVES, 2000). Pode ser também influenciada pelas Brisas Marítima e Terrestre, vento sopra rente a superfície do oceano para o continente, em direção perpendicular a linha de costa e aos Tabuleiros, como já foi afirmado por Varejão (2005). Outro possível mecanismo que pode ter causado essa precipitação foram as Perturbações Ondulatórias no campo do Alísios que cruzam o equador e intensificam-se e quando chegam a costa, devido ao aumento da convergência do fluxo de umidade e ao contraste térmico entre continente e oceano. Quando em fase com a Brisa marítima, essas perturbações chegam a penetrar vários quilômetros ao interior do continente, podendo intensificar e causar tempestades com totais pluviométricos superiores a 50mm/dia, como foi

visto por Silva (2005) em uma Bacia com características muito semelhantes a do Paraíba do Meio. Vale salientar que se trata apenas dos dados de cada ponto, ou seja, uma análise pontual, e não uma análise genérica dos dados de precipitação, tendo em vista a escassa base de dados pluviométrica da Bacia Hidrográfica estudada.

Figura 20 – Postos pluviométricos da Bacia do Rio Paraíba do Meio e suas ISOIETAS.

ISOIETAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO MEIO UTILIZANDO METODO DE KRIGING

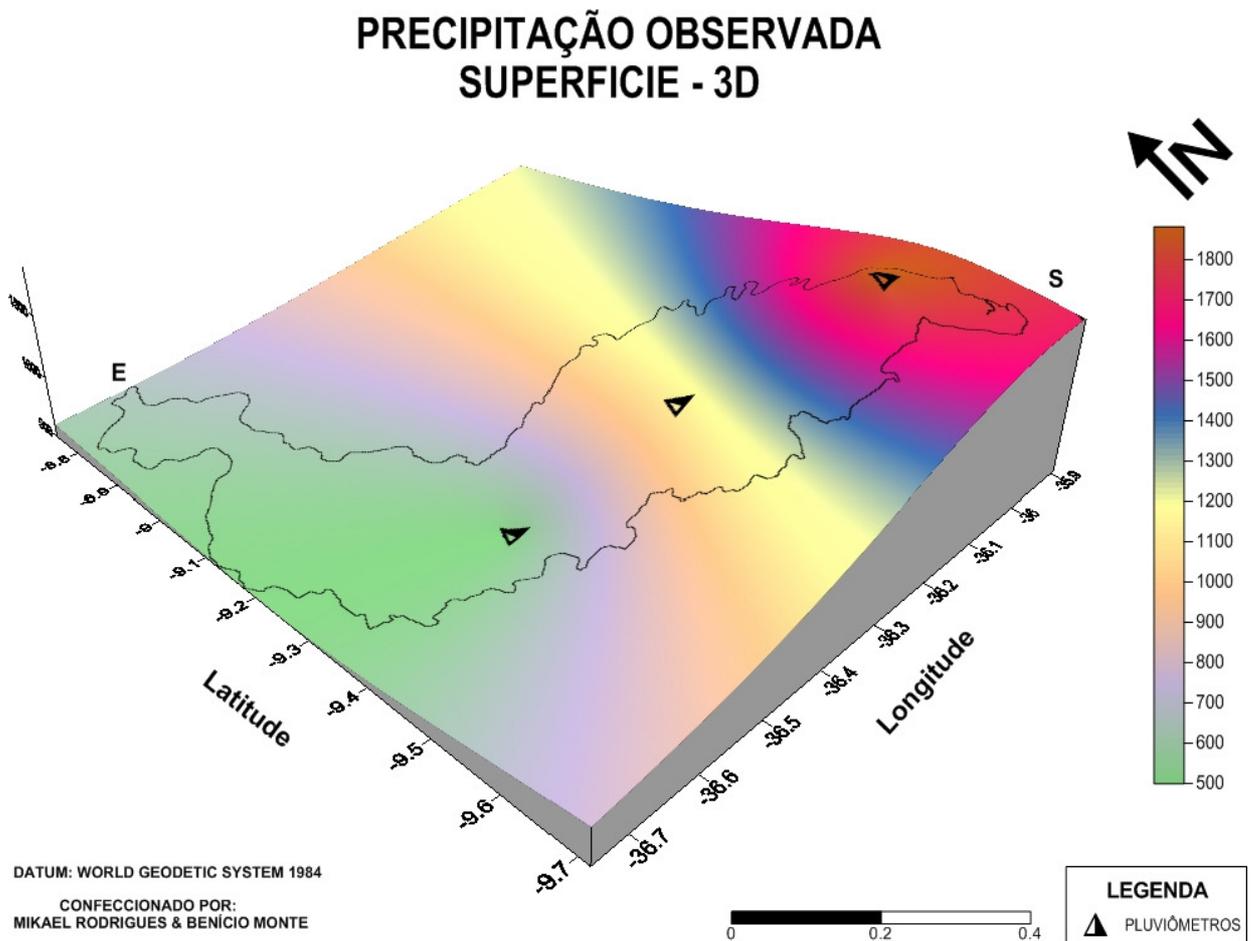


Fonte: Autor desta dissertação, 2012.

Na Figura 21, apresenta-se a precipitação observada para Bacia do Rio Paraíba do Meio – Superfície 3D, onde o mesmo apresenta o coeficiente de determinação da precipitação

prevista nos postos 00935057 (Marechal Deodoro), 00936110 (Atalaia), 00936111 (Viçosa), 00936115 (Quebarangulo), com valores extrapolados para toda área da bacia, bem como foi feito com os dados de precipitação prevista do modelo de mesoescala WRF, onde aqui foi encontrado coeficiente de determinação (r^2) = 0.926.

Figura 21 - Mapa de precipitação observada ($r^2 = 0.926$), onde E = entrada da bacia e S = saída da bacia.



Fonte: Autor desta dissertação, 2012.

Mesmo com o baixo número de pluviômetros distribuído na bacia, observou-se uma baixa quantidade de dados observados e, diante de uma extrapolação dos valores de precipitação por parte do acoplamento da precipitação junto ao ArcGis 9 e o Surfer 10, o coeficiente de determinação (r^2) foi considerado satisfatório de acordo com a metodologia aplicada por Santos (2007), onde o mesmo considera os valores ideais de r^2 igual ou próximos a 1 (um), como analisado nesse item.

A precipitação espacial tridimensional confeccionado a partir do acoplamento dos dados de precipitação observada dos postos pluviométricos a um Modelo de SIG (Figura 21),

é notório uma faixa de altos valores precipitação pluviométrica no sudeste da bacia hidrográfica, na porção oriental, com valores de precipitação na ordem de 1.900 mm, condizendo com os valores de Precipitações Anuais Médias do PDRH da Bacia do Rio Paraíba do Meio, onde o mesmo utilizou uma série histórica de 79 anos.

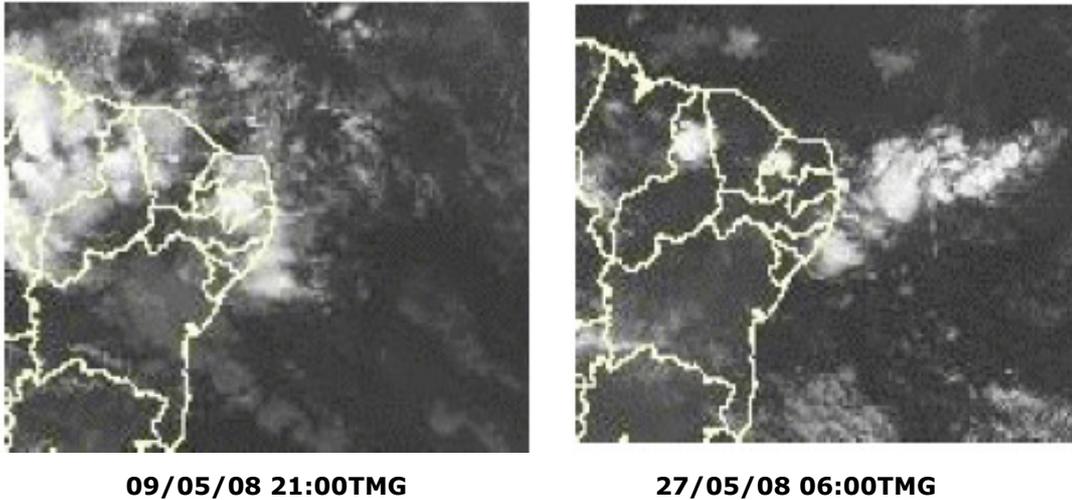
Os valores altos de precipitação ocorrem nessa região da bacia devido a proximidade do litoral, onde encontra-se inserida todo ano sob o domínio da massa Equatorial Atlântica, que tem maior umidade na corrente inferior dos ventos alísios. Por ocasião do inverno, verifica-se a incursão de restos de Sistemas Frontais provenientes do sul, que se incorporam aos ventos alísios de sudeste, aumentando a umidade e provocando chuvas ainda mais abundantes sobre a região (MOLION e BERNARDO, 2002).

4.3 Análise meteorológica dos casos de chuva intensa ocorridos no período de estudo, observando a chuva-vazão.

No período proposto pelo estudo que se estende por todo ano de 2008 e janeiro, fevereiro e março de 2009, houve alguns casos de precipitações intensas, o que naturalmente provocou alguns picos de vazões altas nos meses de maio, junho, julho e agosto de 2008, que também ultrapassaram os valores da serie histórica quando relacionada à chuva-vazão no entorno de toda bacia do rio Paraíba do Meio.

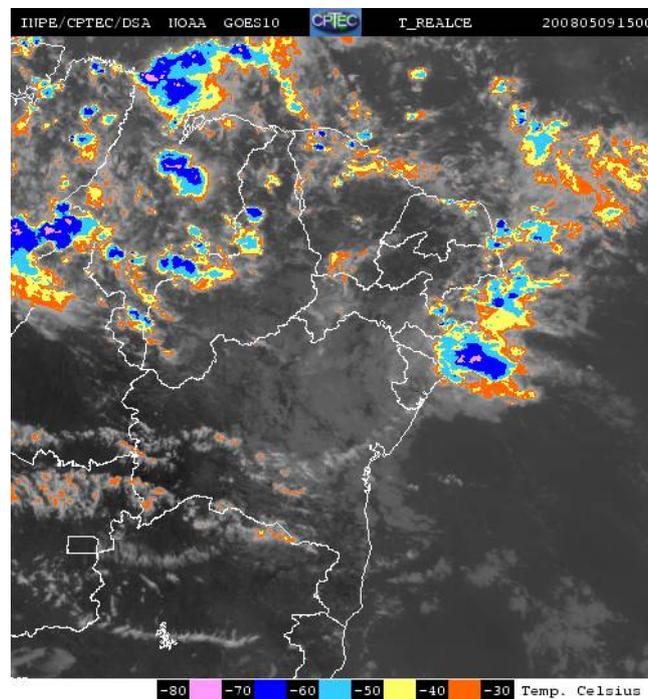
No mês de maio de 2008, as chuvas excederam os valores climatológicos em áreas no norte e na costa do Nordeste do Brasil, devido, principalmente à atuação da Zona de Convergência Inter-Tropical - ZCIT e à formação de Linhas de Instabilidade - LI's ao longo da costa. A formação de alguns episódios de Perturbações Ondulatórias no campo dos Alísios – POAs, favoreceu a ocorrência de chuvas mais intensas entre a Paraíba e Alagoas, com destaque para os totais diários registrados em Palmeira dos Índios-AL (58 mm, no dia 09); Porto de Pedras-AL (93,5 mm, no dia 17); e Garanhuns- PE (94,8 mm) segundo boletim Climanalise (INPE/CPTEC), ambos registrados no dia 27, onde pode ser visto a formação de aglomerados de nuvens associados à propagação de POAs (Figura 22 e 23).

Figura 22 - Imagens do satélite GOES-10, canal infravermelho, ilustrando a formação de aglomerados de nuvens associados à propagação de Perturbações Ondulatórias no campo dos Alísios, em MAIO/2008, no Oceano Atlântico Sul.



Fonte: INPE/DSA, 2008.

Figura 23 - Imagem realçada do satélite GOES-10, ilustrando a formação de aglomerados de nuvens nos dias 09 de maio de 2008.

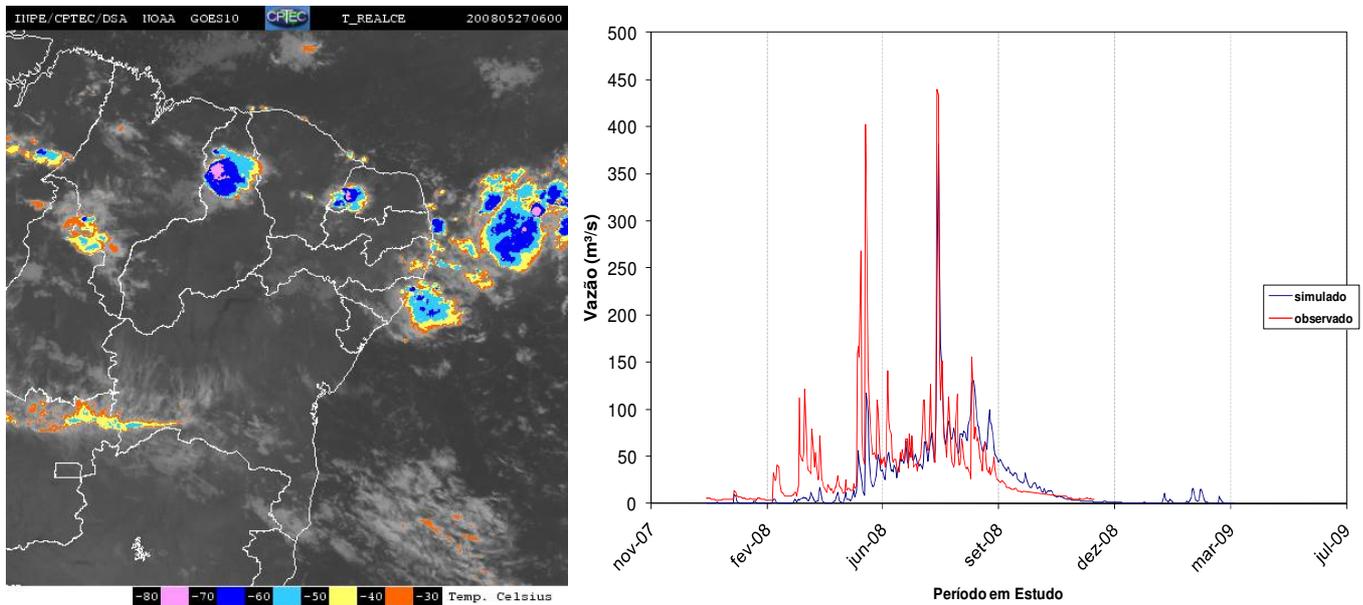


Fonte: INPE/CPTEC, 2008.

Estes eventos contribuíram de forma significativa para picos altos de vazão na bacia do rio Paraíba do Meio, com valores na ordem de 180 m³/s no posto fluviométrico 39850000 localizado na cidade de Quebrangulo; 270 m³/s no posto 398900000 em Viçosa-AL e pouco

mais de 450 m³/s no posto 308700000 na cidade de Atalaia, com ocorrência de valores acentuados quando comparados a média durante todo período estudado (Figura 24).

Figura 24 - Imagem realçada do satélite GOES-10 para o dia 27 de maio de 2008, associada à ocorrência de altos valores de vazão no posto 308700000 (Atalaia).



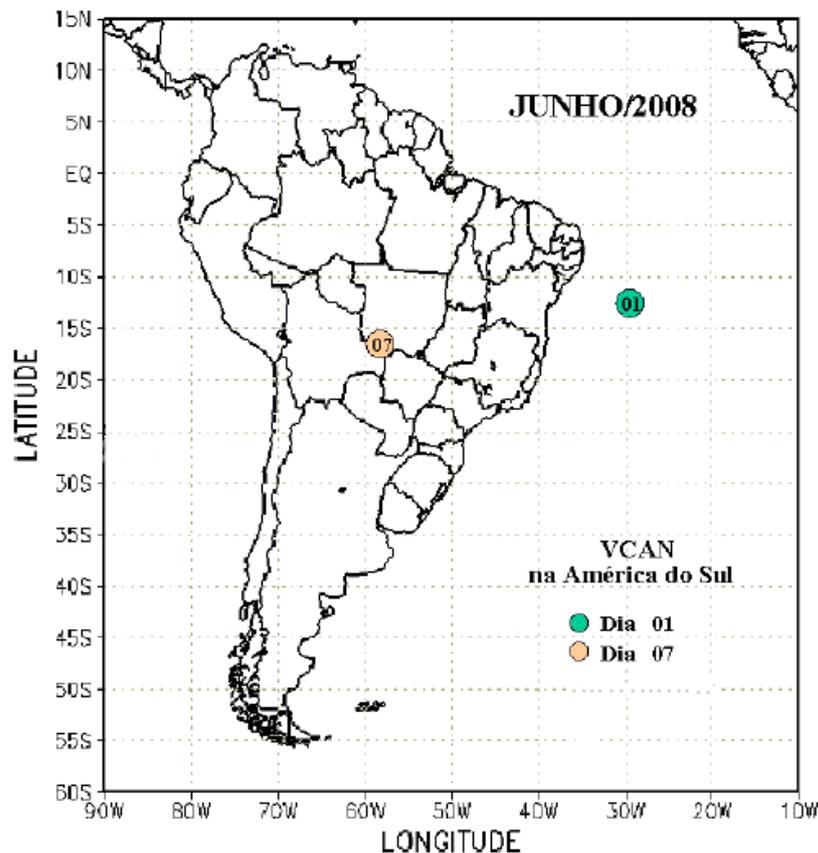
Fonte: INPE/CPTEC, 2008.

Já para os valores de chuva-vazão prevista pelo modelo WRF acoplado ao modelo MGB-IPH, foram ainda expressivos, tendo em vista que o modelo atmosférico consegue gerar as variáveis meteorológicas com maior tenacidade, simulando vazões de 380 m³/s, 900 m³/s, e 550 m³/s para os postos de Quebrangulo, Atalaia e Viçosa, respectivamente.

Em junho, segundo análise climatológica do INPE/CPTEC (2008), destacou-se a atuação dos sistemas frontais, da ZCIT em conjunto com a formação de Perturbações Ondulatórias no campo dos Alísios - POAs próximo ao setor norte da Região Nordeste. Estes sistemas proporcionaram chuvas intensas em algumas localidades do Nordeste. Contudo, na maior parte do NEB, as chuvas foram escassas, consistente com a ocorrência de baixos valores de precipitação nos Estados de Alagoas e Pernambuco. As chuvas ocorreram predominantemente abaixo da média histórica entre na região hidrográfica do Paraíba do Meio (CLIMANÁLISE – INPE/CPTEC). É importante mencionar que, climatologicamente, o leste da Região Nordeste no mês de junho encontra-se no seu período mais chuvoso. A escassez de chuva no interior da Região resultou em valores mais baixos de chuva-vazão.

O Boletim de Monitoramento e Análise Climática – Climanálise (INPE/CPTEC) informou que entre os dias 15 e 16, houve a formação de nebulosidade estratiforme no leste do Nordeste, decorrente da intensificação dos ventos de sudeste associados ao escoamento do anticiclone subtropical. Foram restos desses sistemas frontais que causaram o que existiu de precipitação na bacia estudada, com vazões na casa de 40 m³/s na estação fluviométrica de Quebrangulo (398500000) e aproximadamente 100 m³/s em Atalaia (398700000). Observa-se que os valores caíram significativamente com relação ao mês de maio devido o mês de junho ter sido desfavorecido pela atuação de cavados e vórtices ciclônicos em altos níveis (VCAN) na alta troposfera (200 hPa), quando foi notada sua maior magnitude no NEB (Figura 25), os quais causaram subsidência de grande escala e, conseqüentemente, diminuição das chuvas entre nos Estados de Alagoas e Pernambuco, na maior parte do mês. Nestas áreas, as chuvas ocorreram abaixo da média histórica com menos de 50 mm.

Figura 25 - Posição do centro dos Vórtices em Altos Níveis (VCAN) com a indicação dos dias de atuação sobre a América do Sul em junho de 2008. O centro do VCAN foi localizado subjetivamente, a partir das análises diárias do NCEP/EUA,

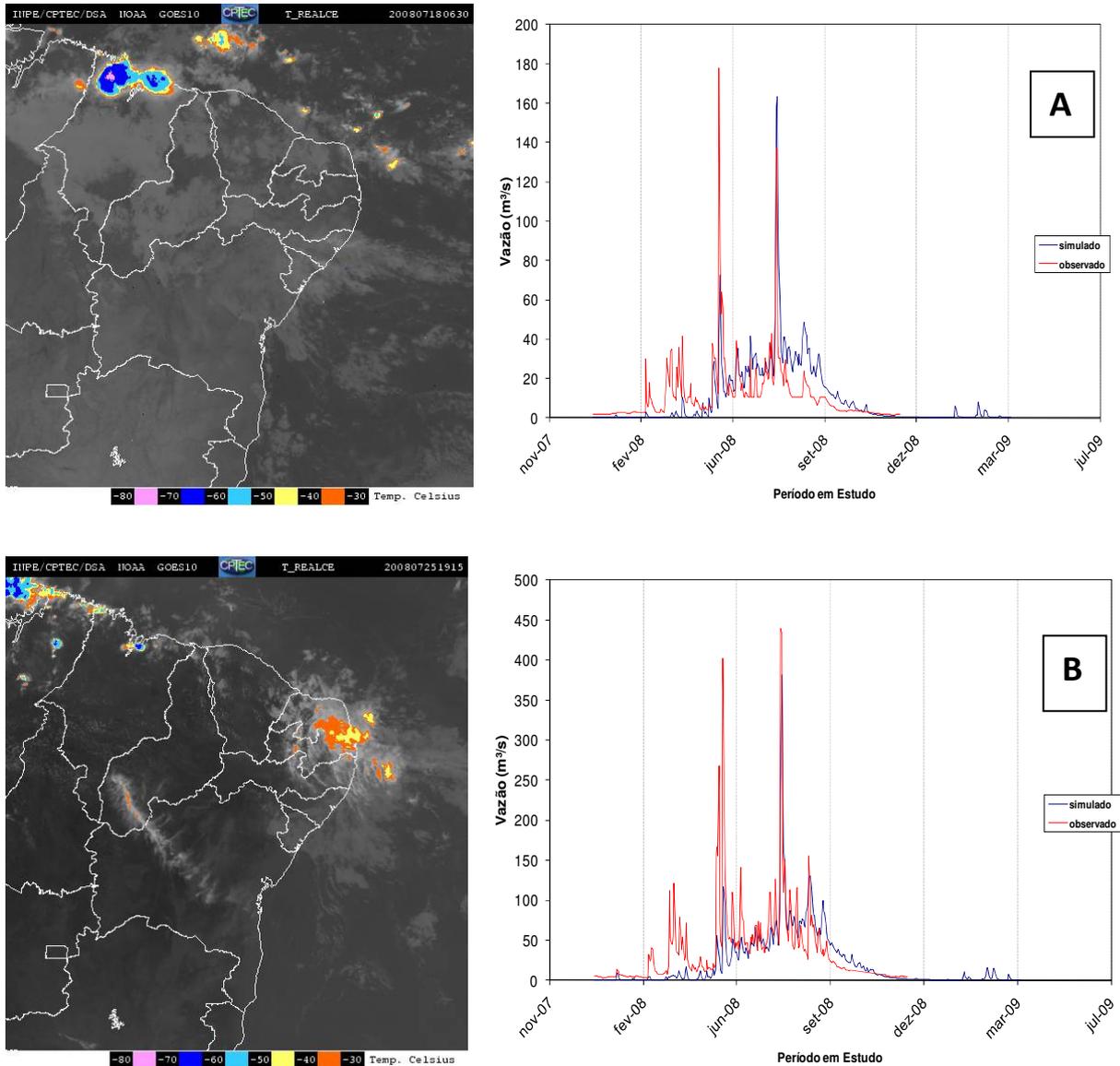


Fonte: Adaptado do CPTEC/INPE (2008).

No mês de julho ocorreu situação próxima aquela observada em junho, destacando-se em particular as POAs, ora associada à atuação de cavados em médios e altos níveis da troposfera, adjacente à costa leste do Nordeste no final de junho, segundo boletim Climanálise (INPE/CPTEC).

De modo geral, os episódios de POAs deslocaram-se próximo à costa leste da Região Nordeste (Figura 26), sobretudo, os Estados de Alagoas e Pernambuco, sem ocasionar chuvas significativas, mantendo assim vazões regulares como foi notada no mês anterior oscilando aproximadamente entre 35 m³/s e 110 m³/s nas estações de Quebrangulo e Atalaia respectivamente.

Figura 26 - Imagens realçadas do satélite GOES-10, ilustrando episódios de Perturbações Ondulatórias dos Alísios nos dias 18 e 25 de julho de 2008, associadas às vazões nos postos de Quebrangulo (A) e Atalaia (B).



Fonte: INPE/CPTEC, 2008.

Os valores de chuva-vazão, prevista pelo modelo WRF acoplado ao modelo MGB-IPH, foram muito superiores aos observados, provavelmente por ter calibração baseada em series históricas, no qual tem valores médios superiores a 240 m³/s no posto de Quebrangulo (GAMA, 2011) e superiores a 650 m³/s para o posto de Atalaia para o mesmo mês de julho. Como o modelo hidrológico MGB-IPH tende a responder semelhantemente a esta série histórica, que pode ser chamado de *spin up*, justificando assim os valores de 250 m³/s no posto

398500000 (Quebrangulo), 410 m³/s no posto 398900000 (Viçosa) e aproximadamente 800 m³/s para a estação 398700000 em Atalaia.

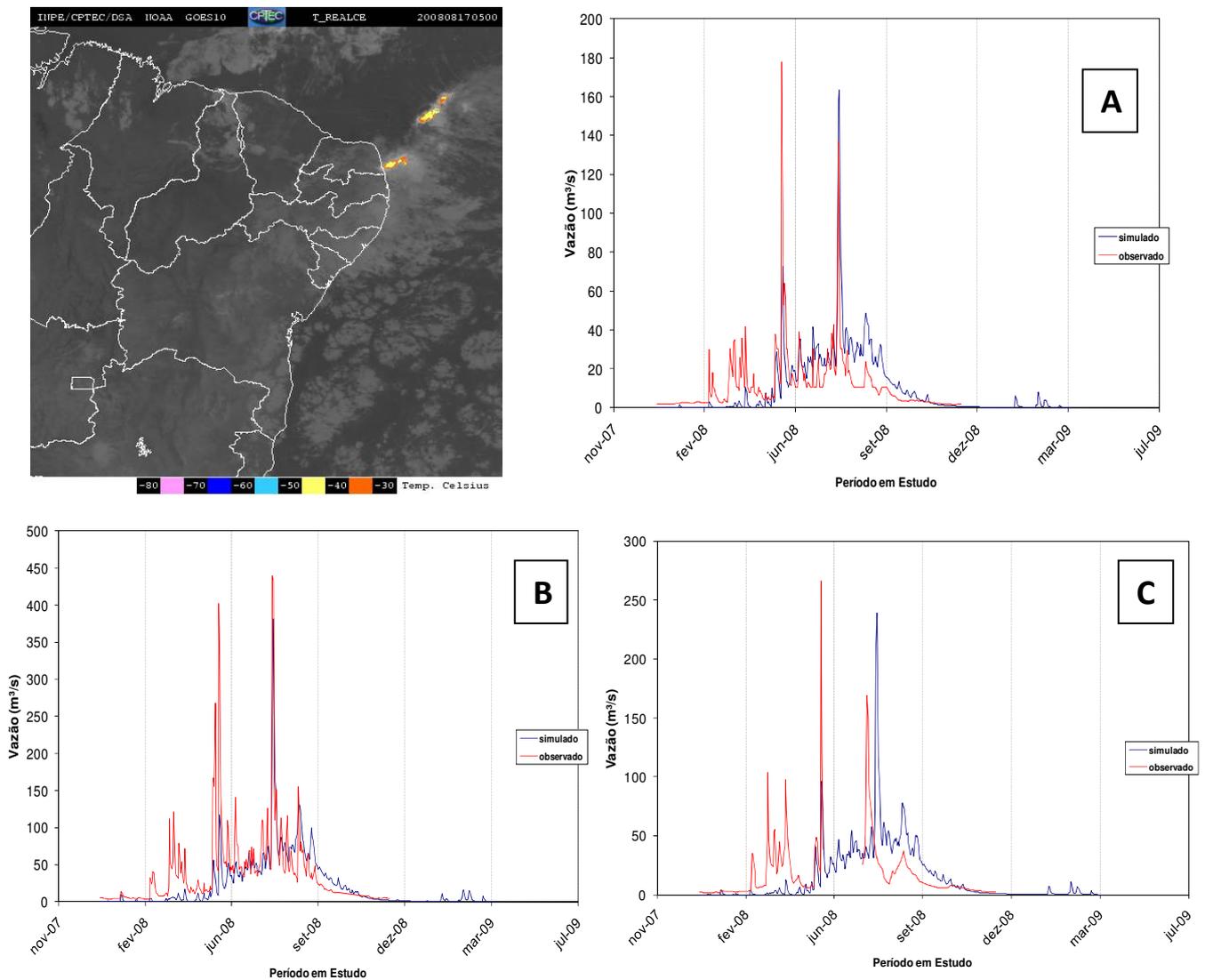
Durante o mês de julho, não houve configuração de Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis - VCAN. Contudo, durante a primeira quinzena, observou-se a formação de cavados adjacentes à bacia do rio Paraíba do Meio, segundo o boletim Climanálise - INPE/CPTEC, (2008). A formação destes cavados contribuiu para o aumento da nebulosidade em Alagoas, sobretudo, em áreas de instabilidade no leste da Região Nordeste. Alguns episódios de chuva acumulada mais significativa estiveram associados à formação de nebulosidade estratiforme intensificada pelos ventos de sudeste nesta época do ano, como a chuva registrada no leste da bacia do rio Paraíba do Meio, na cidade de Palmeira dos Índios - AL (33,2 mm, no dia 18).

Em agosto as chuvas voltaram a ficar na média prevista para o período, devido à maior atividade dos sistemas frontais em conjunto com perturbações na média e alta troposfera (CLIMANÁLISE - INPE/CPTEC).

A formação de aglomerados de nuvens estratiformes associados à propagação de Perturbações Ondulatórias no campo dos Alísios - POAs e a atuação mais intensa dos ventos de sudeste favoreceram o aumento das chuvas entre o Pernambuco e Alagoas, destacando-se os totais acumulados entre os dias 07 e 08 na cidade de Garanhuns (129 mm). No dia 17, registraram-se totais diários de precipitação que excederam 50 mm em várias cidades localizadas na bacia do rio Paraíba do Meio. Durante os dias 25 e 26, a nebulosidade estratiforme também esteve associada à formação de um cavado em médios e altos níveis da atmosfera, situação similar aquela observada no mês de julho de 2008 (Figura 27).

Estes eventos colaboraram de forma expressiva para picos altos de vazão na bacia do rio Paraíba do Meio, com valores na ordem de 140 m³/s no posto fluviométrico 398500000 localizado na cidade de Quebrangulo, 150 m³/s no posto 398900000 em Viçosa e aproximadamente pouco mais de 440 m³/s no posto 308700000 na cidade de Atalaia, o que contribuiu para ocorrência de valores na média prevista para o período para o período estudado.

Figura 27 - Imagens realçadas do satélite GOES-10, ilustrando episódios de Perturbações Ondulatórias dos Alísios no dias 17 de agosto de 2008, associadas às vazões nos postos de Quebrangulo (A), Atalaia (B) e Viçosa (C).



Fonte: INPE/CPTEC, 2008.

Já para os valores de chuva-vazão prevista pelo modelo WRF acoplado ao modelo MGB-IPH, foram ainda maiores, como se era esperado, de vido a calibração do modelo para período estudado, com vazões de 250 m³/s, 800 m³/s, e 390 m³/s para os postos de Quebrangulo, Atalaia e Viçosa respectivamente.

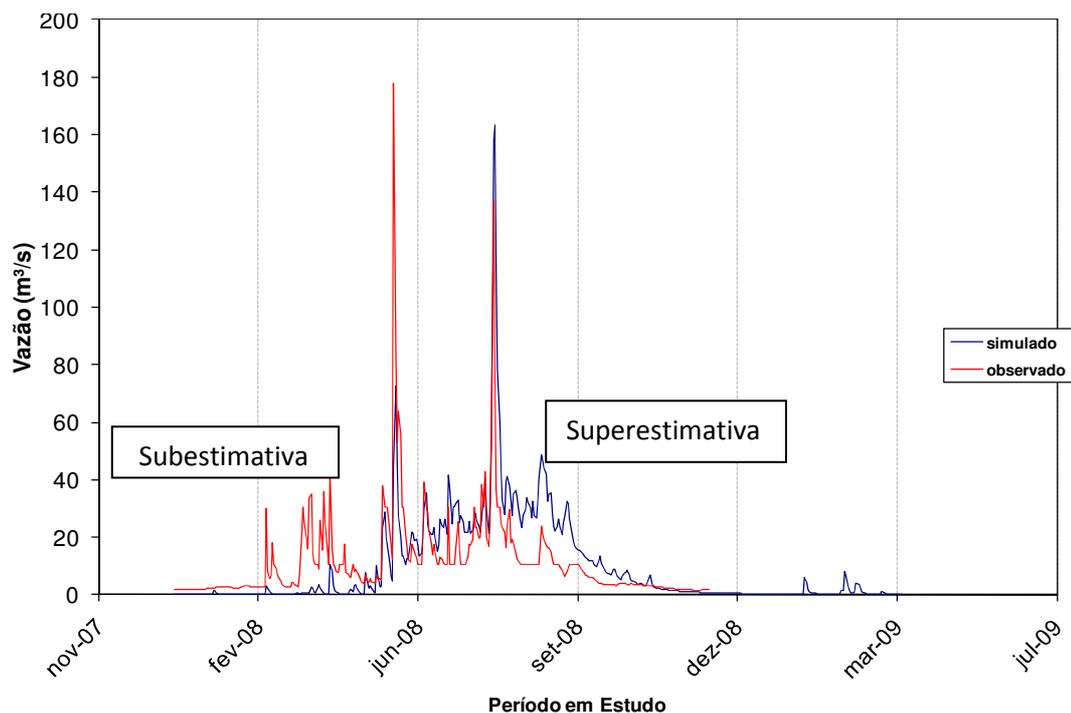
4.4 Análise da eficiência do acoplamento do Modelo de Mesoescala WRF e o Modelo Hidrológico MGB-IPH

4.4.1 Simulações da Precipitação e Vazão Observadas

Além das análises estatísticas do método de Pearson, estas comparações foram feitas por meio dos hidrogramas das vazões simuladas pelo modelo MGB-IPH. Pelas figuras 28, 29, 30, 31, 32 e 33 pode-se notar um comportamento sistemático das previsões do modelo WRF acoplado ao MGB-IPH. Tanto para vazões observadas como para vazões previstas, o modelo apresentou uma frequência maior de ocorrência de precipitação-vazão em praticamente todo período de estudo.

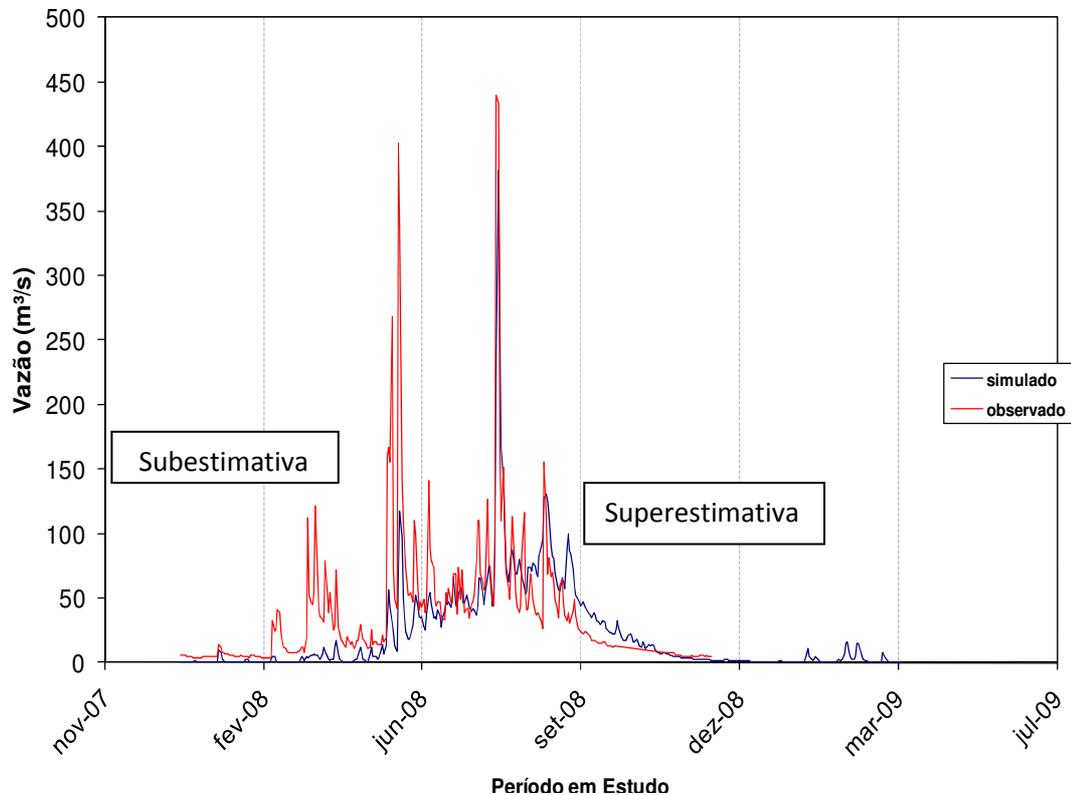
Primeiramente, foram apresentadas as comparações com os dados de precipitação observados (Figuras 28, 29 e 30). As simulações foram construídas através das vazões geradas pelo modelo hidrológico MGB-IPH.

Figura 28 – Hidrograma de vazão simulada e observada na Estação Fluviométrica de Quebrangulo (39850000) no período de Janeiro de 2008 a Março de 2009 simulado pelo modelo MGB-IPH.



Fonte: Autor desta dissertação, 2012.

Figura 29 – Hidrograma de vazão simulada e observada na Estação Fluviométrica de Atalaia (39870000) no período de Janeiro de 2008 a Março de 2009 simulado pelo modelo MGB-IPH.



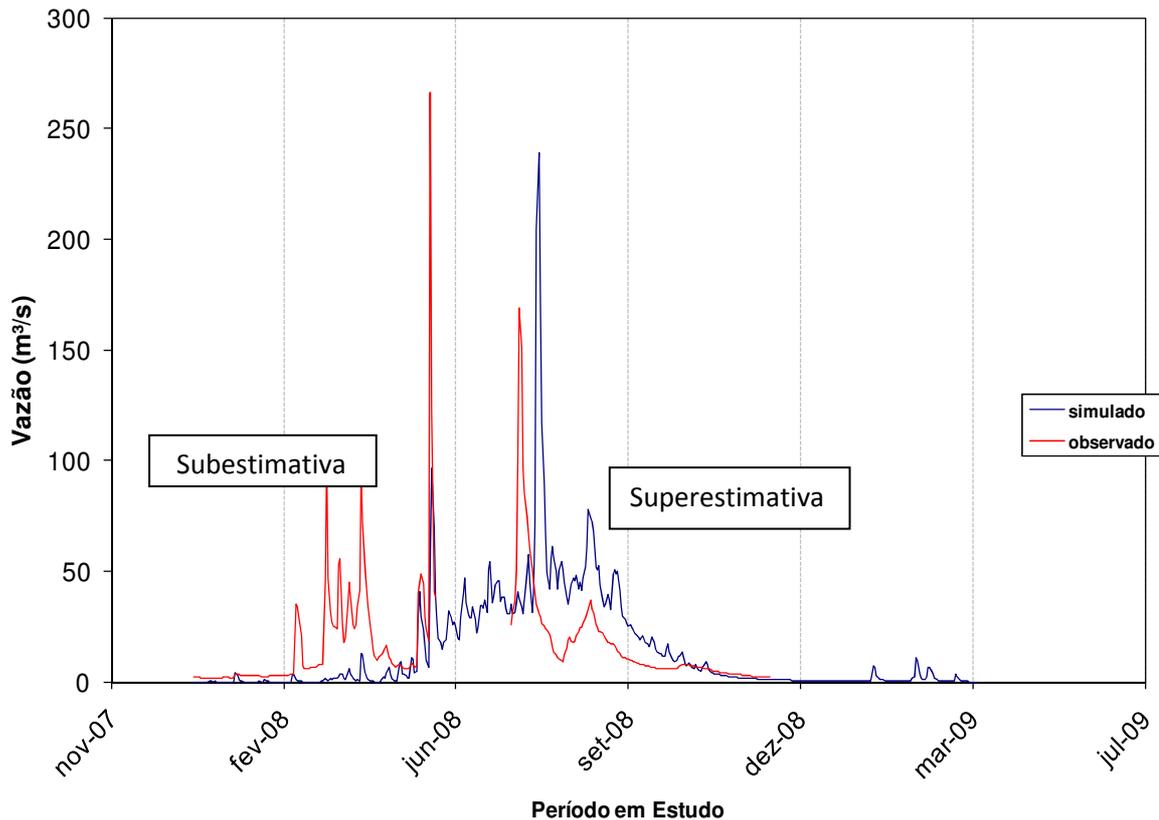
Fonte: Autor desta dissertação, 2012.

As Figuras 28 e 29, apresentaram valores do coeficiente de Pearson na ordem de 0,66 e 0,71 respectivamente. Paiva (2011) utilizando o mesmo Modelo MGB-IPH para a mesma bacia, encontrou valores mais expressivos para os postos 39850000 – Quebrangulo e 39870000 – Atalaia com valores para o coeficiente de Pearson entre 0,87 e 0,84 respectivamente. No estudo realizado por Paiva (2011), o acoplamento realizado com a precipitação observada foram subestimadas pelo modelo MGB-IPH, o que ocorreu de forma semelhante nas Figuras 28 e 29, onde existe uma tendência ao modelo subestimar vazões no período de janeiro a junho de 2008, porém, superestimando a vazão de agosto de 2008 a março de 2009. Provavelmente, tenha ocorrido as subestimações e superestimações devido a uma resposta ao curto período que foi simulado (*spin up*).

Na Figura 30, apresenta a simulação para o posto fluviométrico 39890000, localizado no município de Viçosa - AL onde o mesmo encontra-se com uma lacuna de dados entre junho à agosto de 2008. Para a simulação do posto, foi mantido o mesmo sem qualquer dado ou resultado durante essa lacuna de dados, assim, pode haver tendência a zero (0) nas vazões

observadas, o que seria irreal ao observar os postos 39850000 em Quebrangulo e 39870000 em Atalaia, ambos em Alagoas, no mesmo período, com resultados próximos a 100mm.

Figura 30 – Hidrograma de vazão simulada e observada na Estação Fluviométrica de Viçosa (39890000) no período de Janeiro de 2008 a Março de 2009 simulado pelo modelo MGB-IPH.



Fonte: Autor desta dissertação, 2012.

O coeficiente de Pearson encontrado para a Figura 30 foi de 0,4, o que é considerado muito baixo para análise estatística de bacias segundo Tucci (2005). No mesmo posto 39890000 – Viçosa, Paiva (2011) encontrou uma correlação de 0,58, ainda considerada baixa, mas alcançando uma resposta no hidrograma mais próximo do ideal. Talvez esta diferença de valores esteja unida a uma diferença de calibração utilizada em seu modelo, com um melhor ajuste nos parâmetros calibráveis, tendo assim, uma melhor resposta sobre o mesmo posto fluviométrico (OLIVEIRA, 2006).

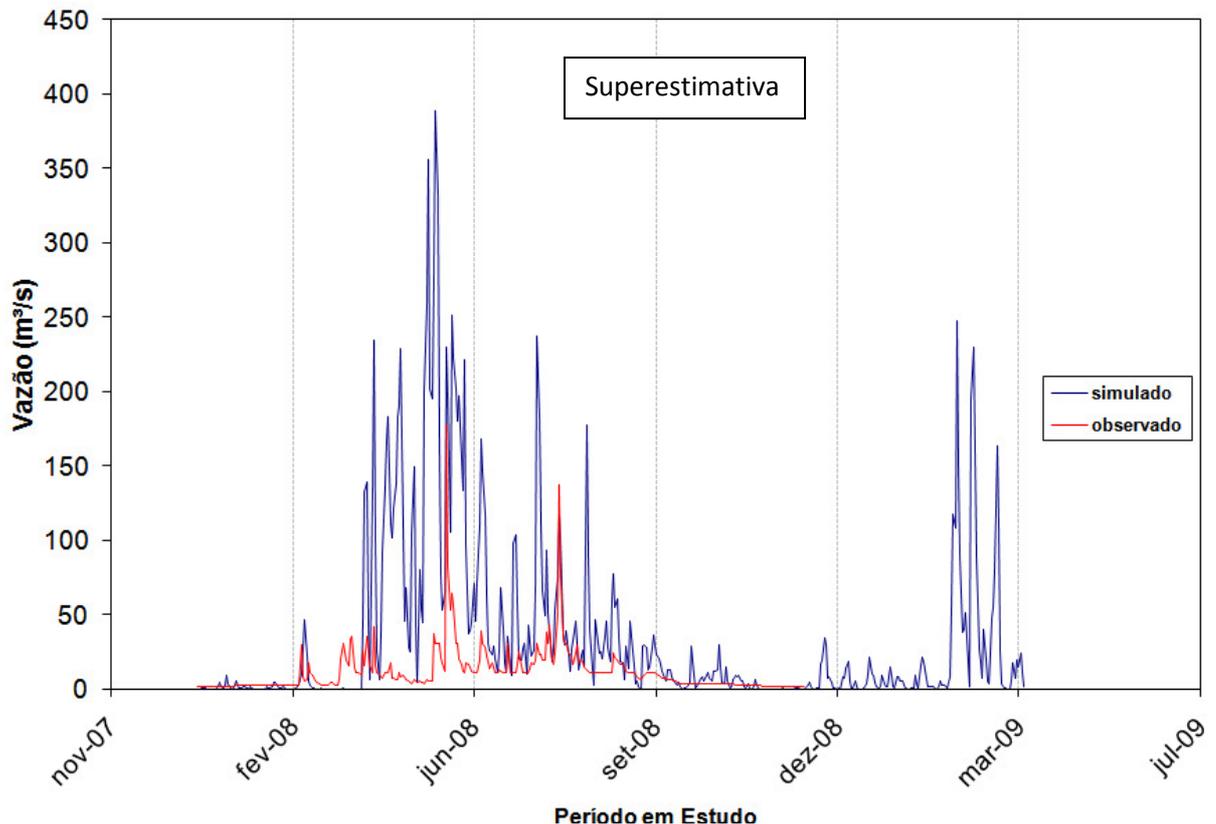
4.4.2 Simulações da Vazão Observada com Precipitação Prevista pelo WRF

Os hidrogramas representados nas figuras 31, 32 e 33 confirmam a tendência sistemática do modelo WRF em prever mais eventos de chuva intensa provocando vazões

mais elevadas do que são observadas pelas estações da ANA. Novamente, praticamente todo período estudado apresentou maior frequência de vazões simuladas.

A simulação foi construída através das vazões geradas pelo modelo hidrológico MGB-IPH, utilizando dados de precipitação prevista pelo modelo WRF. O observado, a partir dos dados de vazão observada nas estações fluviométricas 39850000 (Quebrangulo), 39870000 (Atalaia), 3987900000 (Viçosa) Por fim, serão apresentados os resultados das análises estatísticas.

Figura 31 – Hidrograma de vazão simulada com dados de precipitação do modelo WRF e vazão observada na Estação Fluviométrica de Quebrangulo (39850000) no período de Janeiro de 2008 a Março de 2009 simulado pelo modelo MGB-IPH.



Fonte: Autor desta dissertação, 2012.

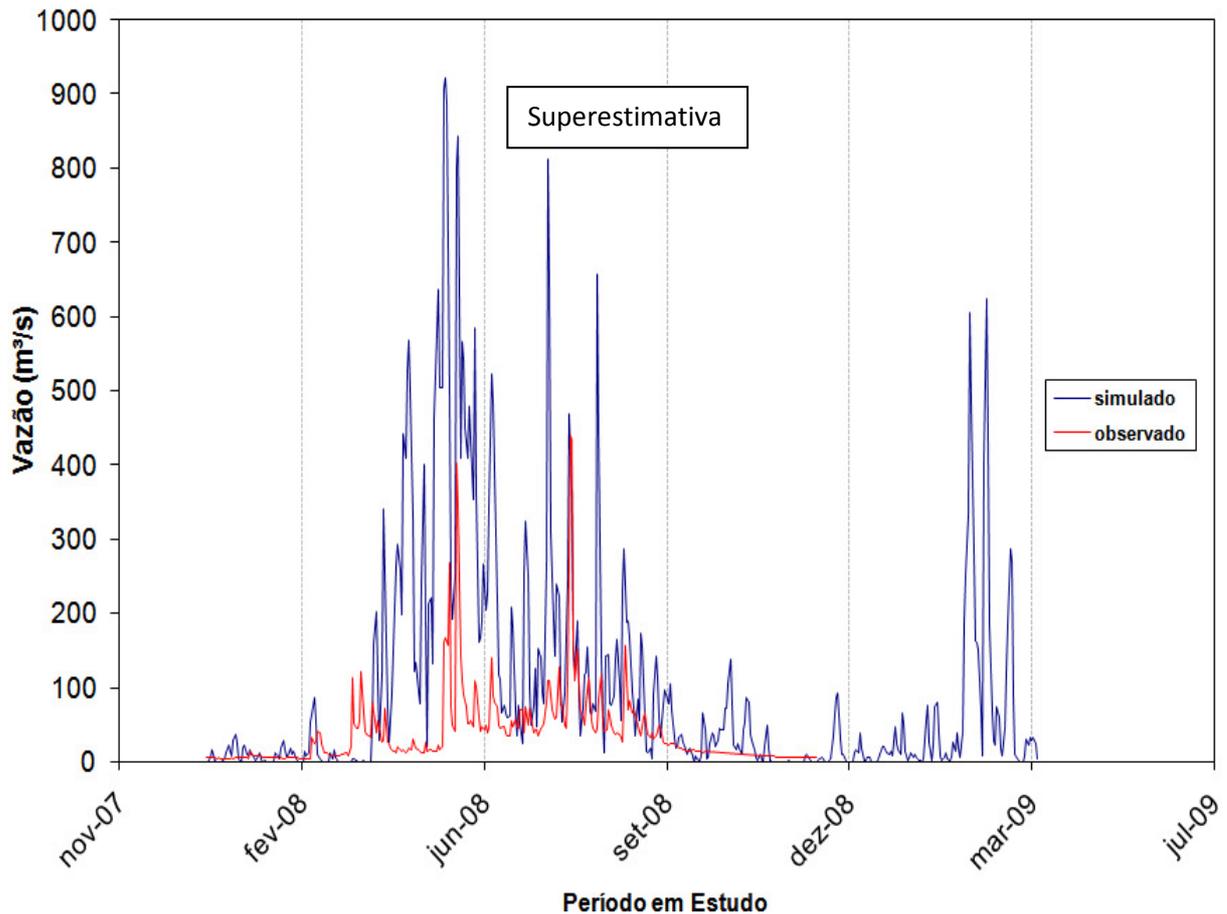
Observa-se que o modelo atmosférico WRF superestimou os valores de precipitação se comparado com a Superposição dos hidrogramas simulado e observado na estação fluviométrica 39850000 – Quebrangulo (Figura 31). Ocorrendo deste modo, valores mais altos de vazão gerados pelo modelo hidrológico MGB-IPH. Mesmo com a superestimação

dos valores de vazão, o WRF manteve uma boa tendência nos fluxos de pico de vazão - comprovado por Silva e Tucci (2006) utilizando o mesmo modelo hidrológico (MGB-IPH) - como nos valores de 150 e 200 m³/s, o que é extremamente relevante para acoplamento de modelos atmosféricos e hidrológicos.

Os resultados das análises indicaram uma fraca correlação (0,46) entre as previsões geradas pelo modelo atmosférico WRF e os dados observados pela rede de pluviômetros da ANA. Essa fraca correlação se manifesta, principalmente, em diferenças de fase temporal e espacial. Oliveira (2006), ao estudar a Bacia do Rio União da Vitória no Paraná, também encontrou valores pouco significativos quanto à correlação dos dados gerados pelo WRF acoplados aos dados dos pluviômetros do SIMEPAR. Essa fraca correlação se deve, principalmente, à diferença da face espacial, utilizando 391 (Trezentos e noventa e um) pontos de precipitação prevista pelo modelo atmosférico junto a 4 (quatro) estações fluviométricas. O modelo WRF consegue identificar os eventos meteorológicos, mas não conseguem fazer uma simulação com precisão diária pontual.

Essa tendência a superestimação do Modelo WRF aos modelos hidrológicos ocorre por problemas de calibração na inicialização do modelo, mesmo existindo boas previsões de eventos meteorológicos ao analisar series acumuladas em dados diários de precipitação. No acoplamento feito por Paiva (2011) para a mesma bacia, afirmou que os coeficientes de Pearson e os coeficientes de Nash (E) obtidos são menores para as simulações com chuvas previstas do que com as chuvas observadas, inclusive no mesmo posto da Figura 30 (39870000 – Atalaia).

Figura 32 – Hidrograma de vazão simulada com dados de precipitação do modelo WRF e vazão observada na Estação Fluviométrica de Atalaia (39870000) no período de Janeiro de 2008 a Março de 2009 simulado pelo modelo MGB-IPH.



Fonte: Autor desta dissertação, 2012.

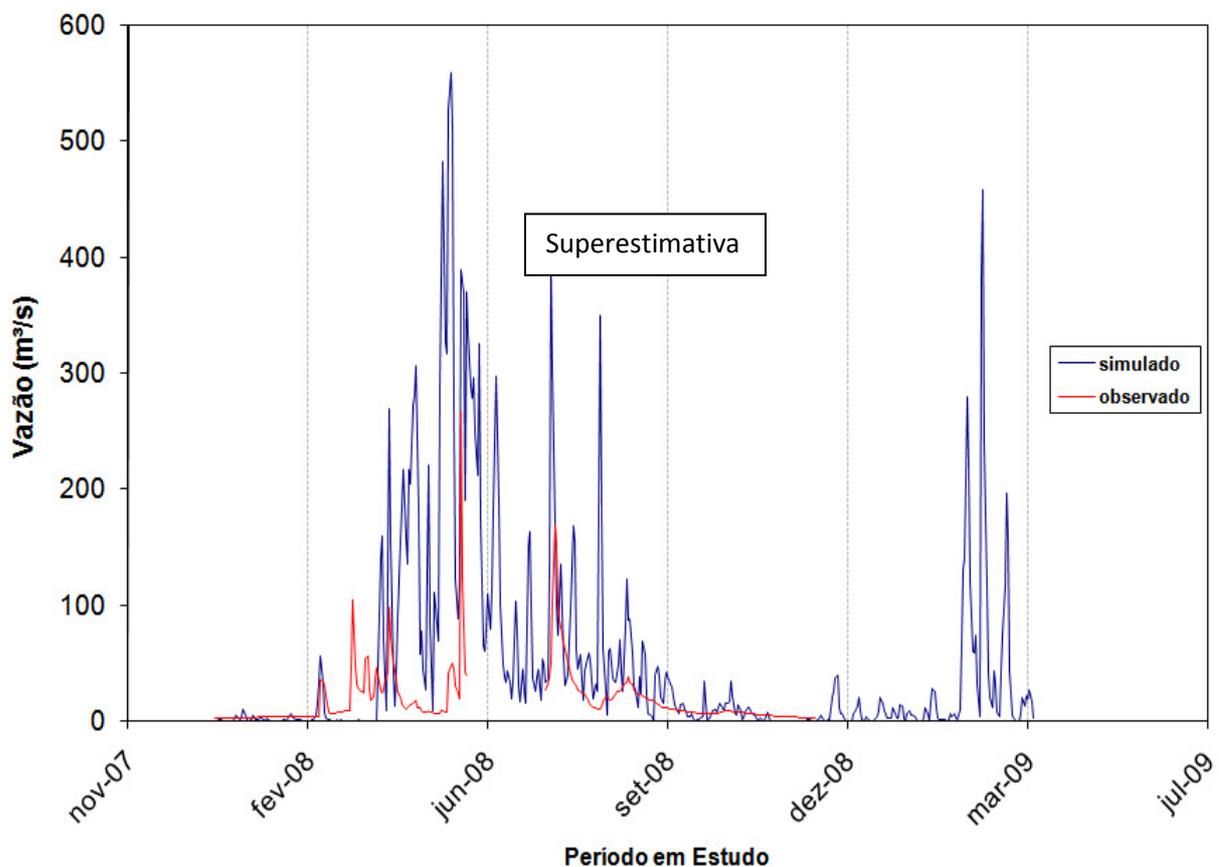
O mesmo fenômeno de superestimação de valores de precipitação, por sua vez transformado em vazão pelo modelo hidrológico, ocorrido na Figura 31 pode ser notado também no gráfico de Superposição dos hidrogramas simulado e observado na estação fluviométrica 39870000 – Atalaia (Figura 32). Neste caso, também manteve tendência aos fluxos de picos de vazão. Esse é um efeito esperado, devido à diferença entre a densidade dos dados usados nos dados das chuvas previstas e observadas. Ainda, pode-se notar que os dados previstos e observados se encontram em fase por praticamente todo o período. Isso demonstra uma boa previsibilidade dos eventos de precipitação.

A variável que mais influência nas previsões hidrológicas é a precipitação, principalmente nas médias e grandes bacias, onde a vazão a montante não é um preditor eficiente. A utilização de previsões de precipitação proporcionou uma análise do

comportamento da vazão, principalmente em eventos de chuva extrema e de rápida ascensão do nível do rio, geralmente nos meses de junho, julho e agosto.

Como ocorrido nas simulações da precipitação observada com vazão observada no item 4.4.1, na superposição dos hidrogramas simulado e observado na estação fluviométrica 39890000 – Viçosa, também ocorreu o mesmo problema para as simulações da precipitação prevista pelo WRF com vazão observada, onde o Posto 39890000 encontra-se com uma lacuna de dados entre Junho à agosto de 2008. Para a simulação do posto, foi mantido o mesmo sem qualquer dado ou resultado durante essa lacuna de dados, assim, pode haver tendência a zero (0) nas vazões observadas, o que seria irreal ao observar os postos 39850000 em Quebrangulo e 39870000 em Atalaia, ambos em Alagoas, no mesmo período, com resultados próximos a 100 mm.

Figura 33 – Hidrograma de vazão simulada com dados de precipitação do modelo WRF e vazão observada na Estação Fluviométrica de Viçosa (39890000) no período de Janeiro de 2008 a Março de 2009 simulado pelo MGB-IPH.modelo



Fonte: Autor desta dissertação, 2012.

No posto 39890000 – Viçosa (Figura 33) foi encontrado o valor mais baixo das correlações, na ordem de 0,42, indicando uma fraca correlação entre a previsão gerada pelo modelo atmosférico WRF e os dados observados do posto fluviométrico da ANA. Ao calibrar e validar o MGB-IPH para Bacia do Rio Paraíba do Meio, Gama (2011) encontrou valor de 0,84 para o mesmo posto de Viçosa-AL, o que mostra a boa resposta do modelo para uma grande série de dados fluviométricos, ocorrendo um bom resultado do *spin up* do MGB-IPH, mesmo havendo lacunas como vista acima.

Os casos com análises de correlação muito baixa, também podem ser relacionados a problemas de calibração do modelo Hidrológico e a problemas com a vazão observada onde existem poucos postos fluviométricos com relação a área de toda bacia, como foi visto por Oliveira (2006).

Observa-se que os hidrogramas simulados para vazões de chuva prevista superestimaram as vazões observadas nos postos fluviométricos. Provavelmente o modelo atmosférico precisa ser calibrado, mesmo assim, existe uma tendência do modelo para simular os maiores picos de precipitação, alguns deles podendo ser simulados de forma muito satisfatória. Também é importante salientar, que o modelo WRF gerou precipitação para toda a bacia e comparados apenas com 3 postos fluviométricos da bacia estudada.

As correlações dos coeficientes de Pearson nas simulações da chuva observada e prevista, apresentaram os valores com uma correlação significativa, no que se diz respeito aos dados de modelagem hidrometeorológica (Tabela 4 e 5).

Tabela 3 - Valores dos coeficientes de Pearson para as séries das vazões simuladas com chuva observada, no período de Janeiro de 2008 a Março de 2009

Posto Fluviométrico	Coefficiente de Pearson
39850000 - Quebrangulo	0.6637
39870000 – Atalaia	0.7198
39890000 - Viçosa	0.4082

Fonte: Autor desta dissertação, 2012.

Tabela 4 - Valores dos coeficientes de Pearson para as series das vazões simuladas com chuva Prevista, no período de Janeiro de 2008 a Março de 2009

Posto Fluviométrico	Coefficiente de Pearson
39850000 - Quebrangulo	0,4669
39870000 – Atalaia	0,5660
39890000 - Viçosa	0,4224

Fonte: Autor desta dissertação, 2012.

Observa-se que os hidrogramas tanto com simulações a partir da precipitação prevista e das precipitações observadas, em geral, apresentaram vazões superestimadas. Os hidrogramas simulados com precipitação observada tiveram melhores correlações de Pearson comparados com as correlações para as simulações com chuva prevista pelo WRF, o que implica dizer que o modelo atmosférico está calibrado para gerar eventos de precipitações e vazões maiores do que existem no local estudado, precisando ser feitas calibrações futuras mais adequadas à realidade da Bacia do Rio Paraíba do Meio.

Nota-se, que em ambas as simulações, precipitação observada e precipitação prevista, o coeficiente de Pearson foi mais baixo no posto 39890000 – Viçosa, como pode ser visto nas Tabelas 4 e 5, provavelmente pela lacuna de dados no período de Junho a Agosto de 2008.

5 CONCLUSÕES

O acoplamento dos modelos hidrológico precipitação-vazão MGB -IPH ao modelo atmosférico WRF visando estimar vazão para bacia do rio Paraíba do Meio foi realizado de forma satisfatória, podendo se tornar uma ferramenta útil para projetos futuros.

Os hidrogramas simulados no acoplamento dos modelos apresentaram certa tendência nas simulações, superestimando as vazões altas, mas com certa propriedade nas vazões médias e subestimação em algumas vazões mais baixas, porém, encontrando com destreza variação dos fluxos de pico. Uma hipótese para tal fenômeno seria o *spin up* do modelo, ou seja, a representatividade de dados para que o modelo incorpore menor tendenciosidade.

A Comparação da simulação da precipitação prevista pelo WRF com a vazão observada, juntamente com, a comparação da precipitação observada com a vazão observada, surtiram satisfatórias análises das correlações dos coeficientes de Pearson, apresentando valores com uma correlação significativa, no que se diz respeito aos dados de modelagem hidrometeorológica.

Na análise da variabilidade espacial da precipitação prevista e observada através de interpolação, utilizando o método de Krigagem no período proposto (2008 e os três primeiros meses 2009), apresentaram ser satisfatório, onde foi encontrado coeficiente de determinação $r^2= 0.54$ para precipitação prevista pelo WRF e de $r^2= 0.92$ para precipitação observada.

Por fim, a previsão hidrológica deverá ser aperfeiçoada não apenas melhorando as calibrações e condições iniciais, podendo ser melhorada através da introdução de séries mais longas de precipitação prevista e observada. Isto se deve ao fato de que as previsões de precipitação proporcionam um melhor cenário de volume de chuvas que simplesmente atuam na climatologia da região, informando a propagação e desenvolvimento de fenômenos meteorológicos, tais como Sistemas Frontais (SF), Linhas de Instabilidade (LI), Vórtices Ciclônicos em Altos níveis (VCAN) e Perturbações Ondulatórias no campo dos Alísios (POAs).

Recomendações para futuros trabalhos:

- Melhorar o ajuste de alguns parâmetros no modelo MGB-IPH no sentido de adequar as condições de acoplamento;

- Calibrar o modelo atmosférico WRF focando como objetivo principal alargar o cenário das precipitações de vazão (chuva-vazão);
- Utilizar uma série de dados mais longa de precipitação para simulações, a fim de se evitar algum tipo tendência dos modelos;
- Buscar quantidade maior de postos na bacia do rio Paraíba do Meio. Possivelmente não ocorreram valores melhores para as simulações observadas devido à baixa quantidade de postos na bacia do rio Paraíba do Meio.

REFERENCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Brasília, DF: ANA, 2009. Disponível em: <www.hidroweb.ana.gov.br>. Acesso em: 10 abr. 2011.

ANDREOLI, R. V. et al. A influência da temperatura da superfície do mar dos oceanos Pacífico e Atlântico na variabilidade de precipitação em Fortaleza. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 19, n. 3, 337-344, 2004.

BENINI, R. M.; MENDIONDO, E. M.; MARTIOLI, C.; TONISSI, F. B. A. Cenários Ambientais visando à mitigação de enchentes decorrentes da implantação do Campus II – USP, São Carlos – SP. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos: desafios à gestão da água no limiar do século XXI, 15, 2003, Curitiba, PR. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2003, p. 45-81.

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

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. . **Hidrologia, Ciência e Aplicação**. 3. Ed. Porto Alegre: UFRGS, 2004. 253 p.

BRAGA, A. C.; GALVÃO, C. O.; SOUZA, E. P.; OLIVEIRA, K. F.; CIRNE, W. Acoplamento Operacional de modelos Atmosféricos, Hidrológicos e de gerenciamento de Recursos Hídricos In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 13, 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2006, Disponível em CD-ROM. 2004.

BRAGA, A. C. F. M., OLIVEIRA, K. F., GALVÃO, C. O. Avaliação de incertezas na previsão do escoamento sazonal. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 13, 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2006, Disponível em CD-ROM. 2004.

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, 9., 2055, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, CE: [s.n], 2005.

BREMICKER, M. **Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells für das Weser und das Ostsee Einzugsgebiet als Baustein eines Atmosphären-Hydrologie-Modells.** 1998. 128 f. Dissertation Doktorgrad, Geowissenschaftlicher Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität. Freiburg, 1998.

CHANG, K. H., KIM, J. H. CHO, C. H. BAE, D. H., KIM, J. Performance of a coupled atmosphere-streamflow prediction system at the Pyungchang river IHP basin. **Journal of Hydrology**, Seoul, South Korea. v. 288, p. 210-224. 20 março de 2004.

CARVALHO, J. R. de; ASSAD, E. D. Análise espacial da precipitação pluviométrica no estado de São Paulo: Comparação de métodos de interpolação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Campina Grande, v.25, n.2, p.377-384, 2005.

COLLISCHONN, B. **Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído.** 2006. 131 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias.** 2001. 194 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo Hidrologia.** 5. Ed. Porto Alegre: UFRGS, 2008. v. 5, 149 p.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 6, n. 2, p. 85-116.

COLLIER, C. G.; KRZYSZTOFOWICZ, R. Quantitative precipitation forecasting. **Journal of Hydrology**, Virginia, EUA, v. 239, p. 2-9. 2000.

CRUCIANI, D. E.; MACHADO, R. E.; SENTELHAS, P. C. Modelos da distribuição temporal de chuvas intensas em Piracicaba- SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.1, p.76-82, 2002.

DA SILVA, B. C. ; **Previsão hidroclimática de vazão para a bacia do rio São Francisco**. 2005. 228 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

DE OLIVEIRA, P. H. A. **Sistemas Atmosféricos Regionais**. São Paulo: Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – Universidade de São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.iag.usp.br/meteo/ativida_sistema_frame.htm>. Acesso em: 15 junho 2011.

DEUS, B. V.; ZEILHOFER, P.; ARAUJO, G. C.; SANTOS, A. S. L.; Interpolação pluviométrica na bacia do alto e médio rio Teles Pires: uma análise de séries históricas e interpoladores. In. III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 3, 2010, Recife, PE. **Anais...** Recife: UFPE, 2010, p.001-007.

DÖLL, P, KASPAR, F. LEHNER, B. E. A global hydrological model for deriving water availability indicators: model tuning and validation. *Journal of Hydrology, Germany* , v. 270, p. 105-135. 10 de janeiro de 2002.

ESPINOZA, E. S. **Distúrbios nos ventos de leste no Atlântico Tropical**. 1996. 127 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 1996.

FIALHO, W. B. **Eventos extremos na costa leste do Nordeste**. 2012. 74 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Meteorologia) – Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2012.

FRAGOSO JR., C. R.; PEDROSA, V. D. A.; DE SOUZA, V. C. B. Reflexões sobre a cheia de junho de 2010 nas bacias do rio Mundaú e Paraíba. In: X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste - SRHN, 10, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: UFC, 2010, p. novembro 2010, p. 67-82.

FRAGOSO JR., C. R.; SOUZA, C. F. **Análise de uma proposta de dragagem no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba através de um modelo hidrodinâmico bidimensional**. 2003. 134 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2003.

GAMA, W. M. **Avaliação do regime hidrológico da bacia do rio Paraíba do Meio (AL/PE) através de um modelo hidrológico distribuído**. 2011. 98 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011.

GOMES FILHO, M. F. **Inter-relações entre TSMs Globais, Sistemas Atmosfericos de Meso grande escalas e Anomalias do volume dos principais reservatorios de água da Paraíba**. 2000. 117 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2000.

HARTMANN, H.C.; BALES, R.; SOROOSHIAN, S. Weather, Climate, and Hydrologic Forecasting for the Southwest U.S. Tucson, EUA: The University of Arizona. **Working Paper Series**, Arizona, v. 2, p. 72-99, 1999.

HIDROWEB. Séries Históricas. HidroWeb - Sistemas de Informações Hidrológicas, 2005. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 18 abr. de 2011.

ICAT UFAL. Laboratório de Modelagem Atmosférica - Instituto de Ciências Atmosféricas - Universidade Federal de Alagoas, 2010. Disponível em: <<http://www.icat.ufal.br/previsaodotempo/index.html>>. Acesso em: 12 jun. 2011.

ITEP. Laboratório de Metereologia de Pernambuco. Instituto de Tecnologia de Pernambuco: Banco de dados pluviométrico, 2011. Disponível em: <<http://www.itep.br/LAMEPE.asp>>. Acesso em: 25 mai. 2011.

KAISER, I. M. **Avaliação de métodos de composição de campos de precipitação para uso em modelos hidrológicos distribuídos**. 2006. 187 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

KAYANO, M. T., RAO, V. B., ANDREOLI, R. V. A review of short-term climate variability mechanisms. **Science direct**, v. 35, p. 843-851, 2005.

KANE, R. P. Predection of droughts in North-east Brazil: Role of ENSO and use of periodeities. **Inter. J. Climatol**, v. 17, p. 655-665. 1997.

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

KOUSKY, V. E., GAN, M. A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. **Tellus**, v.36, p. 538-551, 1981.

KLEMP, J. B.; Convection Resolving Forecasting with the WRF Model. **National Center for Atmospheric Research**, Boulder, Colorado, v. 35, p. 1070-1096, 2005.

MÖLDERS, N., RÜHAAK, 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. 3-38, 2002.

MEDEIROS, F. C., MOLION, L. C. B. Influências do Clima Global nas descargas de bacias hidrográficas no Estado de Alagoas. In: XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 7, 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** São Paulo: SBMET, 2002, p. 708-712.

MENDES, C. A. B., CIRILO, J. A. Geoprocessamento em Recursos Hídricos Princípios, Integração e Aplicação. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 14, 2001, Aracajú, SE. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2001, p. 319-330.

MOLION, L. C. B., BERNARDO, S. O. Dinâmica das chuvas sobre o Nordeste Brasileiro. In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. 11, 2000, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...**, Rio de Janeiro: SBMET, 2000, p. 1334-1342.

MOLION, L. C. B., BERNARDO, S. O. Uma revisão das chuvas no Nordeste Brasileiro, **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, SP, v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.

MOLION, L. C. B. Aquecimento Global, El Niños, Mancha Solares. Vulcões e Oscilação Decadal do Pacífico. **Revista Climanalise**. São José dos Campos, SP, v. 3, n. 1, p. 1-5, 2005.

NCAR. ARW User Guide. WRF/ChemVersion 3.1 User's Guide National Center for Atmospheric Research. Boulder, CO, 2009. Disponível em: <<http://.mmm.ucar.edu/wrf/users/NCAR>>. Acesso em 22 mai. de 2011.

OLIVEIRA, A. C. **Implantação do modelo atmosférico WRF acoplado com o modelo hidrológico TOPMODEL para Bacia de União da Vitória**. 2006. 75 f. Dissertação

(Mestrado Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

PAIVA, A. P. O. **Avaliação da eficiência do acoplamento de modelos atmosféricos e modelos hidrológicos.** 2011. 78 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011.

PLANO DIRETOR DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO RIO PARAIBA DO MEIO – PDRH. v. 1, cap. 1 p. 18-23. 2001.

PICCILLI, D. G. A. **Avaliação da previsão hidroclimática no alto Paraguai.** 2007. 235 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2007.

RHAMA. Rhama Consultoria, Pesquisa e Treinamento Ambiental, 2007. Disponível em: <<http://www.rhama.net/default.asp>>. Acesso em: 24 mai. de 2011.

RODSON, Roy D. Advances in Hydrology Computation. In: MAIDMENT, D, R. (Coord.). **Hand Book of Hydrology:** Texas: Maiston, 1992. v. 1, cap. 7, p. 244-261.

RODRIGUES, M. T.; SILVA JUNIOR, R. S.; AMORIM, R. F. C.; MARCCHI, A. C., Análise das precipitações ocorridas na Bacia do Rio Mundaú nos dias 18 e 19 de Junho de 2010 utilizando o modelo de mesoescala WRF. Congresso Acadêmico da UFAL. 7. 2010, Maceió, AL. **Anais...** Maceió: UFAL, 2010, p. 545.

RODRIGUES, M. T.; MONTE, B.; FIALHO, W. B.; DINIZ, M. A.; AMORIM, R. F. C. SILVA JUNIOR, R. S.; FRAGOSO JUNIOR, C. R.; Utilização de métodos de interpolação para análise espacial pluviométrica na Bacia Hidrográfica do Paraíba do Meio – Alagoas e Pernambuco. In: IV Simpósio Internacional de Climatologia. 4. 2011, João Pessoa, PB. **Anais...** João Pessoa: SBMET, 2011, p. 327-332.

SANTOS, C. **Estatística descritiva – Manual de auto-aprendizagem.** 1.ed. Lisboa: Edições Silabo, 2007. 264 p.

SAKAMOTO, M. S. ; ROCHA, R. P. ; AMBRIZZI, T. ; MACHADO, L.A.T. . Simulação de sistemas convectivos usando o modelo WRF: primeiros experimentos. In: XIV Congresso

Brasileiro de Meteorologia. 14. 2006, Florianópolis, SC. **Anais...** Florianópolis: SBMET, 2006, p. 824-832.

SCKAMAROCK, W. C.; Et. Al. **A Description of the Advanced Research and Forecast Model WRF Version 3, NCAR Technical Notes**. 3 ed. Colorado: Boulder, Colorado, 2008. v. 3, 345 p.

SEMARH/AL. Dados diários de chuva. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos; Banco de Dados Hidrometeorológicos - BDHM; Diretoria de Meteorologia – DMET. Maceió. 2011.

SEMARH-AL. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Alagoas (SEMARH-AL), 2011. Disponível em: <<http://www.semarh.al.gov.br/recursoshidricos>>. Acesso em: 05 mai. de 2011.

SILANS ,P, A, M, B. Almeida, C, N. ALBUQUERQUE, D, J, S, A. Aplicação do modelo hidrológico distribuído acumod a bacia hidrográfica do rio do Peixe – Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, RS, v. 5, n. 3, p. 5-19, jun./set. 2000.

SILVA, D. F. **Análise de aspectos climátomológicos, agroconômicos, ambientais e de seus efeitos sobre a bacia hidrográfica do rio Mundaú**. 2009. 178 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Centro de Tecnologias e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande. Campinas Grande. 2009.

SILVA, T. L. D. V. **Análise da sensibilidade da parametrização de microfísica e cumulus do modelo WRF: Estudo de caso dos dias 15 e 16 de maio de 2009 em Alagoas**. 2009. 85 f. Monografia de Conclusão de Curso (Graduação em Meteorologia) - Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas. Maceió. 2009.

SILVA, L. F., KAYANO, M. T, FERREIRA, N. J. Evolução das anomalias de temperatura da superfície do mar durante anos de El Niño nas duas fases da Oscilação multi-decadal do Pacífico. III Simpósio Internacional de Clima. 7. 2005, Fortaleza, CE. **Anais...** Fortaleza: SBMET, 2005, p. 271-286.

SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M.; Collischonn, W.; Previsão de Vazão com Modelos Hidroclimáticos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, DF, v. 11, n.3, p. 15-29.jun./set. 2006.

SOUZA, W. J. **Modelo determinístico precipitação – Vazão e algumas características hidrológicas da Bacia hidrográfica do Rio Mundaú**. 2005. 82 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia em Meteorologia) – Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas. Maceió. 2005.

SUDENE. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Mundaú**. Recife-PE, 1999.

TROCH, P.A.; PANICONI, C.; MCLAUGHLIN, D. Catchment-scale hydrological modeling and data assimilation. **Advances in Water Resources**. Arizona, EUA, v.26, p.131-135. 2003.

TUCCI, C. E. M., CLARKE, R. T., COLLISCHONN, W., DIAS, P. L. S., OLIVEIRA, G. S. Long-term flow forecasts based on climate and hydrologic modeling: Uruguay river basin. **Water Resources Research**, v. 39, n. 7, p. 1181. 2003.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 1 ed. Porto Alegre: UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998. v. 1, 669 p.

UVO, C. R. B.; **A zona de convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação na região Norte e Nordeste brasileiro**. 1989. 119 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais . São José dos Campos. 1989.

VAREJÃO SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. 2. ed. Recife: Editora Pax Gráfica, 2001. 532 p.

VAREJÃO SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. . 2. ed. Recife: Editora Pax Gráfica, 2005. 532 p. 2 CD-ROM.

VIEIRA, S. R. **Geostatística em estudos de variabilidade espacial do solo: Tópicos em ciência do solo**. 2. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 2, 255 p.

VIOLA, M. R., DE MELLO, C. R., PINTO, D. B. R., DE MELLO, J.M, ÁVILLA, L. F., Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.14, n. 9, p.970–978, 2010.

VIANELLO, R. L., ALVES, A. R. **Meteorologia Básica e Aplicações**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2000. v. 2, 449 p.

YAMASAKI, Y. ; SILVA A. M. ; SANTOS, A. ; ORGAZ, M. L. D. M. . Diagnósticos de previsões numéricas de WRF. XXIX Jornadas de la Asociación Meteorológica Española (AME) y Del 7º Encuentro Hispano-Luso Meteorología y Eficiencia Energética. 24. 2006, Madri, ESP. **Anais...** Madri: Asociacion Meteorológica Española, 2006, p. 439-454.

YU, PAO-SHAN. YANG, TAO-CHANG. CHEN, SHEN-JAN. Comparison of uncertainty analysis methods for a distributed rainfall-runoff model. **Journal of Hydrology**, Lincoln, EUA. v. 5, p. 339-345. Out. de 2000.

WRF - UCAR. **The Weather Research & Forecasting Model**, 2011. Disponível em: <<http://www.wrf-model.org/index.php>>. Acesso em: 21 jun. de 2011

ZHANG, Y.; WALLACE, J.M.; BATTISTI, D. ENSO-lik interdecadalvariability. **J. Clim.**, UK. v. 10, p. 1004-1020. 1997.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Amostra do arquivo INTERPLU. HIG adaptado para todos os pontos de precipitação prevista pelo modelo WRF.

```

!inicio
      DIA      MES      ANO
      1        1      2008
!fim
      DIA      MES      ANO
      31       3      2009
      NC      NU      NT      NP      (numero de
celulas, blocos, intervalos de tempo, postos)
      53             456      414
!DE QUAL INTERVALO DE TEMPO PRETENDE COMEÇAR A INTERPOLAÇÃO?
      1          !CORRESPONDE A 1/4/2008
!Geracao de arquivo grads (1 para ligar - 0 desligar, tamanho de
célula da grade)
      0      0.1      '09:00z01jan1968      1dy'
      codigo      long dec      lat dec
99110101.txt      -36.000      -8.660
99110102.txt      -36.045      -8.660
99110103.txt      -36.090      -8.660
99110104.txt      -36.135      -8.660
99110105.txt      -36.180      -8.660
99110106.txt      -36.225      -8.660
99110107.txt      -36.270      -8.660
99110108.txt      -36.315      -8.660
99110109.txt      -36.360      -8.660
99110110.txt      -36.405      -8.660
99110111.txt      -36.450      -8.660
99110112.txt      -36.495      -8.660
99110113.txt      -36.540      -8.660
99110114.txt      -36.585      -8.660
99110115.txt      -36.630      -8.660
99110116.txt      -36.675      -8.660
99110117.txt      -36.720      -8.660
99110118.txt      -36.750      -8.660
99110201.txt      -36.000      -8.705
99110202.txt      -36.045      -8.705
99110203.txt      -36.090      -8.705
99110204.txt      -36.135      -8.705
99110205.txt      -36.180      -8.705
99110206.txt      -36.225      -8.705
99110207.txt      -36.270      -8.705
99110208.txt      -36.315      -8.705
99110209.txt      -36.360      -8.705
99110210.txt      -36.405      -8.705
99110211.txt      -36.450      -8.705
99110212.txt      -36.495      -8.705
99110213.txt      -36.540      -8.705
99110214.txt      -36.585      -8.705
99110215.txt      -36.630      -8.705
99110216.txt      -36.675      -8.705

```

APÊNDICE B

Arquivo INTERPLU.HIG adaptado para as estações Pluviométricas.

```

!inicio
    DIA      MES      ANO
    1        1        2008
!fim
    DIA      MES      ANO
    31       3        2009
    NC      NU      NT      NP      (numero de celulas,
blocos, intervalos de tempo, postos)
    53      456      4
!DE QUAL INTERVALO DE TEMPO PRETENDE COMEÇAR A INTERPOLAÇÃO?
    1      !CORRESPONDE A 1/4/2008
!Geracao de arquivo grads (1 para ligar - 0 desligar, tamanho de
célula da grade)
    0      0.1      '09:00z01jan1968      1dy'
           codigo      long dec      lat dec
00935057.txt      -35.892      -9.716
00936110.txt      -36.023      -9.507
00936111.txt      -36.249      -9.379
00936115.txt      -36.492      -9.320

```

APÊNDICE C

Tabela 5 - Amostra dos nomes e coordenadas geográficas de todos os pontos de precipitação prevista pelo WRF.

<i>Referência da Estação</i>	<i>Nome do Arquivo</i>	<i>Longitude</i>	<i>Latitude</i>
99110101	<i>ponto_-8.66x-36.txt</i>	-36	-8.66
99110102	<i>ponto_-8.66x-36.045.txt</i>	-36.045	-8.66
99110103	<i>ponto_-8.66x-36.09.txt</i>	-36.09	-8.66
99110104	<i>ponto_-8.66x-36.135.txt</i>	-36.135	-8.66
99110105	<i>ponto_-8.66x-36.18.txt</i>	-36.18	-8.66
99110106	<i>ponto_-8.66x-36.225.txt</i>	-36.225	-8.66
99110107	<i>ponto_-8.66x-36.27.txt</i>	-36.27	-8.66
99110108	<i>ponto_-8.66x-36.315.txt</i>	-36.315	-8.66
99110109	<i>ponto_-8.66x-36.36.txt</i>	-36.36	-8.66
99110110	<i>ponto_-8.66x-36.405.txt</i>	-36.405	-8.66
99110111	<i>ponto_-8.66x-36.45.txt</i>	-36.45	-8.66
99110112	<i>ponto_-8.66x-36.495.txt</i>	-36.495	-8.66
99110113	<i>ponto_-8.66x-36.54.txt</i>	-36.54	-8.66
99110114	<i>ponto_-8.66x-36.585.txt</i>	-36.585	-8.66
99110115	<i>ponto_-8.66x-36.63.txt</i>	-36.63	-8.66
99110116	<i>ponto_-8.66x-36.675.txt</i>	-36.675	-8.66
99110117	<i>ponto_-8.66x-36.72.txt</i>	-36.72	-8.66
99110118	<i>99110118_nomedoarq.txt</i>	-36.75	-8.66
99110201	<i>ponto_-8.705x-36.txt</i>	-36	-8.705
99110202	<i>ponto_-8.705x-36.045.txt</i>	-36.045	-8.705
99110203	<i>ponto_-8.705x-36.09.txt</i>	-36.09	-8.705
99110204	<i>ponto_-8.705x-36.135.txt</i>	-36.135	-8.705

<i>Referência da Estação</i>	<i>Nome do Arquivo</i>	<i>Longitude</i>	<i>Latitude</i>
<i>99110205</i>	<i>ponto_-8.705x-36.18.txt</i>	<i>-36.18</i>	<i>-8.705</i>
<i>99110206</i>	<i>ponto_-8.705x-36.225.txt</i>	<i>-36.225</i>	<i>-8.705</i>
<i>99110207</i>	<i>ponto_-8.705x-36.27.txt</i>	<i>-36.27</i>	<i>-8.705</i>
<i>99110208</i>	<i>ponto_-8.705x-36.315.txt</i>	<i>-36.315</i>	<i>-8.705</i>
<i>99110209</i>	<i>ponto_-8.705x-36.36.txt</i>	<i>-36.36</i>	<i>-8.705</i>
<i>99110210</i>	<i>ponto_-8.705x-36.405.txt</i>	<i>-36.405</i>	<i>-8.705</i>
<i>99110211</i>	<i>ponto_-8.705x-36.45.txt</i>	<i>-36.45</i>	<i>-8.705</i>
<i>99110212</i>	<i>ponto_-8.705x-36.495.txt</i>	<i>-36.495</i>	<i>-8.705</i>
<i>99110213</i>	<i>ponto_-8.705x-36.54.txt</i>	<i>-36.54</i>	<i>-8.705</i>
<i>99110214</i>	<i>ponto_-8.705x-36.585.txt</i>	<i>-36.585</i>	<i>-8.705</i>
<i>99110215</i>	<i>ponto_-8.705x-36.63.txt</i>	<i>-36.63</i>	<i>-8.705</i>
<i>99110216</i>	<i>ponto_-8.705x-36.675.txt</i>	<i>-36.675</i>	<i>-8.705</i>
<i>99110217</i>	<i>ponto_-8.705x-36.72.txt</i>	<i>-36.72</i>	<i>-8.705</i>
<i>99110218</i>	<i>99110218_nomedoarq.txt</i>	<i>-36.75</i>	<i>-8.705</i>
<i>99110301</i>	<i>ponto_-8.75x-36.txt</i>	<i>-36</i>	<i>-8.75</i>
<i>99110302</i>	<i>ponto_-8.75x-36.045.txt</i>	<i>-36.045</i>	<i>-8.75</i>
<i>99110303</i>	<i>ponto_-8.75x-36.09.txt</i>	<i>-36.09</i>	<i>-8.75</i>
<i>99110304</i>	<i>ponto_-8.75x-36.135.txt</i>	<i>-36.135</i>	<i>-8.75</i>
<i>99110305</i>	<i>ponto_-8.75x-36.18.txt</i>	<i>-36.18</i>	<i>-8.75</i>
<i>99110306</i>	<i>ponto_-8.75x-36.225.txt</i>	<i>-36.225</i>	<i>-8.75</i>
<i>99110307</i>	<i>ponto_-8.75x-36.27.txt</i>	<i>-36.27</i>	<i>-8.75</i>
<i>99110308</i>	<i>ponto_-8.75x-36.315.txt</i>	<i>-36.315</i>	<i>-8.75</i>
<i>99110309</i>	<i>ponto_-8.75x-36.36.txt</i>	<i>-36.36</i>	<i>-8.75</i>
<i>99110310</i>	<i>ponto_-8.75x-36.405.txt</i>	<i>-36.405</i>	<i>-8.75</i>
<i>99110311</i>	<i>ponto_-8.75x-36.45.txt</i>	<i>-36.45</i>	<i>-8.75</i>