



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

ANDRÉ GONÇALO DOS SANTOS

ACOPLAMENTO DO MODELO ATMOSFÉRICO WRF AO MODELO HIDROLÓGICO
SCS/HMS PARA A PREVISÃO DE CHEIAS NA BACIA DO PARAÍBA DO MEIO EM
ALAGOAS

FORTALEZA-CE
2016

ANDRÉ GONÇALO DOS SANTOS

ACOPLAMENTO DO MODELO ATMOSFÉRICO WRF AO MODELO HIDROLÓGICO
SCS/HMS PARA A PREVISÃO DE CHEIAS NA BACIA DO PARAÍBA DO MEIO EM
ALAGOAS

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

Orientador: José Nilson Bezerra Campos

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S233a Santos, André Gonçalo dos.
Acoplamento do modelo atmosférico WRF ao modelo hidrológico SCS/HMS para a previsão de cheias na bacia do Paraíba do Meio em Alagoas / André Gonçalo dos Santos. – 2016.
132 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2016.
Orientação: Prof. Dr. José Nilson Bezerra Campos.
Coorientação: Prof. Dr. Humberto Alves Barbosa.
1. Modelos WRF e SCS/HMS. 2. Acoplamento. 3. Previsão em curto prazo. 4. Sistema de Alerta. 5. Bacia do rio Paraíba do Meio. I. Título.

CDD 627

ANDRÉ GONÇALO DOS SANTOS

ACOPLAMENTO DO MODELO ATMOSFÉRICO WRF AO MODELO HIDROLÓGICO
SCS/HMS PARA A PREVISÃO DE CHEIAS NA BACIA DO PARAÍBA DO MEIO EM
ALAGOAS

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

Aprovada em 16/08/2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Nilson Bezerra Campos (Orientador)
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Ernesto da Silva Pitombeira
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Jose Maria Brabo Alves
Universidade Estadual do Ceará

Prof. Dr. Emerson Mariano da Silva
Universidade Estadual do Ceará

A minha mãe Benedita, minha esposa Aline, ao meu filho Bernardo,
e aos meus irmãos,
dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as coisas boas que tem me proporcionados ao longo da vida.

Aos meus pais, Benedita Oliva dos Santos e Benedito Gonçalo dos Santos, principalmente a minha mãe pelo incentivo e apoio ao longo desta caminhada.

À minha esposa Aline Gonçalo, pela paciência, apoio e compreensão durante essa jornada em busca desse objetivo.

Aos meus irmãos e irmãs, Marcos Gonçalo, Marcelo Gonçalo, Hernandes Gonçalo, Marta Gonçalo, Henrique dos Santos, José Cicero Gonçalo, Joseane Gonçalo e Josinete Gonçalo, pelo companheirismo, amizade e por se fazerem sempre presentes.

Ao Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará pela oportunidade.

A CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

Ao meu orientador, Prof. José Nilson Bezerra Campos, pela orientação e apoio, permitido que o trabalho fosse desenvolvido na região do vale do rio Paraíba do Meio.

Ao professor Rosiberto Salustiano Silva Júnior do Instituto de Ciências Atmosféricas da Federal de Alagoas, pelo acolhimento em seu laboratório e pela ajuda no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao meu amigo e irmão Clebson do Carmo Raimundo (O TIA), pela grande amizade e companheirismo ao longo do tempo de estudo (graduação, mestrado e doutorado).

Aos amigos de laboratório LABMODEL/ICAT, Gilliano e Arthur pelo ajuda com o modelo WRF.

Aos membros da banca examinadora, pela colaboração na melhoria e engrandecimento deste trabalho.

Em fim, muitas foram às pessoas que me ajudaram, direta e indiretamente na realização deste trabalho, deixo aqui registrada a minha profunda gratidão a todas elas.

RESUMO

A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio localiza-se entre os estados de Pernambuco e Alagoas na região Nordeste, totalizando uma área de 3.148,5km², distribuída entre 21 municípios, dos quais oito pertencem ao estado de Pernambuco e 13 ao estado de Alagoas. Assim como a grande parte das cidades brasileiras, o processo de urbanização dos municípios do vale do rio Paraíba do Meio ocorreu de forma intensa e irregular às margens do rio, o que, por consequência, gerou alta vulnerabilidade aos eventos de inundações. Os impactos proporcionados pelas inundações na região são: perdas materiais, sociais, interrupção das atividades econômicas das áreas afetadas, e perdas de vidas humanas. Diante da problemática, o presente trabalho teve como objetivo principal avaliar o acoplamento unidirecional entre o modelo de previsão atmosférica de mesoescala WRF (*Weather Research and Forecasting*) e um modelo hidrológico semidistribuído formulado no programa HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System*), na perspectiva do desenvolvimento de um sistema de monitoramento e alerta, com vistas a reduzir os danos causados pelos eventos extremos de vazão na região. Para tanto, foram utilizados os dados de análise FNL (*Final Analysis GFS*), resultante do modelo *Global Forecast System* (GFS) como condições iniciais e de contorno do modelo WRF para simulação das precipitações, além dos dados em escala horária de precipitação e vazão, coletados nas Plataformas de Coletas de Dados (PCDs), os quais foram usados nas fases de ajustes e validação dos dois modelos. Para avaliar os resultados gerados pelos modelos durante e após a calibração, foram utilizados sete indicadores estatísticos: Viés, para avaliar a existência de erros sistemáticos; a Raiz do Erro Quadrático Médio, para estimar a magnitude do erro dos valores simulados; o Coeficiente de Correlação Linear de Pearson, para aferir o grau de relação entre as séries simuladas e observadas; e os coeficientes de eficiência *Nash-Sutcliffe*, *Heidke Skill Score* (HSS), Proporção de acerto (H) e a Razão de alarme falso (RAF), para avaliar a habilidade preditiva dos modelos envolvidos e da técnica de acoplamento unidirecional. Depois das etapas de calibração e validação, os resultados foram analisados, estatística e visualmente. O modelo atmosférico WRF apresentou subestimativas das chuvas observadas; contudo, sua previsibilidade foi considerada satisfatória segundo os indicadores. Na avaliação do modelo hidrológico SCS/HMS formulado no programa HEC-HMS, foram obtidos resultados aceitáveis nas fases de calibração e validação. Os coeficientes de correlações foram superiores a 0,90 nas duas etapas, apesar de evidenciar a presença de erro sistemático, e, assim, subestimar as vazões observadas de acordo com critérios estatísticos utilizados. A previsibilidade do modelo hidrológico foi classificada entre satisfatória e aceitável pelos coeficientes de eficiências avaliados. A análise correspondente ao acoplamento indicou correlações superiores a 0,75, com previsibilidade satisfatória (Nash=0,572 e Nash=0,749) para um sistema de previsão. Contudo, o modelo subestimou entre 15% a 44% as vazões observadas nos pontos analisados. De forma geral, a análise do método utilizado com o propósito no desenvolvimento de um sistema de alerta a inundações apresentou resultados promissores no prognóstico de vazão em curto prazo.

Palavras-Chaves: Modelos WRF e SCS/HMS, Acoplamento, Previsão em curto prazo, Sistema de Alerta, Bacia do rio Paraíba do Meio.

ABSTRACT

The basin of the Paraíba do Meio river located between the states of Pernambuco and Alagoas in the northeast region, totaling an area of 3.148,5km², distributed among 21 cities, eight of them belong to the state of Pernambuco, and the other 13 to the state of Alagoas. As it happens in most Brazilian cities, the process of the urbanization of the municipalities of the valley of the Paraíba do Meio river happened intensely and erratically on the river, which consequently led to high vulnerability to events of flood. The impacts caused by the floods in the region are: material and social losses as well, disruption of economic activities in the affected areas, and loss of human life. Regarding the problem, this study aimed to evaluate the unidirectional coupling between the atmospheric forecasting mesoscale model WRF (Weather Research and Forecasting) and a hydrological model formulated in HEC-HMS program (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) in the perspective of the development of a monitoring and warning system, in order to reduce the damage caused by extreme flow events in the region. Therefore, the FNL data analysis were used (Final Analysis GFS) resulting from the Global Forecast System model (GFS) as initial and boundary conditions of the WRF model for simulation of rainfall, and data on hourly scale precipitation and flow, collected in Data collected in vests Platforms (DCPs), which were used in the phase of adjustment and validation of both models. To assess the results generated by the models during and after calibration, we used seven statistical bias indicators, Bias, to evaluate the existence of systematic errors; the root of mean squared error to estimate the magnitude of the error of the simulated values; Pearson correlation coefficient, to measure the degree of relationship among the simulated and observed series; and the quantifiable measures, Nash-Sutcliffe, Heidke Skill Score (HSS), hit rate (H) and the false alarm ratio (FAR), to assess the predictive ability of the models involved and the unidirectional coupling technique. After the calibration and validation steps, the results were analyzed statistically and visually. The atmospheric model WRF showed underestimation of the observed rainfall; however, its predictability was considered satisfactory according to the indicators. In assessing the hydrological model SCS/HMS formulated in HEC-HMS program, acceptable results were obtained in the phases of calibration and validation. Correlation coefficients were greater than 0.90 in two stages, despite the evidence of the presence of systematic error, and thus, underestimating the flow observed according to the statistical criteria. The forecast of the hydrological model was rated between satisfactory and acceptable by the efficiency coefficients evaluated. The corresponding analysis to the coupling indicated correlations above 0.75, with satisfactory predictability (Nash = 0.572 and Nash = 0.749) for a forecasting system. However, the model underestimated 15% to 44% the flow rates observed in the analyzed points. Overall, the analysis of the method used for the purpose of the development of an early warning system to floods showed promising results in the short-term flow forecasts.

Keywords: WRF and SCS/HMS Models; coupling; short-term forecast; alert system; Paraíba do Meio basin.

LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 1	– Percentual de ocorrências de inundações nas regiões brasileiras.....	23
Figura 2	– Enchente e inundação do rio Paraíba do Meio - cidade de Atalaia, Junho de 2010.....	23
Figura 3	– Representação de uma grade tridimensional de um modelo atmosférico....	30
Figura 4	– Localização geográfica da bacia do rio Paraíba do Meio.	44
Figura 5	– Altimetria da bacia do rio Paraíba do Meio.	45
Figura 6	– Tipos de solos que compõem a bacia do rio Paraíba do Meio.	46
Figura 7	– Sistema de drenagem da bacia do rio Paraíba do Meio.	49
Figura 8	– Climatologia regional da bacia do rio Paraíba do Meio. As cidades estão dispostas a montante (Esquerda) e a jusante (Direita).	50
Figura 9	– Período chuvoso (Média mensal em mm) da bacia do rio Paraíba do Meio, (a) abril, (b) maio, (c) junho e (d) julho, respectivamente.....	51
Figura 10	– Regime climatológico das vazões (m ³ /s) na bacia do rio Paraíba do Meio. Posto Quebrangulo (a), Viçosa (b) e Atalaia (c). Os gráficos estão ordenados da montante para a jusante.	53
Figura 11	– Vazões máximas na bacia do rio Paraíba do Meio. Posto Quebrangulo (a), Viçosa (b) e Atalaia (c).	54
Figura 12	– Sistema ETA (?) de coordenadas verticais, utilizada no modelo WRF.....	59
Figura 13	– Aninhamento de grade permitidos no WRF (aninhamento 1-way (a) e aninhamento 2-way (b)).	62
Figura 14	– Fases de cálculo do modelo hidrológico HEC-HMS.	65
Figura 15	– Discretização da bacia do rio Paraíba do Meio.	68
Figura 16	– Esquema do processo de calibração.	72
Figura 17	– Posição em projeção Mercator dos três domínios (D1, D2 e D3) do modelo WRF. A grade maior, D1, é representada pela figura inteira e possui espaçamento de 25 km entre os pontos de grade. Os domínios D2 e D3 possuem 5 km e 1 km de espaçamento entre pontos de espaçamento entre pontos de grades, respectivamente.	73
Figura 18	– Distribuição espacial dos pontos de grade do modelo WRF, na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio.	75

Figura 19 – Localização geográfica das estações convencionais (a) e automáticas (b) utilizadas na pesquisa.	78
Figura 20 – Diagrama representando as principais etapas no desenvolvimento do trabalho.....	85
Figura 21 – Comparação da precipitação observada versus simulada, para as combinações (microfísica e convecção) avaliadas. Posto de Atalaia/AL. (Período: 27 a 31 de Julho de 2011).	88
Figura 22 – Comparação da precipitação observada versus simulada, para as combinações (microfísica e convecção) avaliadas. Posto Viçosa/AL. (Período: 27 a 31 de Julho de 2011).	91
Figura 23 – Proporção de acertos (PA) das previsões de chuva geradas do modelo WRF sobre a bacia do rio Paraíba do Meio.	93
Figura 24 – Relação de alarme falso (RAF) das previsões de chuva geradas do modelo WRF sobre a bacia do rio Paraíba do Meio.	94
Figura 25 – Avaliação da Habilidade (HSS) do modelo WRF, com as combinações analisadas.	95
Figura 26 – Análise comparativa das precipitações previstas e observadas no posto Atalaia. (Período: 1 a 8 de julho de 2013).	97
Figura 27 – Análise comparativa das precipitações previstas e observadas no posto Capela. (Período: 1 a 8 de julho de 2013).	97
Figura 28 – Análise comparativa das precipitações previstas e observadas no posto Cajueiro. (Período: 1 a 8 de julho de 2013).	98
Figura 29 – Análise comparativa das precipitações previstas e observadas no posto Viçosa. (Período: 1 a 8 de julho de 2013).	98
Figura 30 – Precipitação pluviométrica usada na calibração do modelo HMS.	99
Figura 31 – Configuração esquemática do HEC-HMS da bacia de drenagem do rio Paraíba do Meio PE/AL.	101
Figura 32 – Vazão observada versus simulada (com precipitação observada) na fase de calibração do HMS, com a contribuição da precipitação em toda a bacia e ponto de análise na PCD da SB9 (a) e SB12 (b). (Evento: 01 a 05 de Julho de 2013).	103
Figura 33 – Gráficos de dispersão entre as séries das vazões observadas e simuladas na SB9 (a) e na SB12 (b) . (Evento: 01 a 05 de julho de 2013).	104
Figura 34 – Vazão observada versus simulada (precipitação observada) na fase de validação do HMS, com contribuição da precipitação em toda a bacia e com análise na PCD da SB9 (a) e SB12 (b). (Evento: de 9 a 16 de julho de 2013).	106

Figura 35 – Pontos de grade (Pluviômetros Artificiais) gerados pelo modelo WRF.	107
Figura 36 – Vazão observada versus simulada (precipitação simulada) no acoplamento do modelo HMS (Hidrológico) e WRF (Atmosférico), com contribuição da precipitação em toda a bacia e com análise na PCD da SB9 (a) e SB12 (b). (Evento: 01 a 05 de julho de 2013).	110
Figura 37 – Proporção de acerto (PA) e Razão de alarme falso (RAF) para as três classes de vazão (V) previstas pelo sistema de previsão acoplado no posto SB12 (Atalaia).	111
Figura 38 – Hidrograma gerado para estimativa da vazão de alerta e inundação para a cidade de Atalaia (SB12).	112
Figura 39 – Localização geográfica dos pontos de análises com seus respectivos hidrogramas observados e simulados com precipitação observada (Hidrogramas (a) e (c)) e prevista (Hidrogramas (b) e (d)).	114

LISTA DE TABELAS

		Página
Tabela 1	- Índices de sinuosidade divididos por classes.	55
Tabela 2	- Classificação dos métodos de: transformação coluna (X), perda por infiltração coluna (Y) e fluxo de base coluna (Z).	67
Tabela 3	- Configuração do modelo WRF utilizando os esquemas paramétricos.	74
Tabela 4	- Estações (Pluviômetros) Convencionais utilizadas na caracterização climática da bacia do rio Paraíba do Meio.	77
Tabela 5	- Estações automáticas (PCDs) utilizadas na calibração e validação dos modelos (WRF e HEE-HMS).	77
Tabela 6	- Esquema de contingência para o cálculo do HSS.	83
Tabela 7	- Tabela de contingência multi-categorica.....	83
Tabela 8	- Esquemas paramétricos avaliados na fase de calibração do modelo WRF.	86
Tabela 9	- Possíveis combinações utilizando os três esquemas de microfísica por três de convecção no modelo WRF. As abreviações estão especificadas na tabela 7.	87
Tabela 10	- Estatística relacionada às simulações com cada uma das nove combinações avaliadas no modelo WRF-ARW, para o posto de Atalaia/AL.	87
Tabela 11	- Estatística relacionada às simulações com cada uma das nove combinações avaliadas no modelo WRF-ARW, para o posto de Viçosa/AL.	90
Tabela 12	- Avaliação estatística da fase de validação do modelo WRF.	96
Tabela 13	- Principais características das sub-bacias, utilizadas na calibração do modelo hidrológico. Tc = Tempo de Concentração e Tr = Tempo de Retardo.	100
Tabela 14	- Critérios estatísticos avaliados na calibração dos parâmetros do HMS na Sub-bacia SB9 e SB12 com precipitação observada.	102
Tabela 15	- Critérios estatísticos avaliados na validação dos parâmetros do HMS na Sub-bacia SB9 e SB12 com precipitação observada.	105
Tabela 16	- Critérios estatísticos avaliados no acoplamento do HMS (Hidrológico) e WRF (Atmosférico) na Sub-bacia SB9 e SB12 no período de 01 a 05 de Julho de 2013.	108
Tabela 17	- Valores do CN em função da cobertura e tipo hidrológico de solo para Ia/S=0,20.	132

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AMJJ	Abril, Maio, Junho e Julho.
ANA	Agência Nacional de Águas
ARPS	Advanced Regional Prediction System
ARW	Advanced Research WRF
BRAMS	Brazilian Regional Atmospheric Modeling System
CAPS	Centro de Análise e Previsão de Tempestades
CCM	Complexo Convectivo de Mesoescala
CELM	Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba
CN	Número de Curva
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
D_{cli}	Declividade
D_d	Densidade de Drenagem
DPI	Divisão de Processamento de Imagens
ECMWF	European Centre for Medium Weather Forecasting
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
FAA	Administração Federal de Aviação
FNL	Final Analysis
GFS	Global Forecast System
HEC	Centro de Engenharia Hidrológica
HMS	Sistema de Modelagem Hidrológica
HSS	Heidke Skill Score
ICAT	Instituto de Ciências Atmosféricas
INPE	Instituto de Pesquisas Espaciais
JMA	Japan Meteorological Agency
K_f	Fator de Forma
LABMODEL	Laboratório de Modelagem Atmosférica
MM5	Penn State Mesoscale Model
MMM	Divisão de Meteorologia de Meso e Microescala
Nash	Coeficiente de Nash – Sutcliffe
NCAR	Centro Nacional de Pesquisas Atmosféricas
NCEP	National Centers for Environmental Prediction

NEB	Nordeste Brasileiro
NOAA	Administração Nacional de Oceanos e Atmosfera
PA	Proporção de Acerto
PCD	Plataforma de Coleta de Dados
RAF	Razão de Alarme Falso
RAMS	Regional Atmospheric Modeling System
RAS	River Analysis System
REQM	Raiz do Erro Quadrático Médio
SCS	Soil Conservation Service Curve
Sin	Sinuosidade
T_c	Tempo de Concentração
T_r	Tempo de Retardo
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
VCAN	<i>Vórtice Ciclônico</i> de Altos Níveis
WRF	Weather Research and Forecasting

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xiii
1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	20
2.1 Objetivo Geral	20
2.2 Objetivos Específicos	20
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 Inundações	21
3.2 Conceitualização de um Sistema	24
3.3 Sistema de Alerta as Cheias e Inundações	24
3.3.2 Sistema de alerta da cidade de São Paulo	25
3.3.3 Sistema de alerta do Rio de Janeiro – RJ	26
3.3.4 Sistema de alerta da Bacia do Itajaí (CEOPS) no estado de Santa Catarina	26
3.3.5 Sistema de alerta de Minas Gerais	27
3.4 Conceito de modelagem e Simulação	27
3.4.1 Modelagem Atmosférica	29
3.5 Previsão quantitativa da precipitação	34
3.6 Modelagem Hidrológica	35
3.6.1 Modelos hidrológicos distribuídos	36
3.7 Acoplamento entre Modelos Atmosférico e Hidrológico	39
4. DADOS E METODOLOGIA	44
4.1 Caracterizações da Área de Estudo	44
4.1.1 Relevo	45
4.1.2 Tipos de Solos	46
4.1.2.1 Argissolos Vermelho-Amarelo	46
4.1.2.2 Latossolo Amarelo	47
4.1.2.3 Neossolos Regolíticos	47
4.1.2.4 Planossolo Háptico	48
4.1.3 Rede Hidrográfica	48
4.1.4 Características Pluviométrica da Região	49
4.1.5 Regime das Vazões do rio Paraíba do Meio	52
4.1.6 Vegetação	54
4.1.7 Características Morfológicas da Bacia	55
4.2 Descrição da modelagem utilizada	57
4.2.1 Modelo WRF	57
4.2.1.1 Coordenadas verticais	58
4.2.1.2 Equações Governantes no WRF	59
4.2.1.3 Aninhamento de grades	61
4.2.1.4 Processos Físicos	62
4.2.1.5 Esquemas de Microfísica	63
4.2.1.6 Parametrização de Cumulus	63
4.2.2 Programa HEC-HMS	64

4.2.2.1 Método de Perdas Iniciais: Número de Curva do SCS (CN).....	68
4.2.2.2 Método de transformação do Excedente de Precipitação em Vazão: Modelo do Hidrograma Unitário do SCS.	70
4.2.2.3 Processo de Calibração de Modelos Hidrológicos.....	71
4.2.3. Configuração do Domínio do WRF.....	73
4.3 Aquisição e Tratamento dos Dados.....	75
4.3.1 Séries de precipitação e vazão	75
4.3.2 Dados de entrada no modelo WRF.....	79
4.4 Avaliações da eficiência dos Modelos.....	79
4.4.1 Viés.....	79
4.4.2 Raiz do Erro Quadrático Médio	80
4.4.3 Coeficiente de Correlação	80
4.4.4 Coeficiente Nash – Sutcliffe.....	81
4.4.5 Heidke Skill Score	82
4.4.6 Proporção de acerto (H).....	84
4.4.7 Razão de alarme falso (RAF)	84
4.5 Resumo Procedimental.....	85
5. RESULTADOS	86
5.1 Configuração do modelo WRF.....	86
5.2 Validação do modelo WRF.....	95
5.3 Modelagem Hidrológica	99
5.4 Calibração Modelo Hidrológico	101
5.5 Validação HEC-HMS	105
5.6 Acoplamento unidirecional entre o modelo hidrológico e o WRF	107
5.7 Alerta a Inundação	111
6. CONCLUSÕES RECOMENDAÇÕES	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
APÊNDICE A.....	131
ANEXO A	132

1. INTRODUÇÃO

Na possibilidade de explorar os benefícios oferecidos pelos rios, como transporte, lazer, abastecimento, entre outros, a sociedade buscou se estabelecer em seus entornos. Contudo, o processo de ocupação se mostrou sem nenhum ou qualquer planejamento, o que levou às ocupações das planícies inundáveis de uma bacia hidrográfica e, conseqüentemente, à geração de grandes problemas socioeconômicos, em função da alta vulnerabilidade aos eventos de cheias e inundações.

Os impactos gerados pelas inundações nesses ambientes consistem principalmente em perdas materiais, sociais, interrupção das atividades econômicas das áreas inundáveis, e perdas de vidas humanas (BLAINSKI, 2011).

Diante da problemática, algumas medidas preventivas são discutidas na literatura, com a finalidade de minimizar os impactos causados pelas inundações. As duas medidas mitigadoras mais abordadas são classificadas em estruturais e não estruturais (CASTRO *et al*, 2007). As medidas estruturais são obras de engenharia desenvolvidas para reduzir os riscos às inundações. Segundo Tucci (1993), elas são classificadas em extensivas e intensivas. O controle extensivo é realizado mediante intervenções de conservação do solo, e alteração da cobertura vegetal da bacia, que reduz os picos das cheias e o volume de escoamento superficial. As medidas dos tipos intensivas são aquelas que agem no rio e objetiva diversas formas de controle dependendo do tipo de obra, em geral, os reservatórios, os diques, caixas de expansão, retificações do curso do rio, entre outras. Os controles intensivos na maioria das vezes são aplicados para acelerar o escoamento; retardar o escoamento ou desviar o escoamento.

As medidas não estruturais, em contraponto, procuram reduzir impactos sem modificar o risco das enchentes naturais, e defendem, na sua concepção, a melhor convivência da população com as cheias. Entre essas medidas, citam-se como exemplos: a regulamentação do uso e ocupação do solo; o aproveitamento das áreas vulneráveis; os sistemas de alerta; os seguros contra enchente; os mapas de inundações, entre outras. Entre as ações não estruturais, os sistemas de previsão e alerta hidrológico têm se destacado com bastante eficiência. Uma das maiores vantagens da utilização das medidas não estruturais está associada ao seu baixo custo e bons resultados (BLAINSKI, 2011). Frente a isso, a modelagem matemática surge como uma poderosa ferramenta de apoio às medidas não estruturais.

A utilização de métodos numéricos para modelação de fenômenos físicos ganhou espaço nos mais variados ramos da ciência. Em meteorologia, os modelos numéricos têm sido

utilizados principalmente no estudo do comportamento dinâmico da atmosfera e previsão do tempo. Já no que concerne à modelagem hidrológica, ela constitui uma importante ferramenta no gerenciamento de recursos hídricos e em estudos que buscam obter prognósticos hidrológicos em bacias hidrográficas, a partir das condições iniciais.

Outra possibilidade alternativa de ferramenta não estrutural é a utilização de modelos hidrológicos acoplados a modelos atmosféricos. O método consiste na alimentação do modelo hidrológico com uma série de precipitação prevista pelo modelo meteorológico. A implementação da modelagem meteorológica com a hidrológica possibilita estudar a estrutura e características de formação, desenvolvimento e propagação de eventos hidrológicos como as inundações.

Meller (2012) abordou essa metodologia na previsão de cheias por conjuntos em curto prazo na bacia do rio Paraopeba em Minas Gerais, utilizando o modelo hidrológico MGB-IPH. Para o autor, a abordagem representa uma perspectiva promissora na detecção e antecipação de eventos de cheias, sobretudo em eventos do tipo dicotômicos, importantes na emissão de alerta de cheias.

Oliveira (2006) implementou o modelo atmosférico WRF acoplado ao modelo hidrológico TOPMODEL na bacia de União de Vitória no estado do Paraná. As simulações com os modelos acoplados, segundo o autor, demonstraram a existência de uma possibilidade de previsão de vazão para alertas de níveis críticos até 48 horas.

A metodologia utilizada neste trabalho, como se observa, já vem sendo objeto de pesquisa. Contudo, sua aplicabilidade nos sistemas de alertas a enchentes e inundações ainda vem sendo pouco explorada no Brasil.

A contribuição da pesquisa desponta com grande relevância no que concerne às ações operacionais, bem como ao desenvolvimento de um sistema de previsão (*Nowcasting*) e alerta a cheias e inundações na bacia do rio Paraíba do Meio. Nesse sentido, a importância de um sistema de alerta surge diante dos vários eventos de inundações observados nos registros históricos da região do vale do rio Paraíba do Meio. As inundações das áreas urbanas das cidades localizadas às margens do rio, além de impor elevados prejuízos econômicos à população, têm provocado inúmeras mortes na região. Dessa forma, e diante dos fatos, um estudo direcionado à criação de um sistema de alerta a cheias e inundações tornou-se indispensável para a região, de modo a reduzir os impactos diretos e indiretos causados por tais eventos.

Nessa perspectiva, é proposta e avaliada a implementação do acoplamento entre um modelo atmosférico e um hidrológico como metodologia para o desenvolvimento de um sistema de previsão e alerta a cheias e inundações na bacia do rio Paraíba do Meio.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar o acoplamento unidirecional entre o modelo atmosférico de mesoescala WRF e um modelo hidrológico formulado com as ferramentas disponíveis no HEC-HMS, como instrumento basal no estudo de um sistema de previsão e alerta às inundações na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio.

2.2 Específicos

- Verificar as características hidrometeorológicas do vale do rio Paraíba do Meio.
- Configurar o modelo atmosférico de mesoescala WRF para previsão de chuva em curto prazo.
- Formular um modelo hidrológico semidistribuído, utilizando as ferramentas do HEC-HMS.
- Calibrar o modelo hidrológico concebido, para simular eventos de vazões em curto prazo no vale do rio Paraíba.
- Validar o modelo WRF e o HEC-HMS nas simulações de eventos atmosféricos e hidrológicos em curto prazo.
- Analisar a eficiência do modelo acoplado no prognóstico de cheias na bacia do rio Paraíba do Meio.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Inundações

Todos os anos os principais meios de comunicações do Brasil informam a ocorrência de inundações em várias cidades brasileiras, fato que tem aumentado progressivamente ao longo dos anos. A ocorrência do fenômeno reduz a qualidade de vida das populações e ocasiona prejuízos ao patrimônio público e privado, além de provocar perdas de vidas e aumentar a difusão de doenças associadas às águas pluviais contaminadas. Segundo o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) do Ministério das Cidades do ano de 2013, a ausência de planejamento urbano, a urbanização descontrolada, a impermeabilização em larga escala do solo urbano, a ocupação das planícies de inundação e a falta de instrumentos legais de controle na fonte de impacto encontram-se dentre as raízes dos problemas decorrentes das inundações urbanas.

As inundações são fenômenos extremos de ordem natural com espantosa força destrutiva, as quais podem ocorrer de modo repentino e provocar impactos diretos sobre as populações; os seus efeitos são inesperados e rapidamente perceptíveis. As inundações podem ser definidas como eventos hidrológicos que consistem na elevação do nível das águas de um rio, lagos ou açudes, de forma a causar um transbordo das águas sobre as áreas adjacentes a esses sistemas hídricos. Segundo Castro (2003), esses eventos podem ser classificados em função de dois aspectos, magnitude e tipologia.

Em relação à magnitude, as inundações são classificadas em: inundações excepcionais; inundações de grande magnitude; inundações normais ou regulares e inundações de pequena magnitude. Já quanto à tipologia, elas são classificadas em: inundações graduais; inundações bruscas e alagamentos. Segundo Kobiyama *et al* (2006), a maior parte das situações de emergência é causada por inundações graduais e bruscas

Para Almeida (2010), as inundações bruscas ocorrem em consequência de um acelerado acúmulo e lançamentos de águas do escoamento superficial em áreas com elevadas declividades, comumente presentes em áreas mais a montante das bacias. Elas podem ser ocasionadas por chuvas intensas e deslizamentos de terra. São eventos individualizados pela forte e rápida elevação do nível das águas do rio, acompanhada por uma redução também relativamente rápida, o que origina grandes velocidades de escoamento superficial. Essas vazões rapidamente atingem seu pico máximo e diminuem quase com a mesma rapidez.

Esse tipo de inundação é considerado uma das mais perigosas pelo seu poder destrutivo, quando comparada às outras inundações, em função de sua imprevisibilidade natural e força, o que oferece pouco tempo às comunidades às margens do rio para se organizarem para o evento.

No geral, esses fenômenos têm, na maioria das vezes, origem nas precipitações anormais, que causam elevação do nível dos rios e conseqüentemente o transbordo do leito dos rios, lagoas e canais, de modo a acarretar uma invasão de água nas áreas ocupadas pelo homem, a qual provoca destruição da infraestrutura, danos materiais, econômicos, ambientais, propagação de doenças, geração de desabrigados, feridos, e, a depender da intensidade do evento, até vidas humanas são perdidas.

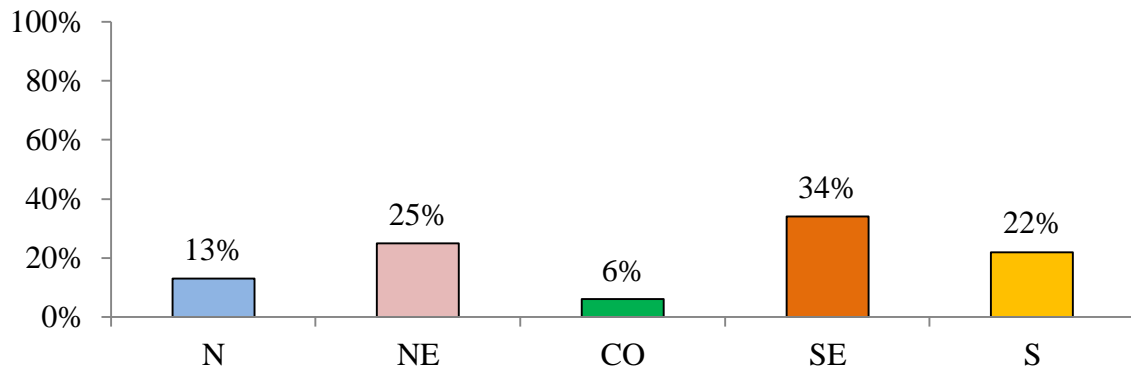
Marcelino (2008), utilizando dados sobre desastres do banco de dados global *Emergency Events Database* (EM-DAT), mostrou que, no período 1900-2006, o desastre de maior recorrência em todo o mundo, foram as inundações, com 35% de todo o registro relacionado a desastres naturais. Aproximadamente 66% dos desastres naturais ocorridos nesse período estiveram vinculados às instabilidades atmosféricas severas ou eventos hidrometeorológicos extremos.

Segundo Mendes e Mendiondo (2007), as inundações são responsáveis por 53% das mortes causadas por catástrofes naturais no mundo. Os prejuízos causados por inundações correspondem a 29% dos danos causados por catástrofes naturais em todo o mundo (BERZ, 2000).

Quanto ao Brasil, de acordo com o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais - CEPEDa/UFSC (2013), as inundações correspondem ao terceiro evento natural mais recorrente no país, com um percentual de 12% do total de recorrências de desastres. De acordo com as Diretrizes Estratégicas para o Fundo de Recursos Hídricos de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (MCT/CGEE, 2002), as inundações no Brasil causam prejuízos anuais superiores a US\$ 1 bilhão (MENDES, 2007).

No período de 1991 a 2012, os episódios de inundações severas no Brasil, totalizaram 4.691 registros oficiais (MCT/CGEE, 2002). Quanto à distribuição espacial no período analisado, a região Sudeste do Brasil detém 34% do total dos eventos, seguida pela região Nordeste, conforme Figura 1.

Figura 1 – Percentual de ocorrências de inundações nas regiões brasileiras.



Fonte: Atlas Brasileiro de Desastres Naturas - CEPEDa/UFSC (2013).

De acordo com os dados apresentados pelo CEPEDa/UFSC (2013), no período de 1991 a 2012, foram registrados 1.196 casos de inundações na região NE, o que deixou um saldo negativo de mais de 4,4 milhões de afetados, mais de 200 mil desabrigados, 144 desaparecidos e 98 mortos.

Entre os estados da região NE, Alagoas computou 742 registros oficiais de desastres naturais no período de 1991 a 2010, sendo 21% (156 registros) dos valores computados eventos de inundações bruscas e enxurradas e 2,83% (21 registros) inundações graduais. Nesse período de análise (1991-2010), 34% dos municípios do Estado registraram prejuízos decorrentes dos eventos de inundações. Dentro dos limites do estado de Alagoas, a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio tem apresentado em seu histórico grandes problemas envolvendo as inundações ribeirinhas. Um dos eventos mais recentes ocorridos na região, que se tornou notícia nacional por sua magnitude e destruição, ocorreu em junho de 2010 (Figura 2).

Figura 2 – Enchente e inundação do rio Paraíba do Meio - cidade de Atalaia, Junho de 2010.



Fonte: Autor, 2010.

Diante do presente cenário, algumas medidas não estruturais são implementadas com o propósito de reduzir os impactos diretos das inundações. Uma das medidas que tem proporcionado bons resultados, segundo a literatura, são os sistemas de monitoramento e alerta. Esses sistemas são utilizados como um importante mecanismo para alertar, prevenir e coordenar atividades em situações de emergências, de maneira a fornecer às autoridades informações confiáveis, com o fim de auxiliar nas tomadas de decisões de ações aos danos causados pelas inundações.

3.2 Conceitualização de um sistema

Segundo Campos (2009, p. 33), um sistema é definido como uma estrutura formada por vários componentes que interagem entre si, recebendo impulsos, efetuando transformações e emitindo respostas. Como exemplo, cita-se um sistema de drenagem urbano formado pelas vias urbanas e canais de macrodrenagem, que transformam as chuvas em escoamento superficial e, conseqüentemente, geram níveis de cheias.

Bulletin (1973) define um sistema como "tudo o que consiste em partes ligadas entre si". Isso inclui a essência do que é um sistema, ou seja, é alguma coisa que consiste em partes; e existem partes separadas nessa mesma coisa, e que estão conjuntamente conectadas de alguma forma. Para MacFarlane (1964), um sistema é definido como "um ordenado arranjo de objetos físicos ou abstratos".

De acordo com Bulletin (1973), na abordagem clássica, certas suposições são feitas sobre a natureza de um sistema e as leis físicas que regem o seu comportamento; estes são, em seguida, combinados com a entrada para prever a saída. Para aplicar esse procedimento clássico, é necessário conhecer as leis físicas ou ser capaz de fazer suposições razoáveis sobre elas. É também necessário ser capaz de descrever a estrutura do sistema para especificar a entrada. Uma distinção é feita entre a natureza do próprio sistema e as leis físicas do seu funcionamento. A natureza do sistema refere-se apenas à sua estrutura inerente, isto é, à natureza dos componentes do sistema e à forma em que esses componentes estão ligados.

3.3 Sistema de Alerta às Cheias e Inundações

Em conjunto com as previsões de vazões em tempo real, encontram-se os Sistemas de Alerta a Enchentes e Inundações, que têm proporcionado um importante auxílio na redução dos danos causados por esses eventos. Os sistemas de alerta possibilitam o

armazenamento de dados hidrológicos e meteorológicos utilizados para prever as vazões em determinada região, com o fim de permitir que situações de enchentes e inundações possam ser previstas com antecedência apropriada para alertar a população, e, desse modo, evitar perdas de vidas humanas e reduzir os impactos sobre os bens materiais.

Em um sistema de alerta a enchentes e inundações, geralmente, são usadas três etapas para elaborar um plano de alerta à população: monitoramento, previsão e decisão (NETO, 2000).

A fase de monitoramento é utilizada para obter, armazenar e distribuir dados hidrológicos e meteorológicos coletados no sistema hídrico. Os dados coletados na fase de monitoramento são computados e utilizados pela componente de previsão que utiliza as informações para elaborar previsões de vazão e nível dos rios. A terceira componente, a de decisão, é representada por uma equipe que gerencia as situações de emergências e que trabalha para alertar a população das áreas alagáveis. O conjunto dessas etapas permite que a população possa ser avisada com antecedência apropriada, quando há níveis previamente estabelecidos (VARELA, 2003). A seguir são apresentados alguns sistemas de alerta a enchentes e inundações em operação.

3.3.2 Sistema de alerta da cidade de São Paulo

O Sistema de alerta a enchentes e inundações de São Paulo (SAISP) foi criado pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) em 1976. Atualmente, o monitoramento hidrológico do SAISP é feito por uma rede telemétrica hidrológica do DAEE, que conta com 170 estações pluviométricas telemétricas e pelo radar meteorológico de São Paulo que foi implementado em 1988. O monitoramento é composto por um sistema de estações remotas que monitoram o nível dos rios e pelo radar meteorológico que mapeia as chuvas numa extensão de até 180km. Os dados coletados pela rede telemétrica e estação de radar são transmitidos para um computador central através de ondas VHF e linhas telefônicas que atualizam a base de dados a cada cinco minutos. As previsões são realizadas utilizando-se os dados coletados pelas estações telemétricas e pelo radar meteorológico, com uma antecedência de três horas à frente do campo de precipitação detectado pelo radar. Os avisos são acionados quando a previsão atinge os limites das situações críticas de atenção, alerta e emergência.

3.3.3 Sistema de alerta do Rio de Janeiro – RJ

O Sistema de alerta a enchentes e inundações, operado pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA) do estado do Rio de Janeiro, começou a ser instalado em 2008, na Baixada Fluminense e em 2010 na região serrana de Nova Friburgo. O sistema possui 62 estações telemétricas, que enviam dados automaticamente para a central de processamento de dados do INEA por telemetria (SMS celular), a cada 15 minutos, com medição da quantidade de chuva e do nível d'água dos rios, 24 horas e todos os dias da semana.

O sistema INEA possui quatro níveis: Vigilância, que é o acompanhamento permanente sem ocorrência de chuvas e com chuvas fracas ou esparsas; de Atenção, quando são registradas precipitações moderadas; Alerta, para chuvas intensas e subida de nível dos rios e Alerta Máximo, quando há previsão de aumento acentuado na intensidade das chuvas continuadas e o nível dos rios atinge 80% da capacidade de transbordamento.

As unidades de Defesa Civil recebem os alertas do INEA e ficam encarregadas de divulgar e auxiliar as Prefeituras na adoção de medidas preventivas nas regiões a serem afetadas.

3.3.4 Sistema de alerta da Bacia do Itajaí (CEOPS) no estado de Santa Catarina

O Centro de Operações do Sistema de Alerta de Cheias da Bacia do Itajaí (CEOPS) no estado de Santa Catarina desenvolve as atividades de monitoramento, previsão e alerta de enchentes para as comunidades do Vale do Itajaí desde 1984. As atividades no sistema são executadas em conjunto por docentes e funcionários da Universidade Regional de Blumenau (FURB), visando ao fornecimento de informações em períodos emergenciais, aos órgãos de Defesa Civil, órgãos comerciais e industriais e à comunidade em geral.

As previsões hidrológicas são obtidas a partir dos resultados dos modelos hidrológicos de previsão de cheia em tempo atual, calibrados para a cidade de Blumenau. Os alertas de enchentes são dados com base na quantidade de chuva e dos níveis previstos.

O sistema conta com uma rede telemétrica composta por 16 estações, sendo que 14 delas fornecem os níveis e os subtotais de chuvas e duas fornecem apenas as chuvas. Quanto ao monitoramento meteorológico, o sistema utiliza imagens de satélite e diversos produtos de previsão numérica do tempo (PNT) obtidos no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). O uso das imagens de satélite permite o acompanhamento dos principais sistemas meteorológicos que atuam na região. Os produtos da PNT são utilizados

para antecipar situações que podem resultar em eventos críticos com possibilidade de alagamentos em algumas cidades do Vale do Itajaí.

3.3.5 Sistema de alerta de Minas Gerais

O sistema de alerta a enchentes e inundações de Minas Gerais SIMGE (Sistema de Meteorologia e Recursos Hídricos de Minas Gerais) está instalado no Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), e foi criado em 1997, com o objetivo de modernizar a meteorologia e a hidrologia no Estado. O sistema é destinado à vigilância e previsão quantitativa do tempo e do comportamento hídrico do estado. O sistema auxilia atividades de preservação ambiental e defesa da população, com ênfase nos fenômenos adversos como enchentes e inundações, estiagens e temporais severos. O SIMGE faz a previsão do tempo por meio de uma rede meteorológica que efetua transmissões de dados via satélite a cada três horas. O processamento e a disseminação desses dados para o sistema são feitos pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). O SIMGE avalia esses dados, faz uma análise do tempo no estado e disponibiliza as informações para a população.

O SIMGE funciona em três níveis. No primeiro, um cenário de risco de enchente é identificado por meio da previsão de chuvas com até 54 horas de antecedência. Para a Defesa Civil, esse é um estado de alerta 1, que a coloca de prontidão. No alerta 2, a população é informada pela Defesa Civil da possibilidade de evacuação das áreas de risco. Esse estado é identificado com 48 horas de antecedência e tem a ver com o nível dos rios. No estado de alerta 3, as populações são convocadas a evacuar as áreas de risco com a assistência da Defesa Civil antes que as inundações aconteçam.

3.4 Conceito de modelagem e simulação

Primeiramente, faz-se necessária a definição de alguns conceitos como modelo e simulação para um melhor entendimento do trabalho.

Para Campos (2009, p. 35), um modelo pode ser definido como um conjunto de hipóteses sobre a estrutura ou o comportamento de um sistema físico pelo qual se procura explicar ou prever, dentro de uma teoria científica, as propriedades de um sistema. Ainda segundo o autor, um modelo pode ser definido como a conceitualização de um sistema.

Segundo Tucci (2005), os modelos podem ser classificados em físicos, analógicos e matemáticos. O físico é representado por um protótipo do sistema, em uma escala menor.

Os analógicos exploram as semelhanças formais entre quaisquer dois fenômenos físicos para simular um do outro. Relações matemáticas que explicam o comportamento entre os dois fenômenos são idênticas. Essas relações geralmente são expressas sob a forma de equações diferenciais e são geralmente baseadas em um princípio de conservação (em massa, de energia etc.). Embora os modelos analógicos sejam fundamentados em conceitos simples, eles são intuitivos e fáceis de entender e são bastante limitados em sua complexidade. Por sua vez, os modelos matemáticos podem ser definidos como a representação de um sistema físico por meio de equações, ou seja, a representação do comportamento de uma estrutura, esquema ou procedimento, real ou abstrato, que num dado intervalo de tempo inter-relaciona-se com uma entrada, causa ou estímulo de energia ou informação, e uma saída, efeito ou resposta de energia ou informação (GOOGE, 1973).

Para Lima (2011), a modelagem consiste em uma série de procedimentos que visam representar a realidade de forma simplificada; ela surge da necessidade do homem em compreender os fenômenos que o cercam para interferir ou não em seu processo. Segundo Bratley *et al* (1987), um modelo é a representação simplificada de um sistema, cujo objetivo é prever seu comportamento sob certas circunstâncias, ou ainda, pode ser definido como a representação de um aspecto do mundo real que possibilita reconstruir a realidade; prever um comportamento, uma transformação ou uma evolução do sistema (WANG; ANDERSON, 1982; CHRISTOFOLETTI, 1999). Desse modo, com a representação da realidade por meio da modelagem, surgiu o conceito de simulação, que tem por significado submeter o modelo às condições iniciais e verificar seu comportamento resultante.

Segundo Campos (2009, p. 43), simular um sistema consiste em avaliar qual teria sido o comportamento dele, se determinadas regras de operação tivessem sido obedecidas, e certos impulsos houvessem ocorrido. Ainda de acordo com o autor, o termo simulação, no sentido mais técnico, é usado para descrever o comportamento de um sistema representado por semelhança com outros sistemas.

Para Bazzo (2013, p. 173), a simulação pode envolver protótipos, primeiros exemplares de um produto, construídos para testes, ou modelos submetidos a ambientes físicos reais. No caso particular de modelos matemáticos, eles são submetidos a distúrbios matemáticos para avaliar a condição de serviço esperada.

Atualmente a modelagem tem sido fortemente utilizada na simulação de tempo e clima, com o propósito de se fazer diagnósticos e prognósticos que auxiliem no monitoramento de eventos extremos, além de auxiliar no processo de planejamento e gestão dos recursos hídricos.

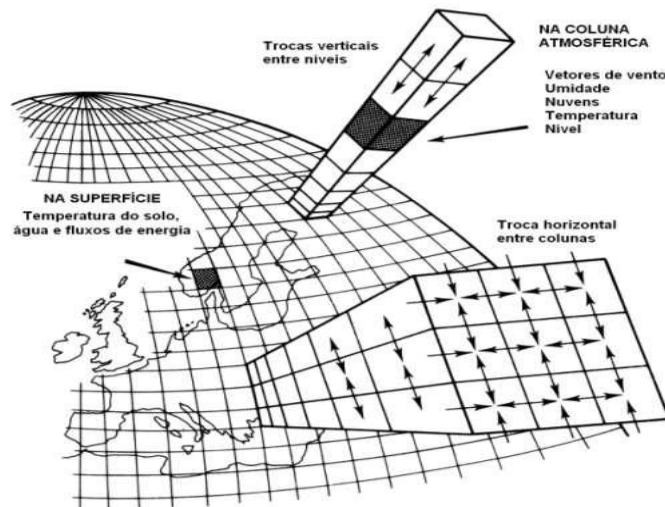
No exposto, prever a ocorrência de fenômenos de ordens naturais como os atmosféricos e os hidrológicos tornou-se imprescindível, visto que as catástrofes (Secas e Inundações) impõem à sociedade grandes prejuízos econômicos, sociais e perdas de vidas humanas. Frente a isso, a modelagem numérica se apresenta como uma das possíveis ferramentas com grande potencial para se estudar, mensurar e minimizar os impactos causados pela variação no volume pluviométrico precipitado e conseqüentemente do volume escoado superficialmente. Diante disso, diferente da metodologia adotada pelos sistemas de alerta já descritos, o presente trabalho propõe a utilização da modelagem numérica, utilizando-se um acoplamento unidirecional entre um modelo hidrológico e um modelo atmosférico para avaliar o desenvolvimento de um sistema de alerta a enchentes e inundações para a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio. A pesquisa limita-se à avaliação da metodologia nesse processo e não o desenvolvimento do sistema.

3.4.1 Modelagem Atmosférica

A atmosfera, como sistema físico, é governada por um conjunto de equações matemáticas que derivam das leis físicas básicas e do desenvolvimento do cálculo diferencial. Essas equações que determinam os movimentos da atmosfera são muito complexas e não podem ser resolvidas de forma exata e analítica, exigindo-se, desse modo, algumas aproximações. Com a invenção dos computadores por volta da década de 1950, e a implementação de novos métodos na resolução das equações diferenciais, foi possível rodar pela primeira vez previsões de tempo em forma numérica, o que fez surgir, dessa forma, o primeiro modelo atmosférico (FERNANDES, 2009).

Nos modelos atmosféricos, alguns processos físicos como radiação, nuvens e trocas de energia e massa são representados por meio de parametrizações. Na descrição da atmosfera, esses modelos são compostos por camadas na vertical, enquanto a superfície é dividida numa malha horizontal, ou grade, com diversos nós na qual as equações são calculadas, para formar, dessa forma, uma malha tridimensional (Figura 3).

Figura 3 – Representação de uma grade tridimensional de um modelo atmosférico.



Fonte: Henderson-Sellers, 1985.

Os modelos atmosféricos podem ser classificados em dois tipos, globais e regionais. Os Modelos Atmosféricos de Circulação Global (MACG) identificam e reproduzem bem o comportamento geral da atmosfera em escala sinótica sem, entretanto, atermem-se às peculiaridades de cada região. As informações físicas sobre sistemas de mesoescala, como tempestades severas em regiões específicas, são obtidas a partir de modelos regionais, visto a necessidade de parametrizações detalhadas de superfície na representação dos efeitos de topografia em resolução local.

Os MACGs trabalham com uma resolução espacial da ordem de várias dezenas ou algumas centenas de quilômetros, sendo capazes de representar o comportamento de fenômenos de grande escala (KALMA; CALDER, 1994). Modelos com essa ordem de grandeza são executados diariamente em vários centros de previsões do tempo no mundo, dos quais podemos citar: NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*), ECMWF (*European Centre for Medium Weather Forecasting*), JMA (*Japan Meteorological Agency*) e CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos).

No CPTEC, o MACG é usado operacionalmente para previsão de tempo e, com as devidas modificações, para previsão de clima. Para previsão de tempo, o modelo é rodado com as resoluções T62L28 e T126L28, em que T refere-se ao tipo de truncamento espectral utilizado, denominado triangular, nas ondas zonais 62 e 126, e L refere-se ao número de camadas na vertical, neste caso, 28. As resoluções horizontais T62 e T126 equivalem, respectivamente, a uma resolução aproximada de 200x200km e 100x100km, o que fica próximo à linha do Equador. O MACG é rodado para previsão de sete dias nos horários 00 e 12 UTC, para as resoluções T62L28 e T126L28. Nos horários intermediários, 06 e 18 UTC, o

modelo é rodado para previsão de doze horas com a resolução T62L28 para produzir um ciclo de assimilação de seis horas.

Os Modelos de Circulação Regional (MCRs), ao contrário dos MACGs, simulam o comportamento da atmosfera para uma área delimitada ou específica. Os MCRs possuem resolução na ordem de poucas dezenas de quilômetros, sendo capazes de representar comportamentos de mesoescala em uma área específica (PIELKE, 2002).

A vantagem dos MCRs é a possibilidade de melhor representar as propriedades locais, por meio de parametrizações e dados mais detalhados de superfície, pelo uso de maior resolução espacial capaz de capturar melhor os aspectos regionais ou locais (por exemplo, a influência da topografia), que podem influenciar nos resultados das simulações.

Segundo Rozante e Cavalcanti (2008), os MCRs são ferramentas extraordinárias para ampliar o conhecimento dos fenômenos em escala regional, além de possibilitar o detalhamento característico da atmosfera local. Eles são usados no diagnóstico e nos prognósticos do tempo, principalmente em regiões que sofrem efeitos de topografia que influem nas condições meteorológicas.

Muitos MCRs vêm sendo implementados nas previsões regionais como o RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*), o BRAMS (*Brazilian Regional Atmospheric Modeling System*), o ARPS (*Advanced Regional Prediction System*), o MM5 (*Penn State Mesoscale Model*), o Eta (CPTEC) e o mais recentemente, o WRF (*Weather Research and Forecasting*) (PIELKE *et al*, 1992; XUE *et al*, 2000; MICHALAKES *et al*, 1998).

Entre os vários MCRs executados nos centros de pesquisas e previsões numéricas do tempo em todo o mundo, o modelo de área limitada WRF é atualmente utilizado por inúmeras instituições, com mais de 30.000 usuários registrados em mais de 150 países, segundo o seu *site* (<http://www.wrf-model.org/index.php>). Sua versatilidade permite a personalização para uma vasta gama de estudos. Ele oferece uma diversidade de opções para os processos físicos na atmosfera, além de sistemas avançados de assimilação de dados que estão sendo desenvolvidos e testados.

O modelo é útil tanto para situações atmosféricas idealizadas como para situações reais em escalas horizontais que podem ir desde alguns metros (microescala) até milhares de quilômetros (macroescala). Além do mais, ele pode ser executado em uma variedade de plataformas de computação.

A seguir são apresentados alguns trabalhos recentes que utilizaram o modelo WRF para a simulação de fenômenos meteorológicos e que discutem a qualidade dos resultados obtidos por esse modelo.

Sousounis *et al* (2004) compararam os resultados simulados gerados pelos modelos MM5, WRF, ARPS e ETA, na previsão de eventos de chuvas convectivas. Os modelos foram configurados com dois domínios com resolução horizontal de 36km e 12km, respectivamente, para os Estados Unidos. Os resultados das simulações com resolução de 36km mostram que o MM5 e o WRF tiveram os melhores desempenhos, no entanto, o modelo WRF mostrou-se mais hábil que o MM5 com resolução espacial de 36km, além de apresentar um melhor desempenho com a resolução de 12km.

Brian e Pablo (2008), analisando os resultados obtidos em um experimento de simulação no sul da Flórida, constataram a habilidade de previsão do modelo WRF sobre o modelo ETA, especialmente em previsões em curto prazo. Bender (2012), utilizando uma configuração com duas grades aninhadas (D1: 50km e D2: 16,6km), no modelo WRF em um horizonte de 72 horas na previsão de tempo, para a cidade de São Paulo, obteve resultados satisfatórios no diagnóstico diário da precipitação acumulada.

Oliveira (2006) avaliou o modelo WRF na previsão horária de chuva sobre a bacia hidrográfica de União da Vitória, e, segundo seus resultados, as previsões realizadas com um horizonte de 24 e 48 horas indicaram uma fraca correlação com os valores observados pela rede de pluviômetros do Instituto tecnológico SIMEPAR. As séries horárias indicaram, ainda, um comportamento sistemático (confirmado nas séries diárias) do modelo em prever mais chuvas do que são monitoradas pelos pluviômetros, independentemente da intensidade da precipitação. Contudo, o modelo WRF consegue identificar os eventos meteorológicos, mas não consegue fazer uma simulação com precisão horária. Além disso, a distribuição espacial pode ser prejudicada pela resolução da grade, deslocando a precipitação para dentro ou para fora da área de estudo.

Apesar da imprecisão do modelo WRF nas previsões horárias, a boa previsibilidade dos eventos meteorológicos ficou evidente ao se analisar as séries de previsões acumuladas em dados diários de precipitação. As previsões acumuladas se encontraram em fase com a precipitação observada por praticamente todo o período de estudo, embora apresentando picos mais elevados.

Realizando testes para as previsões de chuvas e aproximação de sistemas frontais com o modelo WRF no estado do Rio de Janeiro, Padilha (2011) constatou uma boa eficiência do modelo em estimar a aproximação dos sistemas frontais e previsão de chuvas intensas, desde que exista uma utilização adequada dos esquemas paramétricos convectivos.

Santos (2012) utilizou e avaliou três configurações paramétricas convectivas distintas (*Kain-Fritsch*, *Betts-Miller-Janjic*, *Grell-Devenyi*), na simulação de eventos

extremos de precipitação com o modelo WRF para o estado de São Paulo, e, em suas observações, constatou que as simulações com os diferentes parâmetros de convecção não apresentaram grandes diferenças entre si nas previsões; entretanto, observou uma elevada capacidade preditiva do modelo em simular precipitações e suas intensidades.

Macedo *et al* (2011) utilizaram o modelo WRF configurado com dois domínios aninhados, D1 com resolução espacial de 18km e D2 com 6km, na previsão de eventos severos na região Sul do Brasil. A integração entre os domínios teve como objetivo simular os fortes ventos e tempestades com precipitação intensa e de curta duração. Segundo o estudo, as simulações realizadas proporcionaram resultados relativamente compatíveis com os registros observados. Para os autores, as implicações apresentadas indicam que o modelo de mesoescala é uma ferramenta essencial para o prognóstico de eventos severos, particularmente quando processados com grande resolução espacial.

Oliveira (2014), avaliando as parametrizações convectivas no modelo WRF e sua relação com a precipitação durante ciclogêneses no sudeste da América do Sul através do índice estatístico *BIAS score*, observou que as simulações que utilizaram o esquema convectivo KF produziram uma maior área de chuva, enquanto que as simulações com o esquema BMJ obtiveram a menor área de precipitação, principalmente nos limiares de chuva moderada a forte. O *BIAS* calculado em relação ao TRMM (Série de dados) foi menor do que o calculado em relação ao MERGE (série de dados) em quase todos os limiares para as simulações com os três esquemas, apresentando subestimativa da área de chuva produzida pelo WRF.

A avaliação volumétrica da precipitação, pelo erro médio, mostrou maior volume de chuva nas simulações com o esquema KF, e menor com o BMJ. Essas diferenças no volume de precipitação podem estar associadas aos diferentes tratamentos dos processos convectivos nos esquemas e na interação entre o esquema convectivo e a microfísica na escala de grade, que respondeu, em média, por maior parte da precipitação, principalmente nas simulações com o esquema BMJ.

Calvetti (2011) utilizou o modelo WRF para previsão hidrometeorológica probabilística na bacia do alto Iguaçu – PR. Pelos resultados, ele constatou que as melhores previsões de precipitação com o WRF foram obtidas com as combinações de microfísica *Lin et al* e convecção de *Kain-Fritsch*, microfísica WSM 5 e convecção de *Kain-Fritsch* e simulações defasadas em 6 horas. As simulações inicializadas em horários mais próximos da ocorrência do fenômeno não garantiram uma melhoria na distribuição de precipitação na bacia. As combinações que utilizaram o modelo de convecção de *Grell* produziram uma

quantidade menor de precipitação que as demais e, em geral, geraram núcleos de convecção com pequenas áreas estratiforme. O modelo de convecção de *Betts-Miller* tende a gerar núcleos de convecção com diminutas áreas estratiformes. Para as áreas estratiformes, as combinações com parametrização de convecção de *Kain-Fritsch* simularam áreas semelhantes às observações e bons resultados de previsão de precipitação. Segundo o autor, em relação à distribuição espacial da precipitação na bacia hidrográfica, os resultados indicam melhores simulações com a utilização das combinações de microfísica *Lin et al* e convecção de *Kain-Fritsch*, microfísica WSM 5 e convecção de *Kain-Fritsch* e simulações defasadas em seis horas utilizando convecção de *Kain-Fritsch* e microfísica de *Lin*.

Santo *et al* (2010) avaliaram a influência da convecção de mesoescala no prognóstico de precipitação do modelo WRF em alta resolução sobre a Amazônia. Os resultados mostraram que a convecção de cúmulos que melhor se adaptou à realidade pluviométrica da região foi a de *Betts-Miller-Janjic*, pois o padrão espacial de nível diário, como também de horário foram razoavelmente capturados. As previsões para a cidade de Manaus acompanharam o padrão observado, mas ainda apresentaram subestimação da intensidade das chuvas.

Rodrigues (2014) efetuou a validação do modelo WRF na simulação do vento e precipitação na ilha das Flores, no contexto da produção de energia renovável. O resultado relativo à precipitação evidenciou superestimação na quantidade de precipitação no período de 2003 a 2011, entre os meses de dezembro a abril, e subestimou nos meses mais secos, tendo apresentado a sua pior capacidade de previsão da precipitação nos meses de julho, agosto e setembro, com os menores valores de correlação e maiores valores de MAPE. Verifica-se que o modelo representa bem os quartis de fracas/normais precipitações, mas superestima os quartis mais elevados, principalmente os extremos. No entanto, nos eventos extremos, muitas vezes de caráter convectivo, a precipitação pode ser localizada.

3.5 Previsão quantitativa da precipitação

O conhecimento dos valores previstos de precipitações pluviométricas é condição indispensável à previsão hidrológica. No entanto, essa variável meteorológica apresenta certa complexidade em sua quantificação prevista, pois é resultante de diversos processos atmosféricos que ocorrem em várias escalas meteorológicas, variando desde grandes massas de ar até eventos convectivos extremamente localizados, além de sofrer forte influência das

propriedades superficiais do terreno e apresentar forte sensibilidade às condições iniciais e à física do modelo atmosférico (ANTHES *et al*, 1989; GANGULY; BRAS, 2003).

De acordo com Silva *et al* (2006), a previsão pode ser classificada em função do tempo de antecedência como: previsão em tempo real (*Nowcasting*), em que a antecedência é de 0 (zero) a seis horas; previsão de curto prazo, em que a antecedência é de seis a 24 horas; e previsão de longo prazo ou de clima, em que a antecedência da previsão é superior a três meses.

Segundo Smith e Austin (2000), existem vários métodos utilizados na previsão em tempo real, como a estimativa da precipitação por satélite ou por radar que caracteriza de maneira congruente o estado atual da atmosfera; no entanto, a qualidade da previsão é comprometida pelo seu alcance, uma vez que a física dos processos atmosféricos, por um lado, não é representada pelo método. Por outro lado, os modelos atmosféricos regionais trazem consigo a representação física dos sistemas atmosféricos, os quais proporcionam uma melhor qualidade na previsão quantitativa da precipitação, e com um alcance mais elevado (SCHUURMANS; BIERKENS, 2009).

Nos últimos anos, com o aumento do poder computacional e o avanço no aperfeiçoamento dos parâmetros dos modelos atmosféricos, as previsões quantitativas da precipitação alcançaram melhores qualidades (HOLLINGSWORTH, 2003). Esse avanço tem estimulado o uso combinado de modelos atmosféricos e hidrológicos, o que tem proporcionado bons resultados (BARTHOLMES; TODINI, 2005).

3.6 Modelagem Hidrológica

A modelagem hidrológica consiste nas representações matemáticas destinadas à simulação dos processos relativos ao ciclo hidrológico na superfície, como os processos de infiltração, recarga de aquíferos, escoamento superficial e a vazão na rede de drenagem. Os modelos hidrológicos são geralmente utilizados como uma ferramenta de auxílio à engenharia hidrológica, levando a uma melhor compreensão dos fenômenos hidrológicos em uma bacia, bem como a possibilidade de prever o comportamento de uma bacia hidrográfica sob diversas condições.

O conceito de modelagem hidrológica não é recente, e surgiu a partir do equacionamento de alguns processos hidrológicos. Segundo Tucci (2005), os primeiros modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão surgiram após a década de cinquenta; eles consistiam na previsão dos efeitos da precipitação sobre uma bacia. Com o passar do tempo e

o surgimento de várias agências e institutos de pesquisas voltadas ao gerenciamento de recursos hídricos, os modelos foram sendo aprimorados, na tentativa de simular fisicamente os processos hidrológicos.

A modelagem hidrológica vem sendo amplamente utilizada nos prognósticos de eventos potencialmente nocivos à sociedade, relacionados ao regime hidrológico, além de auxiliar no processo de planejamento contra possíveis impactos voltados à variação da vazão em uma bacia hidrográfica. Segundo Paiva (2011), a modelagem hidrológica pode ser aplicada para diversos fins, como análise de projetos, impactos causados por eventos extremos, orientação no planejamento de recursos hídricos, qualidade da água, transporte de sedimentos, aperfeiçoamento de sistemas de reservatórios, sistemas de abastecimento d'água, redes coletoras de esgotos e águas pluviais e previsão de vazões em curto, médio e longo prazo.

Segundo Lima (2011), os modelos hidrológicos podem ser diferenciados entre si pela abordagem espacial que possuem. Duas classes são comumente citadas: os modelos concentrados e os modelos distribuídos. Os modelos concentrados, em geral, visam obter resultados médios representativos de toda a bacia, como a vazão no exutório; enquanto os modelos distribuídos procuram representar os processos em cada elemento de área que compõe a bacia.

3.6.1 Modelos hidrológicos distribuídos

Os modelos hidrológicos distribuídos estão ganhando cada vez mais espaço e importância dentro dos estudos hidrológicos. Sua utilidade se estende desde a geração de dados de vazão em bacias hidrográficas até a estimativa de vazão em áreas sem monitoramento hidrológico, principalmente, aquelas carentes de informações relativas aos escoamentos para previsão de vazões, para períodos secos e eventos de cheias.

Essa metodologia considera a variabilidade espacial dos processos simulados. Segundo Mendes (1996), os modelos distribuídos subdividem a bacia em elementos considerados homogêneos, quanto às propriedades avaliadas, ao representar, além da variação temporal, a variabilidade espacial do sistema físico. Os modelos distribuídos consideram a heterogeneidade espacial dos dados hidrometeorológicos, nos processos hidrológicos e nas características físicas e antrópicas na bacia (GAMA, 2011). Silans *et al* (2000) destacam que os modelos hidrológicos distribuídos procuram incorporar a variabilidade espacial dos parâmetros descritivos da geologia, da natureza do solo (pedologia), da ocupação do solo

(antrópicas) e do relevo (geomorfologia), assim como a distribuição espacial da precipitação, e, eventualmente, da evapotranspiração potencial. Essa ferramenta busca a integração entre os vários parâmetros geográficos de uma bacia hidrográfica, o que possibilita uma maior inter-relação entre os vários agentes de transformação do espaço e as variáveis hidrológicas.

Vários estudos têm sido realizados utilizando-se o programa HEC-HMS em diferentes regiões e sob diferentes condições climáticas. Como exemplo, citam-se alguns trabalhos recentes que utilizaram o HEC-HMS no desenvolvimento de um modelo chuva-vazão no processo de simulação de fenômenos hidrológicos.

Majidii e Shahedi (2012) utilizaram o programa HEC-HMS para simular os processos chuva-vazão em um estudo de caso na bacia hidrográfica de Abnama, situada no sul do Irã. A simulação foi conduzida com a utilização de cinco eventos de tempestade. Os resultados obtidos mostram uma diferença entre os fluxos de pico observados e simulados, e, portanto, a necessidade de um método de otimização e análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo. A comparação entre os hidrogramas observados e simulados gerados pelo programa HEC-HMS após a calibração mostrou uma correlação de 0,93 e indicou uma boa capacidade do modelo em simular vazão na bacia hidrológica de Abnama.

Chi (2011) aplicou o programa HEC-HMS na sua versão 3.4 para estimar as vazões sob diferentes cenários de mudanças climáticas na bacia do rio Grande, localizada no sul do estado do Colorado nos EUA. O modelo *Deficit-Constant* foi calibrado e empregado para gerar seis alterações climáticas nos hidrogramas, e, segundo o autor, os resultados gerados pelo modelo hidrológico conseguiu representar de forma satisfatória as vazões sob diferentes cenários de mudanças climáticas.

Chu e Steinman (2009) avaliaram o comportamento dos modelos SCS-CN e SMA disponíveis no HEC-HMS sobre o divisor de águas *Mona Lake* em Michigan nos EUA, quando submetido a um evento individual de precipitação. As simulações obtidas forneceram detalhes hidrológicos sobre a quantidade, variabilidade, e fontes de escoamento na bacia. Os resultados das simulações mostraram que a modelagem hidrológica dos eventos, apoiada por dados de campo intensivos, é útil para melhorar a escala temporal utilizada na modelagem contínua, de modo a fornecer parâmetros mais precisos e bem calibrados.

Choudhari *et al* (2014) aplicaram o programa HEC-HMS no estudo do escoamento superficial e na construção de hidrogramas de vazão na bacia hidrográfica de Balijore Nala em Odisha na Índia. Na análise, foram calculados os volumes do escoamento superficial, a taxa de escoamento de pico e o fluxo de base, utilizando-se o método do Número de Curva do SCS e o método do diagrama unitário do SCS. Para calibração e

validação dos parâmetros do SCS-CN, no HEC-HMS, os autores utilizaram 24 eventos de tempestades aleatórios, abrangendo quatro anos (2010-2013) de dados. As funções quadrados (erro médio absoluto relativo - MARE e erro médio quadrático - RMSE) foram utilizadas na avaliação do modelo e indicaram desempenhos satisfatórios na simulação dos hidrogramas. Apesar das dificuldades, limitações e incertezas associadas à modelagem hidrológica, o HEC-HMS indicou resultados otimistas na simulação dos processos chuva-vazão na bacia de Balijore Nala.

Chatterjee *et al* (2014) avaliaram a aplicabilidade do HEC-HMS na simulação de vazão na bacia hidrográfica do rio Damodar no leste da Índia. O processo de avaliação do modelo desenvolvido pelo programa HEC-HMS incluiu análise de sensibilidade, calibração e validação. A análise de sensibilidade foi realizada para determinar os parâmetros exatos para as previsões na bacia. O critério de eficiência *Nash-Sutcliffe*, o erro percentual do volume e o erro percentual do pico foram utilizados na avaliação de desempenho. As análises demonstraram bons resultados, com valores dos índices acima referidos variando entre 75%-81%, -10.5%-19.4%, -18.0%-29.6%, respectivamente, para as vazões diárias. Segundo os autores, o modelo gerado pelo programa HEC-HMS, quando calibrado, executa satisfatoriamente as simulações de vazões.

Gautam (2014) utilizou o HEC-HMS no estudo do fluxo simulado de vazão na bacia do rio Narayani no oeste do Nepal. O modelo foi calibrado usando precipitação diária dos anos de 2014 e 2015. Foram aplicadas técnicas manuais e automáticas nas estimativas dos valores paramétricos do modelo. A precisão do modelo foi verificada por meio de análise qualitativa e quantitativa. Nos resultados, os valores de fluxo simulados *versus* observados mostraram um bom ajuste, segundo o autor. O volume total foi subestimado e o pico de fluxo foi superestimado. O coeficiente de *Nash* e de determinação foi de 0,905 e 0,91, respectivamente, na fase de calibração, e 88,76% e 0,89, respectivamente, na fase de validação.

Roy *et al* (2013) empregaram o HEC-HMS na avaliação dos impactos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Subarnarekha no leste da Índia. A análise constatou que o armazenamento do solo, o armazenamento zona da tensão e o coeficiente de armazenamento de águas subterrâneas são parâmetros sensíveis na simulação de vazão. Na análise da eficiência do modelo, foram encontrados valores que variaram entre 0,72 a 0,84, 4,39-19,47%, 1,9 a 19% e 0,70-0,85, para os coeficientes *Nash-Sutcliffe*, erro percentual do volume, percentagem de erro do pico e coeficiente de determinação, respectivamente.

Yener *et al* (2007) usaram o HEC-HMS na sua a versão 3.0.1 como ferramenta de apoio à decisão, na operação e gestão de reservatório, na bacia hidrográfica do rio Yuyacik, com área de drenagem de 257,86km², localizada na parte leste da região de Marmara na Turquia. O modelo foi calibrado para simular as vazões em escala horária. Segundo os autores, os resultados demonstraram que o modelo gerado pelo programa HEC-HMS é uma ferramenta com elevado potencial no combate aos danos causados pelas inundações e nos estudos das estimativas desses danos.

Zhang *et al* (2013) investigaram os efeitos da subdivisão de uma bacia hidrográfica, no desempenho da simulação de eventos de inundações com o programa HEC-HMS. A área de estudo foi a bacia de Clear Creek com dimensão de 260km², localizada entre os estados de Iowa e Johnson nos EUA. As simulações foram realizadas em escala horária, e os parâmetros do modelo foram otimizados automaticamente para se ajustar aos dados observados. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que a maioria dos valores dos parâmetros calibrados no HEC-HMS é sensível ao esquema de partição de bacia, e que existe uma importância relativa nos processos físicos, descrita pelo modelo na subdivisão de bacia. O trabalho também mostrou que o processo de calibração automática pode levar a uma prescrição incorreta da dinâmica interna de produção e transporte de escoamento gerado pelo modelo.

3.7 Acoplamento entre Modelos Atmosférico e Hidrológico

Na busca por uma metodologia que vise aprimorar e impulsionar as previsões hidrometeorológicas, o acoplamento entre modelos atmosféricos e hidrológicos tem sido o centro de muitos estudos nas últimas décadas (MÖLDERS; RÜHAAK, 2002; TUCCI *et al*, 2003; CHANG *et al*, 2004).

Segundo Braga *et al* (2005), o acoplamento entre modelos pode ser feito de duas maneiras, acoplamento unidirecional ou bidirecional. No acoplamento unidirecional (*off-line*), os dados meteorológicos previstos pelo modelo atmosférico (precipitação, evapotranspiração) são usados como dados de entrada no modelo hidrológico. Esse tipo de acoplamento oferece maior flexibilidade e autonomia operacionalmente (BRAGA *et al*, 2005). No acoplamento bidirecional (*online*), existe uma permuta de dados entre os modelos, sendo os processos hidrológicos também representados no modelo atmosférico; desse modo, esse passa a ser um modelo integrado (hidrometeorológico).

Nessa troca de informações entre os modelos, existe uma necessidade de ajustes entre as escalas (*downscaling* dos dados meteorológicos e *upscaling* dos dados hidrológicos), já que os modelos atmosféricos operam desde dezenas a centenas de quilômetros e os modelos hidrológicos em escalas muito menores, desde alguns metros a centenas de metros. Para Yu *et al* (1999), as incompatibilidades de unidades, de escalas temporais e espaciais são tidas como os principais problemas encontrados no acoplamento bidirecional, entre os modelos hidrológicos e atmosféricos.

Trabalhos como os de Benoit *et al* (2003); Kobold e Sušelj (2005); Bartholmes e Todini (2005); Oliveira *et al* (2006); Zhao *et al* (2009); Zabel e Mauser (2013), entre muitos outros, vêm sendo desenvolvidos ao longo do tempo no sentido de promover o acoplamento entre modelos atmosféricos e hidrológicos, de modo a possibilitar uma previsão mais robusta dos eventos extremos de vazões (inundações) e no gerenciamento de recursos hídricos. Segundo Yu *et al* (1999) e Benoit *et al* (2003), a utilização desse método apresenta um grande potencial na previsão de enchentes e inundações, bem como nas avaliações de seus impactos. Neste trabalho, adotou-se o acoplamento unidirecional, por apresentar resultados promissores quanto às previsões de vazões e estudos voltados à operação e gerenciamento de reservatórios, e por proporcionar uma maior facilidade operacional na fase de acoplamento entre os modelos. Trabalhos recentes que discutem a qualidade dos resultados obtidos no acoplamento entre modelos atmosféricos e hidrológicos, com propósito no prognóstico de vazão, são citados abaixo.

Cabral *et al* (2016), objetivando otimizar o intervalo de tempo de máxima previsibilidade no gerenciamento de reservatório, efetuou o acoplamento do modelo atmosférico RAMS forçado pelo modelo atmosférico global ECHAM 4.5 ao modelo hidrológico SMA do programa HEC-HMS, na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe no estado do Ceará. Segundo o autor, o resultado gerado pelo modelo RAMS demonstrou melhor eficiência no intervalo de 30 a 45 dias, com HSS igual a 0,56. Quanto ao modelo hidrológico, o desempenho foi considerado satisfatório com *Nash-Sutcliffe* igual a 0,89 na fase de calibração e 0,67 na fase de validação. De modo geral, a análise demonstrou, de acordo com o autor, que o SMA, quando forçado pelo RAMS, apresenta um acerto de 61% nas previsões.

Meller *et al* (2014) propuseram uma metodologia para o prognóstico de cheia por conjunto em curto prazo, baseada em sucessivas previsões com o modelo MGB-IPH, ao se utilizar como dados de entrada um conjunto de previsões de precipitação. A avaliação da metodologia foi realizada em intervalo de tempo horário e horizonte de 72h no período entre ago./2008 e mai./2011. Os resultados das avaliações por conjunto mostraram superioridade

em relação à previsão determinística, sendo possível obter, na maior parte dos casos analisados, um aumento na proporção de detecções corretas da ocorrência do evento de cheia, mantendo-se as taxas de alarmes falsos em níveis reduzidos.

Alves *et al* (2012) investigaram a sensibilidade do acoplamento na gestão de águas dos reservatórios na região semiárida do Nordeste do Brasil (NEB). Na análise, foi utilizado o modelo atmosférico espectral regional RSM-97, impulsionado pelas saídas do modelo de circulação geral da atmosfera ECHAM-4.5 e do modelo chuva-vazão AMS (*Soil Moisture Accounting*) na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe, para estimar o fluxo de vazão no reservatório Orós no estado do Ceará. Para os autores, a descarga simulada pelo modelo SMA e impulsionada pelo RSM-97 foi relativamente apropriada, o que demonstrou um bom equilíbrio nos resultados durante o período avaliado, sobretudo indicando a metodologia como ferramenta potencial para auxiliar a gestão dos reservatórios na região semiárida do NEB.

Rodrigues (2012) realizou um acoplamento entre o modelo hidrológico MGB-IPH e o modelo atmosférico WRF, no propósito de estimar vazão na bacia do rio Paraíba do Meio AL/PE em escala diária. As análises foram efetuadas em duas etapas: interpolação por Krigagem-KGM das precipitações previstas e observadas e comparação dos hidrogramas simulados a partir das precipitações antecipadas e observadas. As correlações espaciais encontradas foram da ordem de 0,54 para as precipitações previstas e 0,92 para as observadas. As vazões simuladas com dados gerados pelo modelo WRF foram significativas, com correlações que variaram entre 0,46 a 0,56. De acordo com o autor, o acoplamento pode ser uma técnica útil no auxílio do prognóstico das vazões elevadas, desde que se efetue uma calibração mais robusta no modelo atmosférico.

Paiva *et al* (2011) avaliaram a eficiência do acoplamento entre o modelo hidrológico MGB-IPH e o modelo regional previsão de tempo WRF na sua versão v3.2. Os dados de entrada no modelo hidrológico foram gerados através do modelo regional, em seu domínio 03. A análise foi realizada por comparação entre os hidrogramas simulados com chuvas previstas e observadas. Segundo o autor, as simulações hidrológicas com precipitação prevista não apresentaram resultados melhores que as simulações com dados observados. Entretanto, as correlações apresentaram resultados satisfatórios quando se leva em consideração o grau de incerteza na previsão da variável precipitação.

Blainski *et al* (2011) avaliaram o desempenho do modelo hidrológico SWAT e do modelo atmosférico WRF, com o objetivo de desenvolver um sistema de previsão hidrológica diário, baseado no acoplamento, para a bacia hidrográfica do rio Araranguá em Santa

Catarina. Segundo os autores, os modelos demonstraram habilidade na simulação de vazão e precipitação sobre a bacia hidrográfica do rio Araranguá. Contudo, o modelo atmosférico WRF precisa de ajustes para reduzir as incertezas quanto ao volume precipitado. Para os autores, o acoplamento entre os modelos WRF e SWAT possibilitou a previsão de vazão em diferentes pontos na bacia, com um horizonte de 48 horas. Entretanto, recomendam maiores estudos a fim de aprimorar os resultados, principalmente em situações de maiores volumes de chuva diária.

Block *et al* (2009) propuseram um acoplamento integrado e *off-line* entre modelos climas globais (GCMs), climáticos regionais e modelos de balanço hídrico, objetivando aprimorar as previsões de vazões através da geração de previsões por conjunto na bacia hidrográfica do rio Jaguaribe no nordeste do Brasil. Na análise, os autores utilizaram os modelos ECHAM 4.5, NCEP/MRF9 GCMs e modelos regionais, incluindo os modelos dinâmicos e estatísticos integrados ao modelo hidrológico ABCD e aos procedimentos de umidade do solo de um modelo de balanço hídrico.

Bravo *et al* (2009) avaliaram o desempenho de dois modelos de previsão de vazões de alcance médio, em um estudo de caso no reservatório de Furnas, em função da disponibilidade das previsões quantitativas de precipitação do Centro Brasileiro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). As previsões de vazão foram calculadas para uma área de drenagem de aproximadamente 51.900km². De acordo com os autores, os resultados mostraram que o desempenho das previsões de vazão foi fortemente dependente da qualidade das previsões de precipitação quantitativa utilizada. Além disso, os resultados obtidos, mediante a incorporação de precipitação prevista em ambos os modelos, tiveram desempenho melhor que a vazão atual obtida pelo operador do sistema elétrico nacional brasileiro, por meio de modelos estatísticos que não utilizam informações sobre precipitação observada ou prevista.

Collischonn *et al* (2007) apresentaram uma metodologia de previsão de vazão em tempo real baseada em um modelo hidrológico distribuído, utilizando informações de precipitação observada em postos pluviométricos e precipitação prevista pelo modelo meteorológico ETA em funcionamento no CPTEC/INPE. A metodologia foi avaliada na bacia do rio Paranaíba, na região incremental entre as usinas hidrelétricas de Itumbiara e São Simão. Os resultados indicaram que a inclusão de previsões quantitativas de chuva poderá ter um impacto significativo na redução dos erros da previsão de vazão realizada operacionalmente pelas entidades e empresas do setor elétrico na bacia do rio Paranaíba.

Silva *et al* (2007) executaram uma integração entre o modelo hidrológico MGB-IPH e o modelo atmosférico de área limitada ETA para a previsão de vazão de curto prazo na bacia do rio São Francisco. As previsões de precipitação do modelo ETA, operado pelo CPTEC, foram utilizadas como entrada no modelo hidrológico. As previsões foram feitas com intervalo de tempo diário até o horizonte de 10 dias. Os resultados gerados pelo MGB-IPH apresentaram desempenho bastante promissor quanto à previsão de vazão. Segundo os autores, apesar das limitações, esse tipo de previsão tem sido objeto crescente de estudos, motivados pela minimização dos riscos da variabilidade climática global.

Oliveira (2006) implementou o acoplamento entre o modelo atmosférico WRF e o modelo hidrológico TOPMODEL na bacia de União da Vitória. Foram realizadas simulações para o período de 24 de setembro de 2005 a 30 de setembro de 2006. Os principais resultados obtidos constataram que, apesar da boa previsibilidade dos eventos de precipitação, ainda não é possível realizar previsões com acurácia na escala horária. As previsões diárias possibilitaram detectar os eventos de precipitações observadas, porém, com amplitudes maiores. O acoplamento entre os modelos envolvidos permitiu evidenciar bem os casos em que houve erro de previsões, além de demonstrar a possibilidade do acoplamento em prever vazão para alerta de níveis críticos até 48 horas.

Collischonn *et al* (2005) apresentaram os resultados do uso do modelo hidrológico ajustado, com a previsão de precipitação do modelo climático, na previsão de vazão sazonal em Iraí, no rio Uruguai (62.200km²). Os resultados mostram que a metodologia baseada na combinação do modelo hidrológico e das previsões climáticas corrigidas permitiu reduzir o erro de previsão de vazão (redução de variância) em 54%, em relação às previsões baseadas nas médias mensais de longo período. Segundo os autores, a metodologia apresenta um forte potencial na utilização das previsões climáticas sazonais em recursos hídricos.

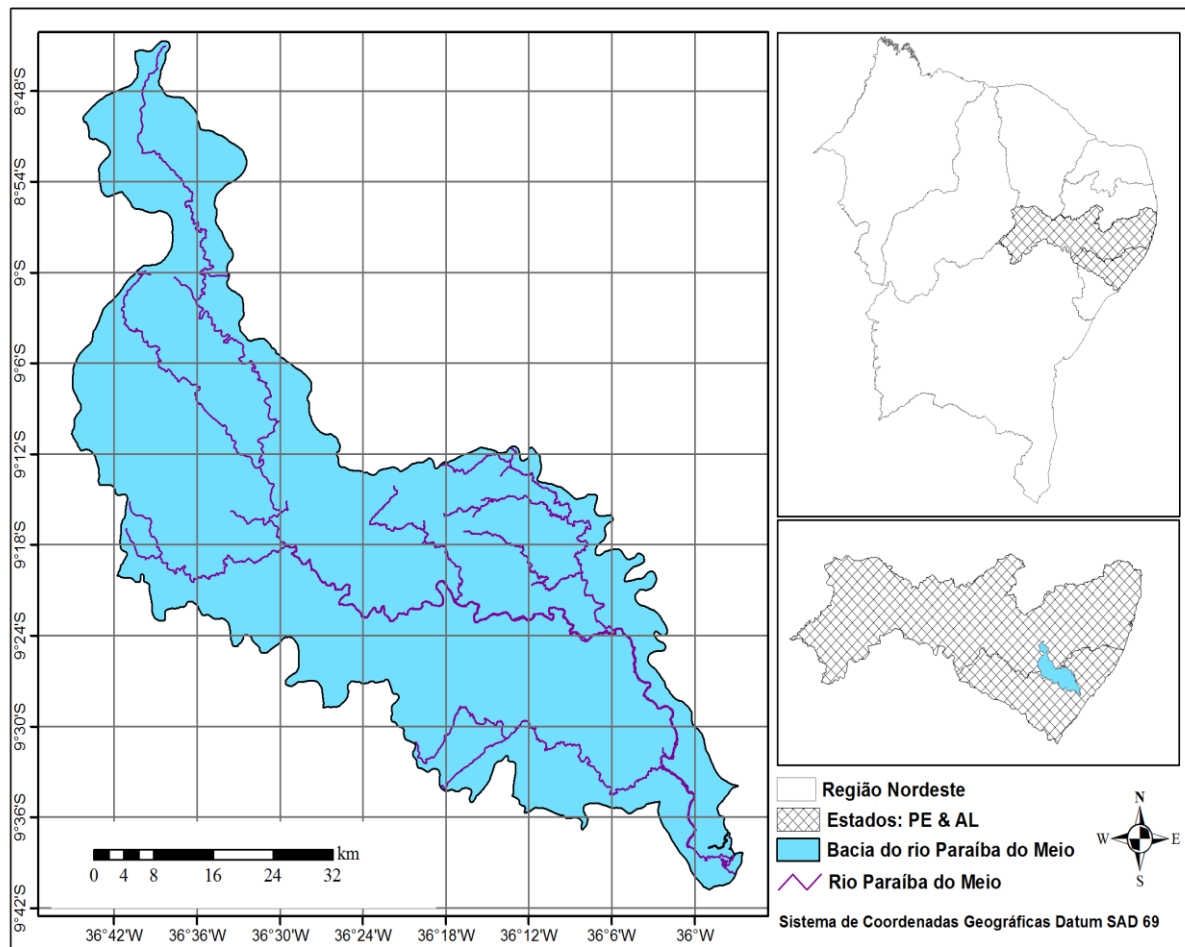
Yu *et al* (2002) utilizaram a saída do modelo climático RCM (*Regional Climate Model*) como forçante do Sistema de Modelagem Hidrológica (HMS) para simular os efeitos hidrológicos de uma série de tempestade sobre a bacia do rio Susquehanna na região norte dos Estados Unidos. Segundo o autor, o HMS apresenta certa sensibilidade à saída do RCM, e, por essa razão, a simulação não reproduz com precisão a vazão observada.

4. METODOLOGIA

4.1 Caracterizações da Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio localiza-se entre as latitudes Sul $8^{\circ}44'$ e $9^{\circ}44'$ e os meridianos de longitude oeste $36^{\circ}48'$ e $35^{\circ}52'$ (Figura 4), abrangendo uma área total de $3.148,5\text{km}^2$, com 62,4% ($1.964,66\text{km}^2$) do seu total pertencente ao estado de Alagoas e 37,6% ($1183,8\text{km}^2$) ao estado de Pernambuco. A área da bacia distribuiu-se entre 21 municípios nos dois estados, dos quais, oito pertencem ao estado de Pernambuco (Caetés, Paranatama, Garanhuns, Brejão, Saloá, Terezinha, Lagoa do Ouro e Bom conselho) e treze municípios ao estado de Alagoas (Chã Preta, Quebrangulo, Palmeira dos Índios, Paulo Jacinto, Mar Vermelho, Viçosa, Pindoba, Maribondo, Cajueiro, Capela, Atalaia, Pilar e Marechal Deodoro), conforme APÊNDICE A.

Figura 4 – Localização geográfica da bacia do rio Paraíba do Meio.

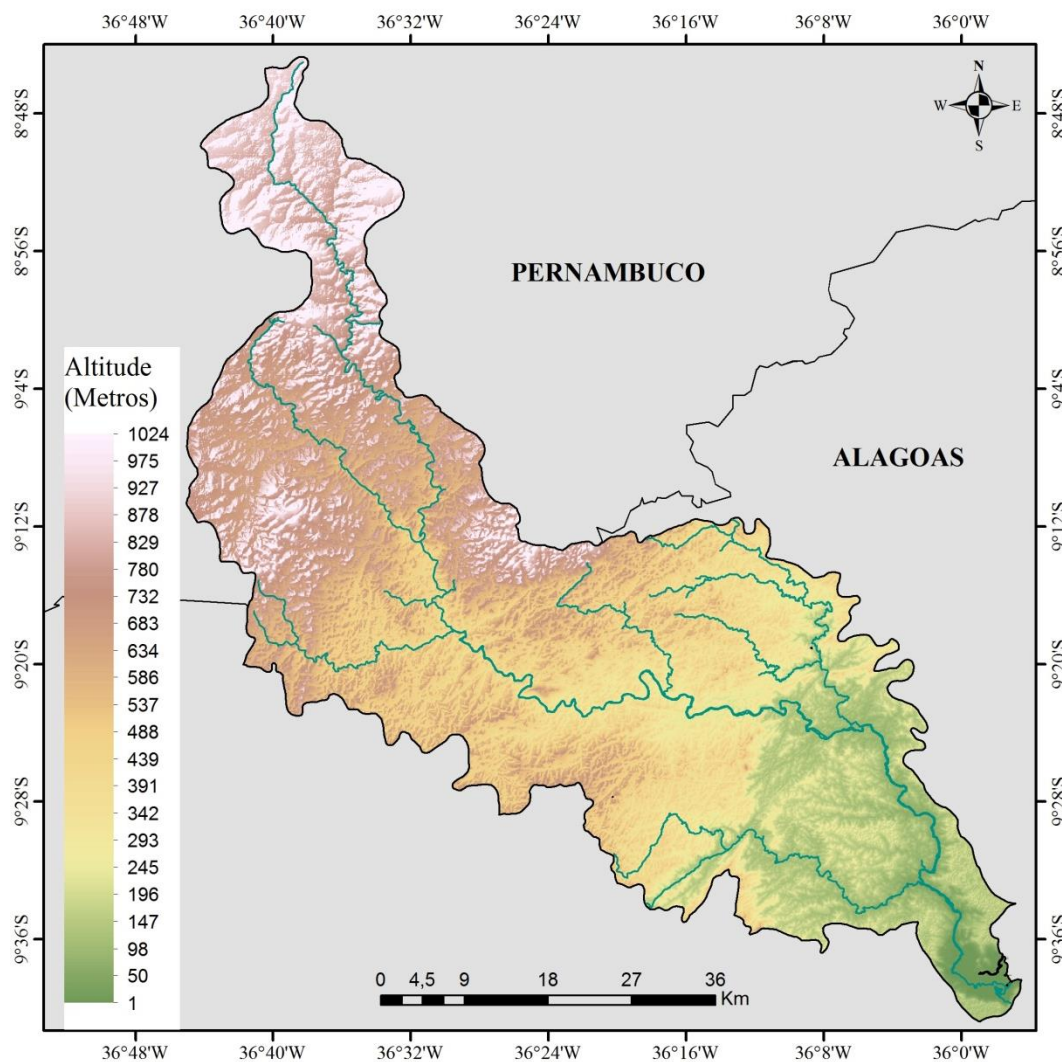


Fonte: Autor (2015).

4.1.1 Relevô

A bacia hidrográfrica do rio Paraíba do Meio é constituída basicamente por duas estruturas geológicas, uma cristalina, localizada a montante da bacia (Pernambuco-Alagoas) e a outra sedimentar, localizada mais ao sul da região da bacia (RODRIGUES, 2012). Essa composição geológica impõe um comportamento topográfico bastante irregular, principalmente no seu alto curso. A altimetria da região (Figura 5) mostra valores que variam de 1 a 1.024 metros de altura, com um relevo mais suave na região dos Tabuleiros Costeiros, Planície Flúvio-Lagunar e relevo com características altimétricas bem acentuadas, com valores em torno dos 1.024 metros de altitude nas regiões do Planalto da Borborema, na porção norte da bacia.

Figura 5 – Altimetria da bacia do rio Paraíba do Meio.



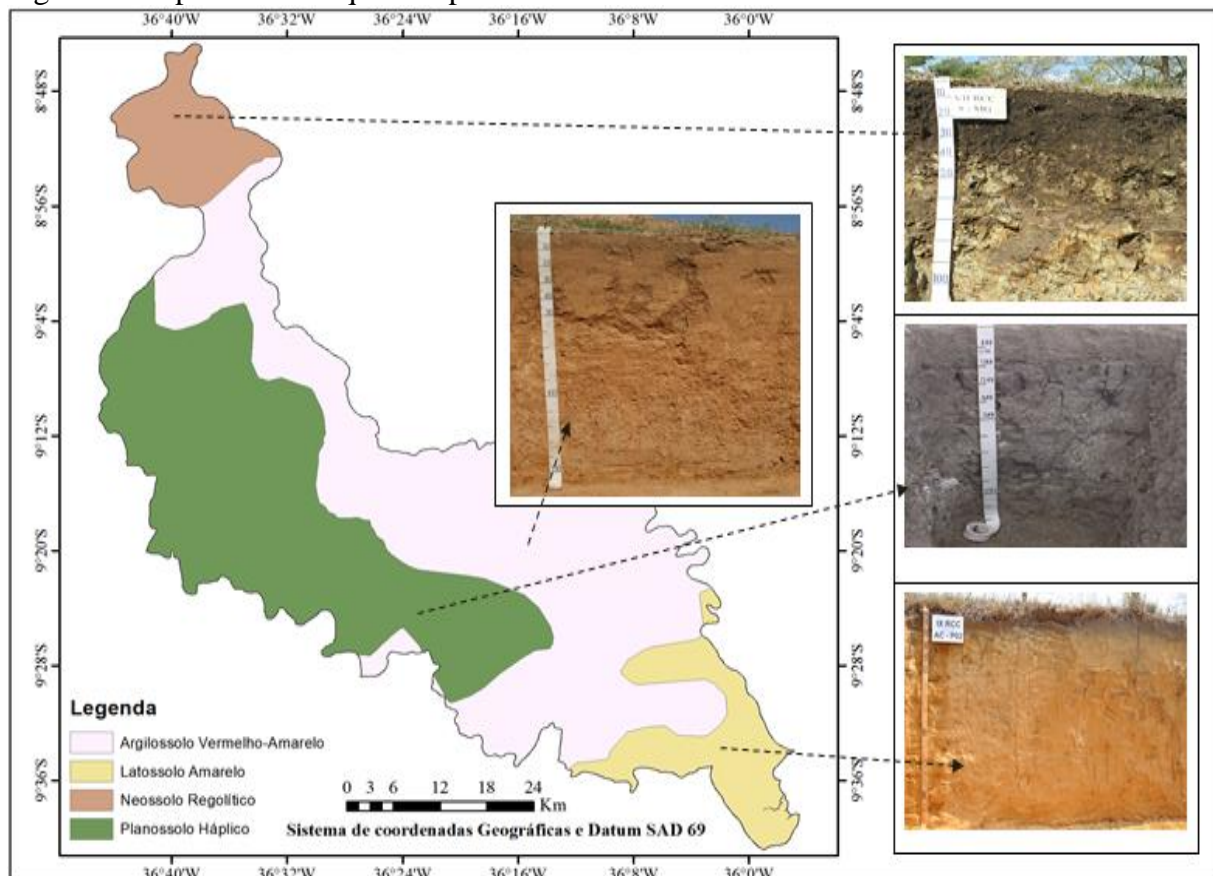
Fonte: Autor (2015).

4.1.2 Tipos de Solos

A estrutura geológica de um solo e as atividades desenvolvidas sobre ele são alguns dos fatores que influenciam diretamente a capacidade de infiltração, armazenamento e escoamento superficial em uma bacia hidrográfica.

Segundo a Divisão de Processamento de Imagens (DPI) do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), quatro são os tipos de solos que compõem a estrutura geológica da bacia do rio Paraíba do Meio: Neossolo Regolítico, Argilossolo Vermelho-Amarelo, Planossolo Háptico e Latossolo Amarelo (Figura 6).

Figura 6 – Tipos de solos que compõem a bacia do rio Paraíba do Meio.



Fonte: Autor (2015).

4.1.2.1 Argissolos Vermelho-Amarelos

Os argissolos vermelho-amarelos caracterizam-se por apresentarem gradiente textural, com nítida separação entre horizontes quanto à cor, estrutura e textura. São profundos a pouco profundos, moderadamente a bem drenados, com textura muito variável,

mas com predomínio de textura média na superfície, e argilosa em subsuperfície, com presença ou não de cascalhos. Apresentam porosidade total baixa a média e densidade aparente com valores compreendidos entre 1,32g e 1,63g/cm³. Essa unidade geomorfológica, quando corresponde aos Níveis Cristalinos que antecedem o Planalto da Borborema, em que o relevo é caracterizado como forte ondulado e montanhoso, é utilizada principalmente para pastagem e reflorestamento (LIMA *et al* 2008). Já, quando localizados em áreas de relevo plano e suavemente ondulado, esses solos podem ser usados para diversas culturas, como a cana-de-açúcar, agricultura dominante na bacia do rio Paraíba do Meio. Segundo Sartori *et al* (2005), esse tipo de solo pertence ao grupo hidrológico de solo B, por apresentar textura arenosa/média, média/argilosa, que não apresentam mudança textural abrupta.

4.1.2.2 Latossolo Amarelo

O tipo de solo latossolo amarelo caracteriza-se por ser um solo profundo/muito profundo, com predominância de textura média, baixa relação textural e pouca diferenciação entre os horizontes. Desenvolvido de material argiloso ou areno-argiloso sedimentares da formação de barreiras na região litorânea do Brasil, apresenta boas condições físicas de retenção de umidade e boa permeabilidade, sendo intensivamente utilizado para culturas de cana-de-açúcar e pastagens; e em menor escala, para cultivo de mandioca, abacaxi, coco da baía e citros e grandes áreas de reflorestamento com eucalipto. Nota-se sua ocorrência no relevo plano ou suavemente ondulado, sendo favorável à mecanização agrícola e não favorecendo a erosão; mas os problemas de compactação limitam a utilização desse solo. O enraizamento é limitado em profundidade por ser álico ou distrófico, e também devido à elevada coesão dos agregados, pois o solo é muito duro ou extremamente duro no estado seco. Segundo Sartori *et al* (2005), o Latossolo Amarelo pertence ao grupo hidrológico A, por apresentar características de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade.

4.1.2.3 Neossolos Regolíticos

Os Neossolos Regolíticos são caracterizados por uma textura arenosa, com pequena variação ao longo do perfil. Tais solos apresentam horizontes A e C, pouco desenvolvidos, medianamente profundos ou profundos e, com valores superiores a 4% de minerais primários de fácil intemperização nas frações areia ou cascalho.

Em sua distribuição geográfica, é comum na região Nordeste do Brasil, principalmente no semiárido e agreste nordestino; são solos bastante cultivados com algodão mocó, sisal e abacaxi; e ainda culturas de subsistência como milho, feijão, mandioca, extensos plantios de tomate, pastagens e espécies frutícolas (SILVA *et al*, 2013). Segundo Sartori *et al* (2008), esse tipo de solo se enquadra no grupo hidrológico B.

4.1.2.4 Planossolo Háplico

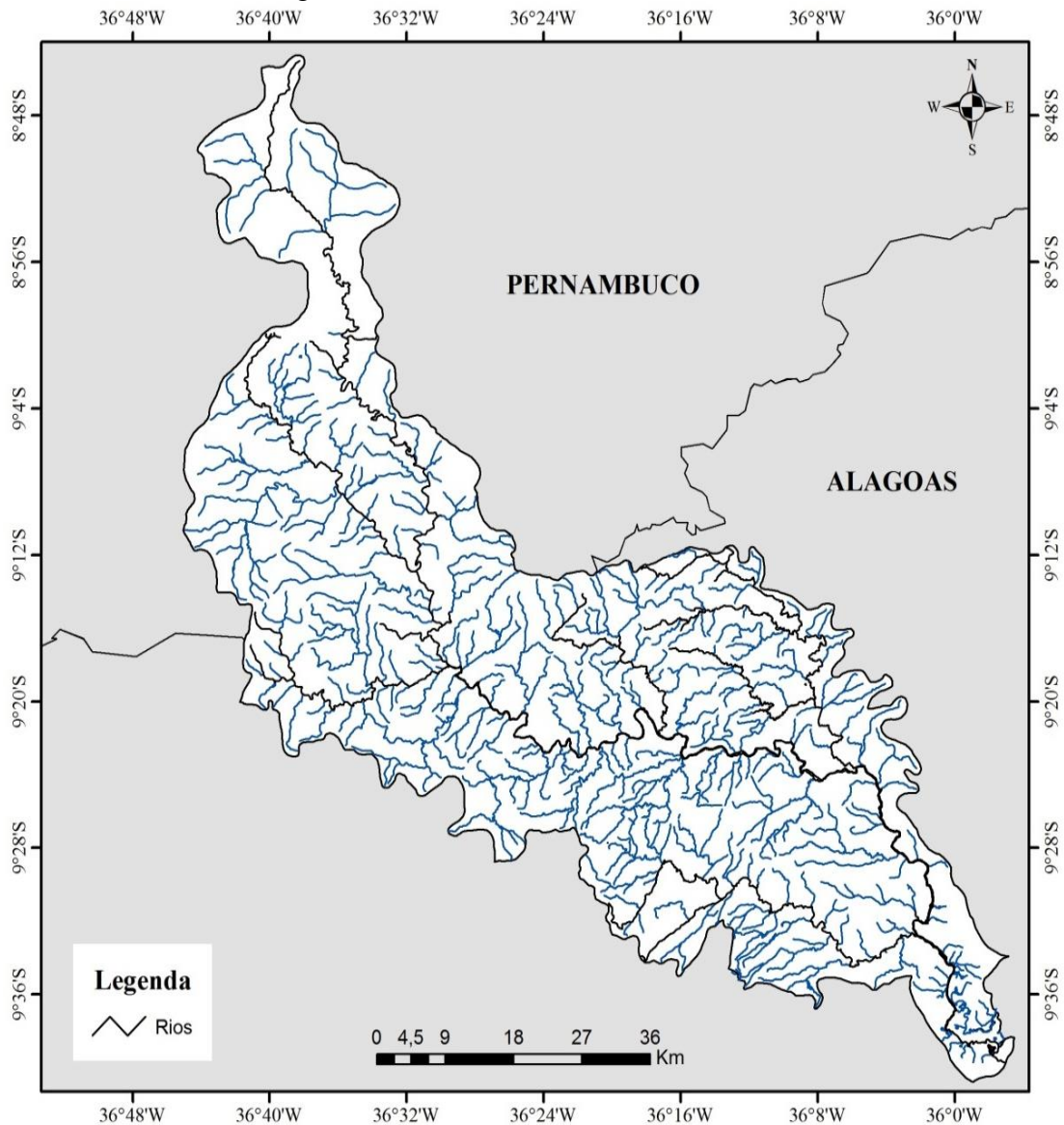
Os Planossolos Háplicos compreendem solos minerais, com horizontes superficiais ou subsuperficiais eluviais, de textura média/argilosa, ocorrendo em relevo suave ondulado, com vertentes longas de pequena declividade e vales normalmente abertos, os quais ocupam as cotas mais baixas de uma região. São solos rasos que apresentam saturação por sódio, com permeabilidade lenta ou muito lenta, responsável pela detenção do lençol d'água sobreposto (suspenso), de existência periódica e presença variável durante o ano, com ligeiro encharcamento durante o período chuvoso e extremo ressecamento e endurecimento na época seca. Por esses motivos, são naturalmente desfavoráveis ao crescimento de plantas arbóreas. As caatingas são características desse tipo de solo por serem formadas por espécies pouco diversificadas, espaçadas e/ou agrupadas em pequenos bosques. Segundo Sartori *et al* (2008), esse tipo de solo se enquadra no grupo hidrológico (D).

4.1.3 Rede Hidrográfica

O rio Paraíba do Meio nasce na cidade de Bom Conselho no estado de Pernambuco, a cerca de 800 metros de altitude, e deságua no Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM), no litoral do estado de Alagoas, na cidade do Pilar. Com direção noroeste-sudeste, apresenta uma extensão média de 172km, com 73,6% de sua extensão no estado de Alagoas e 26,4% em Pernambuco, apresentando um regime fluvial perene.

O sistema de drenagem da bacia do rio Paraíba do Meio é constituído pelo rio principal (rio Paraíba do Meio) e um grande número de afluentes, formando um grande complexo de drenagem hidráulica (Figura 7). Segundo Medeiros (2002), os rios e riachos de pequeno porte dessa bacia apresentam um regime de enxurrada durante a estação chuvosa.

Figura 7 – Sistema de drenagem da bacia do rio Paraíba do Meio.

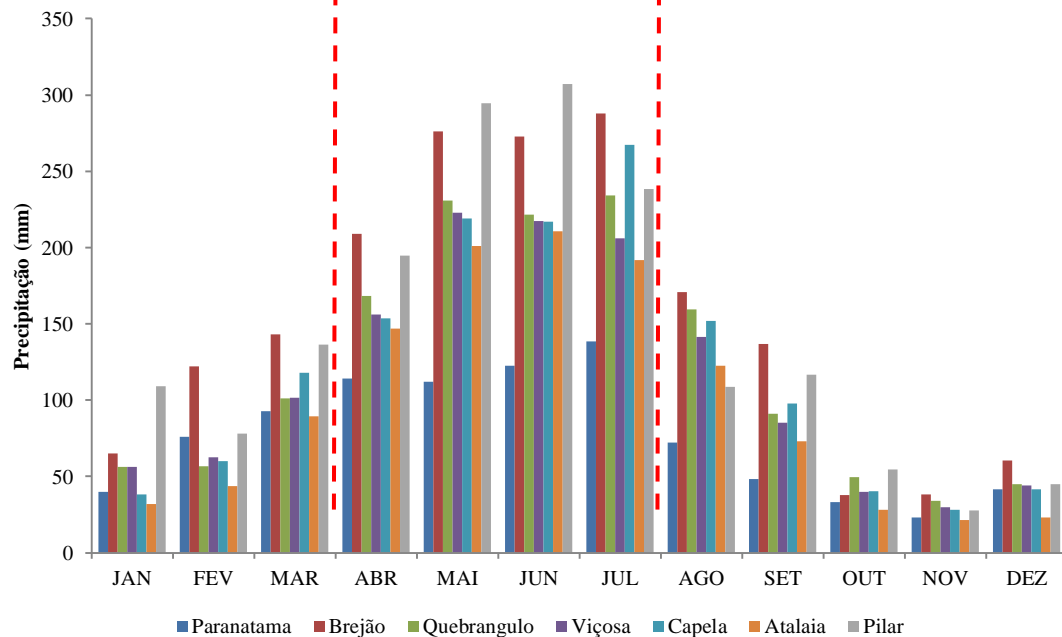


Fonte: Autor (2015).

4.1.4 Características Pluviométricas da Região

Geograficamente, a bacia do rio Paraíba do Meio está localizada na região leste do Nordeste Brasileiro (NEB). O período chuvoso predominante nessa região está concentrado no quadrimestre abril, maio, junho e julho (AMJJ) (Figura 8), representando um total de 60% do acumulado anual das precipitações nessa região (RÃO *et al*, 1993). Os máximos de precipitações acumuladas nesse período variam entre 700mm a 1.300mm em média, aumentando do interior para a costa litorânea (VITORINO *et al*, 1997).

Figura 8 – Climatologia regional da bacia do rio Paraíba do Meio. As cidades estão dispostas a montante (Esquerda) e a jusante (Direita).



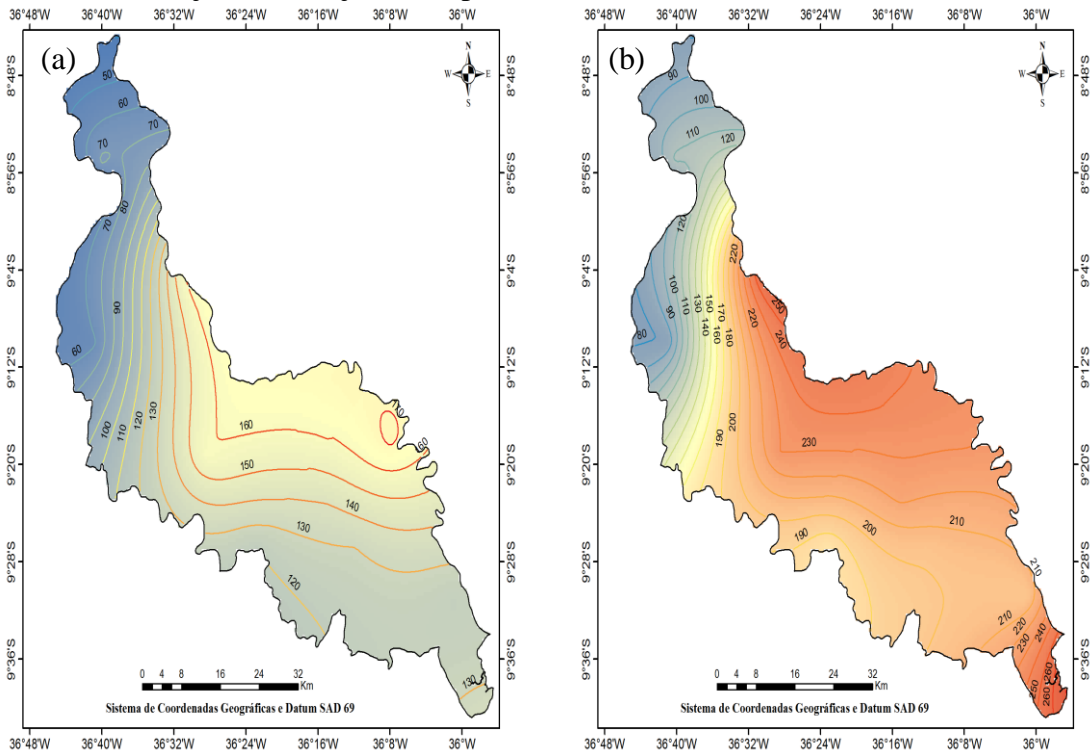
Fonte: Autor (2015).

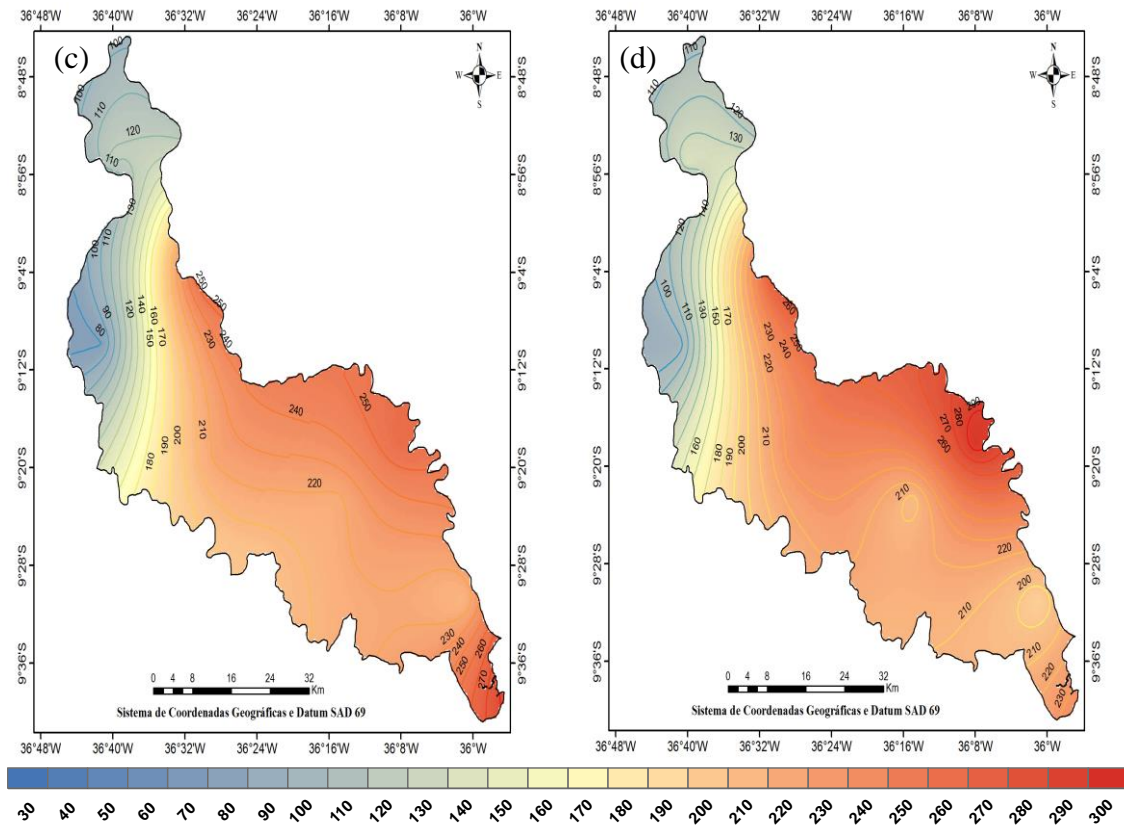
Quanto aos mecanismos produtores de chuvas no leste do NEB, região onde está localizada a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio, citam-se as frentes frias ou remanescentes destas (KOUSKY, 1979), ondas de leste (YAMAZAKI; RAO, 1977; CHOU, 1990; ESPINOZA, 1996), VCANs (KOUSKY; GAN, 1981; GAN; KOUSKY, 1986), CCMs (ALVES, 2001) e Perturbações Ondulatórias nos Ventos Alísios (SILVA *et al*, 2011).

Além dos mecanismos produtores de tempo no leste do NEB, sabe-se que o clima é bastante suscetível às alterações nos padrões de pressão atmosférica e TSM, os quais ocorrem na bacia do oceano Pacífico e Atlântico. Dessa forma, o regime pluviométrico dessa região sofre variações em função da atuação dos fenômenos de interação oceano-atmosfera que atuam nessas bacias. Esses fenômenos são descritos na literatura como: El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e Dipolo do Atlântico. Segundo Kane (2000), a variabilidade da precipitação sobre o Nordeste e leste do NEB está associada aos fenômenos ENOS, como as secas prolongadas e estações chuvosas mais intensas. Para Moura *et al* (2009), o Dipolo do Atlântico mostra uma maior correlação entre as chuvas no leste do NEB que o fenômeno ENOS. Contudo, ambos os fenômenos com maior ou menor intensidade apresentam sua influência e intensidade das chuvas precipitadas nessa região. Segundo Silva *et al* (2012), a região do Leste do NEB se caracteriza por apresentar de 70 a 120 dias de chuvas, durante todo ano, o que gera um acumulado médio anual de 1.300mm.

A Figura 9 apresenta uma espacialização média das precipitações no quadrimestre chuvoso na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio. Consta-se que os valores precipitados se concentram com maiores intensidades na região leste da bacia, enquanto que os menores valores são observados na porção noroeste. Verifica-se também que o mês de julho (Figura 9d) é o mês que apresenta os valores precipitados mais elevados.

Figura 9 – Período chuvoso (Média mensal em mm) da bacia do rio Paraíba do Meio, (a) abril, (b) maio, (c) junho e (d) julho, respectivamente.



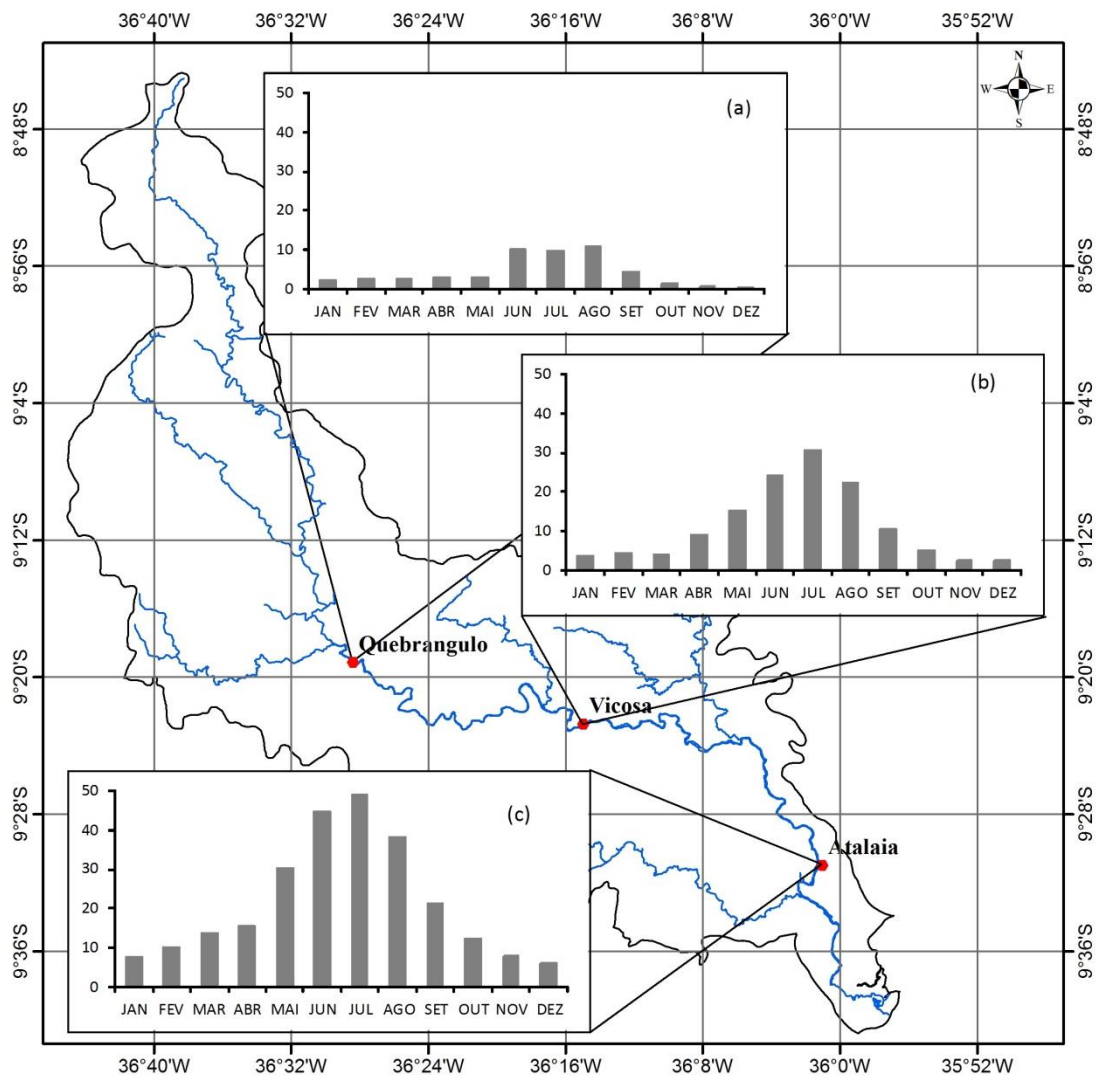


Fonte: Autor (2015).

4.1.5 Regime das Vazões do rio Paraíba do Meio

O conhecimento do regime hidrológico de uma bacia determina, de maneira concisa, o planejamento e a gestão desse recurso. Os dados de vazões, além de fornecerem informações para as ações nos planejamentos agrícolas, fornecem elementos para formulações dos planos de contingências, no objetivo de minimizar os possíveis danos causados por cheias e inundações nas cidades às margens do rio. Nesse contexto, a Figura 10 apresenta o regime médio das vazões no rio Paraíba do Meio em três pontos distintos, cidade de Quebrangulo, Viçosa e Atalaia. Como se constata, o rio apresenta um regime perene ao longo do ano, com uma nítida sazonalidade das vazões médias entre o período seco e chuvoso. O mês de julho apresenta-se como o mês com maior volume escoado, enquanto o mês de dezembro o menor. Esses dois extremos têm proporcionado ao longo da história da região problemas considerados no que tange às secas e inundações.

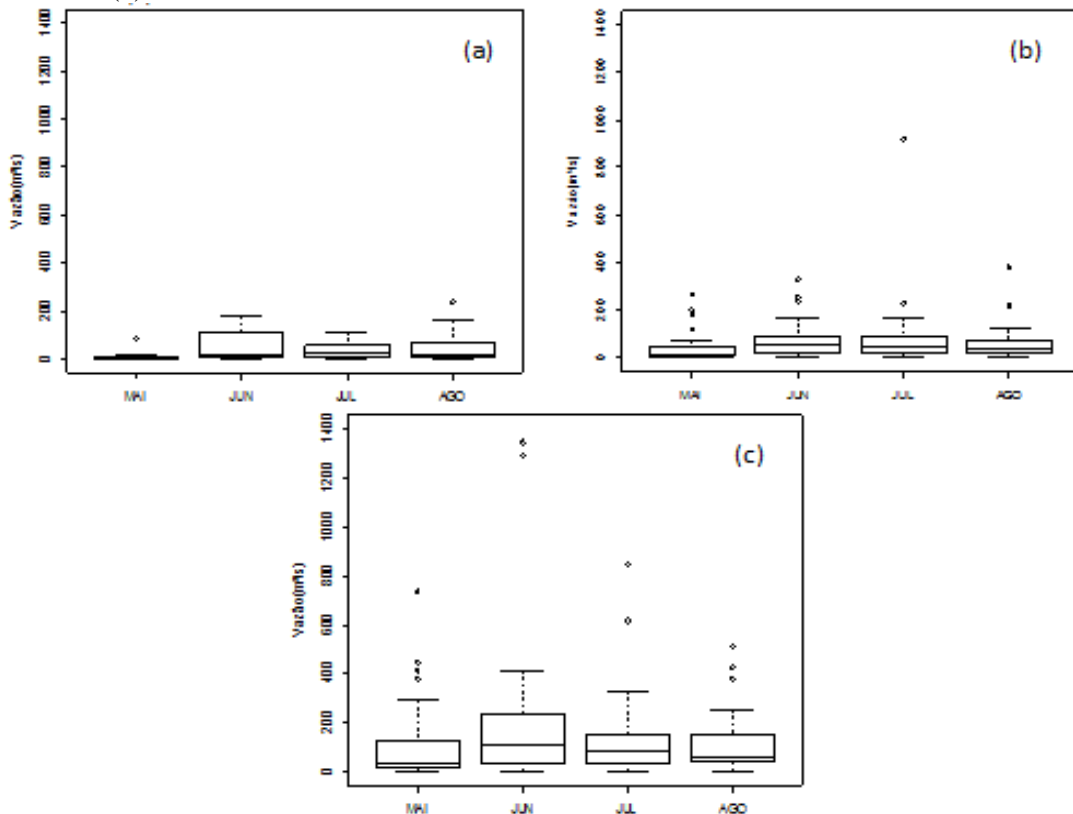
Figura 10 – Regime climatológico das vazões (m^3/s) na bacia do rio Paraíba do Meio. Posto Quebrangulo (a), Viçosa (b) e Atalaia (c). Os gráficos estão ordenados da montante para a jusante.



Fonte: Autor (2015).

No que tange aos valores máximos escoados no rio Paraíba do Meio, o quadrimestre maio, junho, julho e agosto (Figura 11) é o período em que são registrados os maiores picos de vazões, com valores próximos aos $1400m^3/s$ (Figuras 11b e 11c). Eventos como esses têm proporcionado prejuízo e medo à população que vive nas cidades às margens do rio Paraíba do Meio. Atalaia, penúltima cidade da bacia, no sentido montante a jusante (Figura 11c), devido a sua localização, tem registrado grandes inundações em sua história. Como exemplos, citam-se os eventos de inundações ocorridos em 13 de julho de 1989.

Figura 11 – Vazões máximas na bacia do rio Paraíba do Meio. Posto Quebrangulo (a), Viçosa (b) e Atalaia (c).



Fonte: Autor (2015).

4.1.6 Vegetação

A cobertura vegetal representa um dos principais fatores que influenciam diretamente o processo de escoamento superficial, reduzindo a velocidade da água no solo, uma vez que se torna um obstáculo. Ela também funciona como um sistema complexo de sustentação mecânica do solo, permitindo diminuir a quantidade de água que escoar na superfície do solo (TEIXEIRA; MISRA, 1997). Outra contribuição da vegetação são as raízes mortas que favorecerem a existência de canais no solo (drenagem) onde a água pode infiltrar, de modo a diminuir a quantidade de água que escoar na superfície. Nesse contexto, a vegetação na bacia do rio Paraíba do Meio apresenta propriedades distintas em função do relevo e de sua localização geográfica. Rodrigues (2012) descreve que a região conserva características de vegetação do agreste e zona da mata, com alguns vestígios de caatingas e da mata Atlântica. Contudo, após a década de 1980, depois da implantação do PROÁLCOOL, essa paisagem foi dando lugar à monocultura da cana-de-açúcar e, atualmente, é a paisagem que predomina na região.

4.1.7 Características Morfológicas da Bacia

O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é função de suas características morfológicas, ou seja, área, forma, topografia, geologia, solo, cobertura vegetal, sinuosidade do rio, declividade, drenagem, entre outras. A fim de entender as interações existentes entre esses fatores e os processos hidrológicos da bacia do rio Paraíba do Meio, torna-se necessário expressar as características da bacia em termos quantitativos. Dessa forma, serão apresentados neste tópico os principais fatores morfológicos que influenciam no processo de escoamento superficial como o Fator de Forma, Sinuosidade, Densidade de Drenagem e Declividade média, além do Tempo de Concentração.

Segundo Horton (1932), o fator de forma (K_f) avalia a tendência a picos de enchentes de uma bacia hidrográfica, o qual é definido pela razão entre a área da bacia (A) em km^2 e o quadrado do comprimento do rio principal (L), em km (Equação 1).

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (1)$$

Para Mansikkaniemi (1970), a sinuosidade (Sin) de um curso d'água é um fator controlador da velocidade do escoamento de um rio, e é definida pela relação entre o comprimento do rio principal (L) em km e o comprimento do talvegue (L_t) em km (Equação 2). Segundo Marcuzzo *et al* (2012), o índice de sinuosidade possui cinco classes, divididas conforme a Tabela 1.

$$Sin = \frac{100 \cdot (L - L_t)}{L} \quad (2)$$

Tabela 1 – Índices de sinuosidade divididos por classes.

Classe	Descrição	Limites (%)
I	Muito Reto	< 20
II	Reto	20 – 29,9
III	Divagante	30 – 39,9
IV	Sinuoso	40 – 49,9
V	Muito Sinuoso	≥ 50

Fonte: Marcuzzo *et al* (2012).

A densidade de drenagem (D_d) é um índice que fornece uma indicação da eficiência da drenagem da bacia. Segundo Horton (1945), o índice é definido como relação entre o somatório dos comprimentos de todos os canais da rede e a área da bacia (Equação 3), em que D_d é a densidade de drenagem, L_t é comprimento total dos rios ou canais existentes na bacia (km) e A área da bacia.

$$D_d = \frac{L_t}{A} \quad (3)$$

A declividade (D_{cli}) de uma bacia hidrográfica tem uma relação importante e complexa entre alguns parâmetros de uma bacia como a infiltração, o escoamento superficial, a umidade do solo e a contribuição de água subterrânea. Esse parâmetro é um dos fatores mais importantes de uma bacia hidrográfica, pois ele controla o tempo do escoamento superficial e da concentração da chuva, e expressa, assim, uma importância direta em relação à magnitude das enchentes.

Esse parâmetro é definido como a razão entre a diferença de cotas e o comprimento do talvegue (Equação 4), em que D_{cli} (m/m) é a declividade, Cot_b (m) é a cota no ponto mais distante, Cot_a (m) é a cota no ponto da seção definida e L_t (m) o comprimento do talvegue entre os pontos a e b .

$$D_{cli} = \frac{Cot_b - Cot_a}{L_t} \quad (4)$$

Quanto ao Tempo de Concentração (T_c), sua importância se manifesta no desenvolvimento de Hidrogramas de cheias e nas estimativas de vazões de pico. O tempo de concentração é definido como o tempo necessário para a água precipitada no ponto mais distante na bacia deslocar-se até uma seção definida.

Nesta pesquisa, adotou-se a formula de Temez (1978), definida pela Equação 5, em que T_c é o tempo de concentração (h), I é a de declividade média do curso de água principal da bacia (m/m) e L o comprimento do curso de água principal da bacia (km).

$$t_c = 0,3 \cdot \left(\frac{L}{I^{0,25}} \right)^{0,76} \quad (5)$$

Para o cálculo do tempo de retardo (ou tempo de resposta) ($t_r = \text{lag time}$), foi utilizada a relação Gray (1970) (Equação 6), em que t_r é o tempo de retardo e t_c o tempo de concentração.

$$t_c = \frac{t_r}{0,6} \quad (6)$$

Diante dos valores calculados e demonstrados pelos indicadores morfológicos da bacia, foi possível determinar as principais características morfométricas dessa região como: bacia alongada ($K_f = 0,192$); rio sinuoso ($\text{Sin} = 41,61\%$) com baixa densidade de drenagem ($D_d = 1,13\text{km/km}^2$) e declividade média igual a $0,0076\text{m/m}$.

4.2 Descrição da modelagem utilizada

Diante do histórico apresentado na revisão literária nesta pesquisa, optou-se por adotar o modelo atmosférico WRF para simulação da precipitação horária e o modelo hidrológico HEC-HMS para simulação de vazão, com o propósito de um acoplamento unidirecional (*off-line*) entre os modelos, na perspectiva do desenvolvimento de um sistema de previsão hidrológica a curto prazo para bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio, localizada entre os estados de Pernambuco e Alagoas.

4.2.1 Modelo WRF

Nesta pesquisa, adotou-se o modelo de mesoescala WRF na sua versão 3.4 para simulação de chuva na bacia do rio Paraíba do Meio. A utilização do modelo WRF se justifica com base em algumas características importantes como: ser um modelo de acesso livre (<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users>), e ser uma das ferramentas de previsão meteorológica regional mais difundidas do mundo (SKAMAROCK *et al*, 2008), além de ser largamente utilizada em estudos envolvendo acoplamento entre modelos meteorológicos e hidrológicos no Brasil. Outra razão para tal escolha, baseia-se no fato de o Laboratório de Modelagem Atmosférica (LABMODEL) do Instituto de Ciências Atmosférica (ICAT) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) manter, desde 2010, um sistema de previsão de tempo operacional baseado no modelo WRF (http://www.icat.ufal.br/laboratorio/modelagem_atmosferica/).

O modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) é um sistema de modelagem numérica da atmosfera de última geração, desenvolvido por vários centros de investigação e agências governamentais dos Estados Unidos como o Centro Nacional de Pesquisas Atmosféricas (NCAR), Divisão de Meteorologia de Meso e Microescala (MMM), a Administração Nacional de Oceanos e Atmosfera (NOAA), o Centro Nacional de Previsão do Meio Ambiente (NCEP), o Laboratório de Pesquisa Naval (NRL), o Centro de Análise e Previsão de Tempestades (CAPS) da Universidade de Oklahoma nos EUA, e a Administração Federal de Aviação (FAA), também nos EUA, com a participação de outros cientistas (SKAMAROCK *et al*, 2005).

Esse modelo é tido como um instrumento flexível e portátil, que pode ser executado em várias plataformas computacionais, além de oferecer uma diversidade de opções de esquemas paramétricos. O WRF representa o estado da arte de modelos de simulação atmosférica de mesoescala. O modelo possui dois núcleos dinâmicos de processamento: o ARW (*Advanced Research WRF*) e o NMM (*Nonhydrostatic Mesoscale Model*). O NMM foi desenvolvido pelo NCEP a partir do modelo operacional hidrostático ETA, o ARW foi desenvolvido a partir do MM5 e é mantido pelo NCAR. O ARW utiliza as equações não hidrostáticas de Euler para caracterizar as propriedades conservativas do fluido. As equações são formuladas usando as coordenadas verticais de pressão hidrostática (LAPRISE, 1992) que acompanham o relevo (η), malha do tipo Arakawa C, esquema de integração no tempo do tipo *Runge-Kutta* de terceira ordem, esquema de advecção de quinta e terceira ordem nas direções horizontal e vertical e as equações de fluxo no espaço cartesiano para incluir o efeito da umidade na atmosfera.

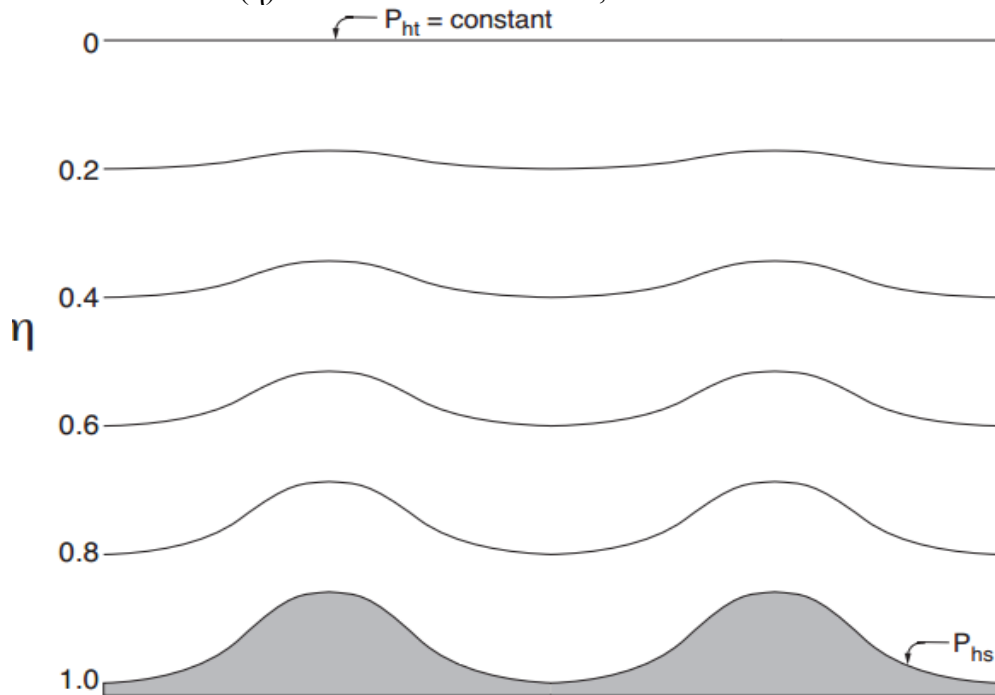
4.2.1.1 Coordenadas verticais

O modelo WRF utiliza em sua estrutura o sistema de coordenadas verticais denominado eta (η) representado na Figura 12. Nesse sistema, cada nível é representado por um valor médio para a parcela entre as duas superfícies, descrito pela coordenada (η), e não um valor sobre a superfície (OLIVEIRA, 2006). Esse valor médio é calculado em relação à componente hidrostática de pressão, proporcional à massa da coluna de ar que se estende desde o nível dado até a fronteira superior do modelo, dividida pela massa em toda a coluna (Equação 7).

$$\eta = \frac{(p_h - p_{ht})}{\mu} \quad (7)$$

Em que $\mu = p_{hs} - p_{ht}$, p_h é a componente hidrostática da pressão, p_{ht} é o valor no topo e p_{hs} o valor na superfície.

Figura 12 – Sistema ETA (η) de coordenadas verticais, utilizada no modelo WRF.



Fonte: Skamarock *et al* (2005).

4.2.1.2 Equações Governantes no WRF

Os cálculos executados pelo núcleo ARW do modelo WRF na estimativa do estado atmosférico são fundamentados em um sistema de equações diferenciais parciais, que controlam o comportamento atmosférico (OLIVEIRA, 2006; ZEPKA, 2011). Essas equações são: Equação da conservação da quantidade do movimento (8, 9 e 10), Equação da conservação da massa (11), Equação geopotencial (12), Equação de conservação da temperatura potencial e outros campos escalares (13 e 14), Relação hidrostática (15), Equação do estado, diagnóstica, para uma parcela de ar úmida (16).

Equações da conservação da quantidade do movimento:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} U + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (Uu) + \frac{\partial}{\partial y} (Vu) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega u) + \left(u_d \alpha \frac{\partial}{\partial x} p' + u_d \alpha' \frac{\partial}{\partial x} \bar{p} \right) \\ + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(u_d \frac{\partial}{\partial x} \phi' + \frac{\partial}{\partial \eta} p' \frac{\partial}{\partial x} \phi - u_d \frac{\partial}{\partial x} \phi \right) = F_U \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} V + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (Uv) + \frac{\partial}{\partial y} (Vv) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega v) + \left(u_d \alpha \frac{\partial}{\partial x} p' + u_d \alpha' \frac{\partial}{\partial y} \bar{p} \right) \\ + \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left(u_d \frac{\partial}{\partial y} \phi' + \frac{\partial}{\partial \eta} p' \frac{\partial}{\partial y} \phi - u_d \frac{\partial}{\partial y} \phi \right) = F_V \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} W + m \left[\frac{\partial}{\partial x} (Uw) + \frac{\partial}{\partial y} (Vw) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega w) \\ - m^{-1} g \left(\frac{\alpha}{\alpha_d} \right) \left[\frac{\partial}{\partial \eta} p' - \bar{u}_d (q_v + q_c + q_r) \right] + m^{-1} u_d g = F_W \end{aligned} \quad (10)$$

Equação da conservação da massa:

$$\frac{\partial}{\partial t} \mu'_d + m^2 \left[\frac{\partial}{\partial x} U + \frac{\partial}{\partial y} V \right] + m \frac{\partial}{\partial \eta} \Omega = 0 \quad (11)$$

Equação geopotencial:

$$\frac{\partial}{\partial t} \phi' + \mu_d^{-1} \left[m^2 \left(U \frac{\partial}{\partial x} \phi + V \frac{\partial}{\partial y} \phi \right) + m \Omega \frac{\partial}{\partial \eta} \phi - mgW \right] = 0 \quad (12)$$

Equação de conservação da temperatura potencial e outros campos escalares:

$$\frac{\partial}{\partial t} \Theta + m^2 \left[\frac{\partial}{\partial x} (U\theta) + \frac{\partial}{\partial y} (V\theta) \right] + m \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega\theta) = F_{\Theta} \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} Q_m + m^2 \left[\frac{\partial}{\partial x} (Uq_m) + \frac{\partial}{\partial y} (Vq_m) \right] + m \frac{\partial}{\partial \eta} (\Omega q_m) = F_{Q_m} \quad (14)$$

Relação hidrostática:

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \phi' = -\bar{u}_d \alpha'_d - \alpha'_d u'_d \quad (15)$$

Equação do estado, diagnóstica, para uma parcela de ar úmida:

$$p = p_o \left(\frac{R_d \theta_m}{p_o \alpha_d} \right)^\gamma \quad (16)$$

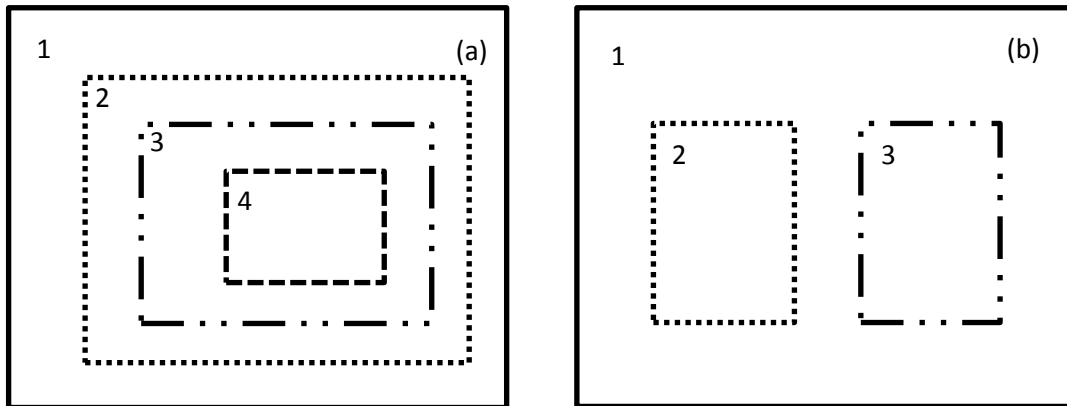
A variável m das equações acima se refere ao fator de mapa que é dado pela razão entre a distância computacional e a distância correspondente à superfície da Terra. α_d é o volume específico do ar seco, Q_m é a soma das razões de mistura para o vapor de água (q_v), chuva (q_c) e gelo (q_i).

4.2.1.3 Aninhamento de grades

Na busca por uma análise mais delineada em uma região de interesse que esteja inserida em um domínio de maior abrangência espacial, é possível fazer um aninhamento de grades. O núcleo ARW do modelo WRF possibilita o aninhamento de um domínio de menor abrangência, com resolução espacial maior, no interior de um domínio de maior abrangência espacial com menor resolução. A vantagem em se utilizar grades aninhadas é ter dados de uma área com uma alta resolução espacial, sem que toda a grade tenha que ser rodada com um Δx menor (ZEPKA, 2011). Dessa forma, os sistemas atmosféricos de larga escala são modelados a partir da grade com menor resolução e vão interagir com os sistemas de

mesoescala resolvidos na grade com maior resolução. A Figura 13 mostra exemplo de possíveis aninhamentos de domínios no WRF.

Figura 13 – Aninhamento de grade permitidos no WRF (aninhamento 1-way (a) e aninhamento 2-way (b)).



Fonte: Skamarock *et al* (2008).

Segundo Bender (2012), há duas opções de aninhamento dos domínios: 1-way e 2-way. Nas duas possibilidades de aninhamento disponibilizadas pelo núcleo ARW do WRF, as condições de contorno do domínio aninhado são interpoladas a partir do domínio principal (Domínio mãe) e são utilizadas para modelar o ambiente das grades menores e de maior resolução espacial. No aninhamento 1-way, as informações são passadas apenas do domínio 1 para o domínio 2. Assim, no exemplo da Figura 13a, o fluxo é de $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$, e, na Figura 13b, o fluxo é de $1 \rightarrow 2$ e $1 \rightarrow 3$. Já no aninhamento 2-way, a solução do domínio 2 substitui o domínio 1 para os pontos de grade que se encontram dentro do domínio com grade fina ao término de cada incremento de tempo do domínio mãe; portanto, ocorre um *feedback* entre as grades dos domínios. Nesta pesquisa, será utilizado o aninhamento do tipo 1-way.

4.2.1.4 Processos Físicos

No âmbito meteorológico, os processos de subgrade de um modelo numérico são representados por esquemas de parametrizações. Esses esquemas estimam os efeitos dos processos físicos, a partir das variáveis resolvidas pelo modelo. No modelo WRF, os principais processos físicos parametrizados são implementados em cinco diferentes blocos: (1) microfísica de nuvens; (2) processos convectivos; (3) trocas e transportes turbulentos na camada limite planetários; (4) processos de radiação e (5) interação solo-superfície (SAKAMOTO, 2009).

4.2.1.5 Esquemas de Microfísica

A microfísica é a parte da modelagem responsável pelas mudanças de fases da água contidas na atmosfera, em sua forma quantitativa, qualitativa e nas distribuições dos hidrometeoros. Os esquemas de microfísica incluem processos de precipitação, nuvens e vapor d'água. Para Skamarock *et al* (2005), os usos dessa parametrização não são apropriados em grades com resolução horizontal superior a 10km, porque os processos envolvidos nas fases mista e do gelo não são bem resolvidos. Entre os principais esquemas de microfísicas disponíveis no modelo WRF, estão: a parametrização de Kessler (1969), que é um esquema simples de aquecimento de nuvem, o qual inclui os processos microfísicos de produção, queda e evaporação da chuva; Lin *et al* (1983), que é um esquema microfísico mais sofisticado que o Kessler, contendo seis classes de hidrometeoros (vapor de água, água de nuvem, chuva, gelo de nuvem, neve e pelotas de gelo) e Thompson (2004), tido como um esquema mais complexo que os dois anteriores. Ele foi desenvolvido para melhorar as previsões de eventos de congelamento de precipitação, utilizando uma representação mais simplificada para representar as seis classes de hidrometeoros.

4.2.1.6 Parametrização de Cumulus

As parametrizações de *Cumulus* são utilizadas na descrição dos processos convectivos, que ocorrem em espaçamento menor que a grade definida. Eles são recomendados para um espaçamento de malha entre 5km a 10km, na qual operam em colunas individuais, fornecendo os perfis verticais de calor, umidade e a componente convectiva da chuva superficial (SANTIAGO, 2009). Abaixo são citados alguns dos principais e mais utilizados esquemas convectivos disponíveis no WRF:

A parametrização de *Kain-Fritsch* (KAIN; FRITSCH, 1993) utiliza um modelo simples de nuvem, com correntes ascendentes e descendentes de umidade e os efeitos de troca com a atmosfera. O esquema paramétrico de BMJ (BETS; MILLER, 1986) apresenta um perfil de convecção profunda, em função do tempo de relaxação das variáveis e da eficiência da nuvem, que é um parâmetro adimensional que caracteriza o regime de convecção. Este esquema tem sido otimizado ao longo dos anos de aplicação operacional no NCEP. Já a parametrização de *Grell 3D* é uma versão otimizada do esquema de *Grell-Devenyi*. Na parametrização de Grell e Devenyi (2002), em cada ponto de grade são rodados múltiplos

esquemas *cumulus*, sendo devolvido para o modelo uma média dos resultados. Os esquemas são todos do tipo fluxo de massa, mas com diferentes parâmetros e eficiência de precipitação. Normalmente, essa parametrização é composta por 144 membros (OLIVEIRA, 2006).

4.2.2 Programa HEC-HMS

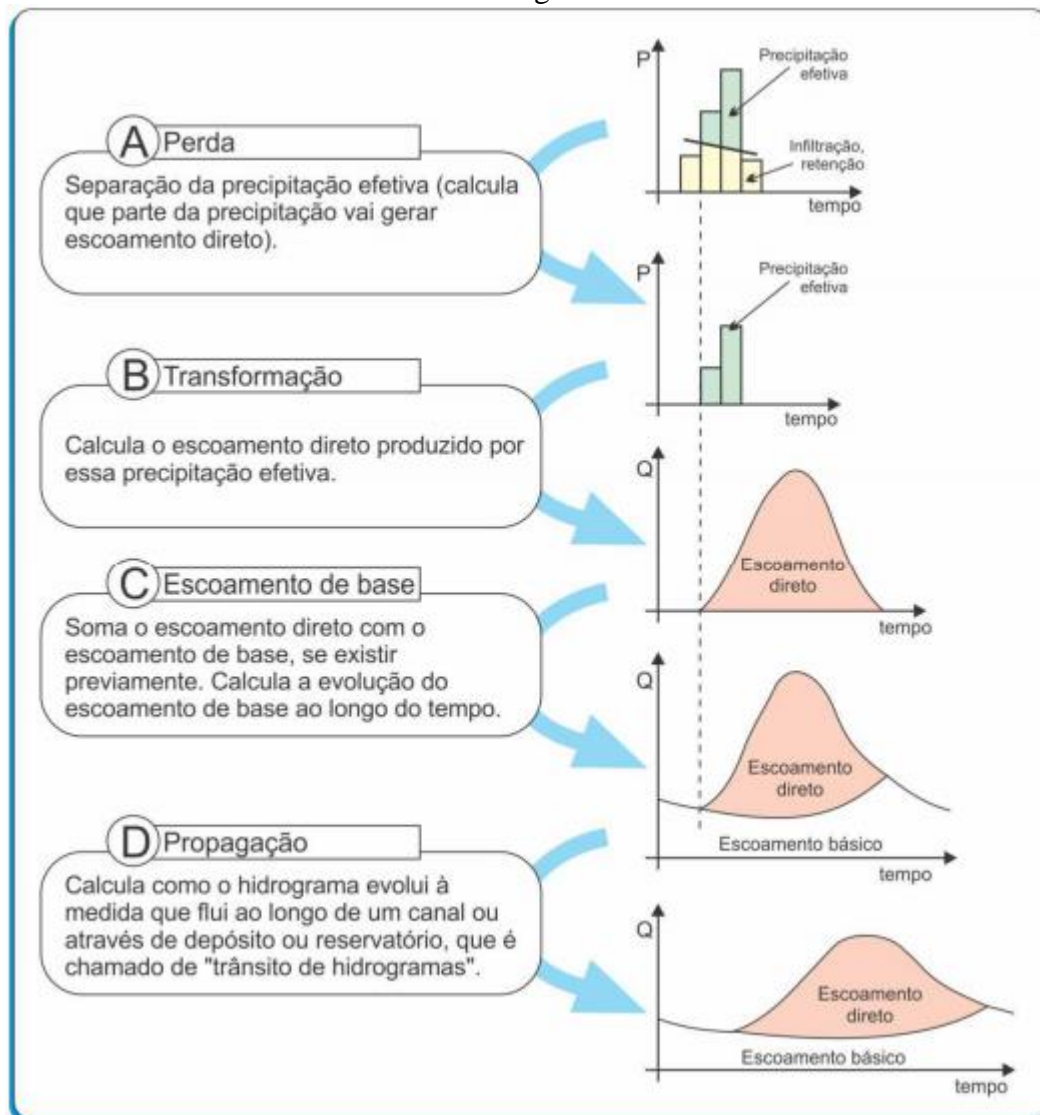
Neste trabalho, optou-se por utilizar o programa HEC-HMS, por ser uma ferramenta de fácil operacionalidade, além de apresentar uma grande quantidade de métodos e parâmetros na formulação de modelos hidrológicos, o que garante um máximo detalhamento das características existentes em uma bacia hidrográfica. O programa HEC-HMS é uma ferramenta de acesso livre aos usuários, disponibilizada pelo Centro de Engenharia Hidrológica (HEC) do Corpo dos Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (*U.S. Army Corps of Engineers*), e por ser um software largamente conhecido e aplicado em estudos hidrológicos (CUNHA, 2004; US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2008).

A plataforma HEC dispõe de módulos hidráulicos e hidrológicos nos processos de simulação, entre os quais se destacam os módulos HEC-RAS – hidráulico e o módulo HEC-HMS – hidrológico.

O Sistema de Modelagem Hidrológica (HMS) é um dos módulos do HEC que possibilita formular vários processos hidrológicos, entre eles, destaca-se o processo de transformação de precipitação em escoamento superficial em sistemas de bacias hidrográficas urbanas e rurais (USACE, 2010).

O HEC-HMS pode simular as cheias para eventos de chuva de curta duração (escala de dias) e de longa duração (escala de anos) (CAMPOS, 2009, p. 102-103). O programa também inclui um pacote de calibração automática para ajustar os seus parâmetros e condições iniciais, dadas às observações das condições hidrometeorológicas. O programa tem sido aplicado na solução de diversos problemas em uma grande variedade de bacias com diferentes características. Ele foi inicialmente desenvolvido para suprir estudos conduzidos pelo próprio *Hydrologic Engineering Center* (HEC), tais como: inundações em centros urbanos, frequência de inundações, perdas por enchentes, e dimensionamento e operação de reservatórios (SING; WOOLHISER, 2002). A Figura 14 apresenta uma esquematização das diversas fases de cálculo do modelo HEC-HMS.

Figura 14 – Fases de cálculo do modelo hidrológico HEC-HMS.



Fonte: Santos, Keyla Almeida (2013).

De acordo com Feldman (2000), os hidrogramas simulados pelo HEC-HMS, a partir de um evento de precipitação, apresentam uma relativa precisão, e uma das vantagens em se utilizar essa ferramenta está na possibilidade de se adotar diferentes combinações de métodos para representar os processos hidrológicos, como interceptação, infiltração e escoamento direto.

O módulo HMS admite que uma bacia hidrográfica seja composta por um grupo de sub-bacias interligadas entre si, e que os processos hidrológicos são representados pelos parâmetros que refletem as condições médias de cada sub-bacia (MILDE *et al*, 2002). Nesse modelo, a representação física de uma bacia hidrográfica é feita utilizando-se as características dos seguintes elementos hidrológicos: sub-bacia, rios, reservatórios, trechos,

junções e depressões, que são conectados entre si, criando uma rede que simulará o processo de escoamento.

O funcionamento do HEC-HMS é condicionado à definição de certos componentes (Gerenciadores) como modelo da bacia, modelo meteorológico, especificação das condições de controle e dados de entrada.

No processamento do HEC-HMS, a princípio, são inseridos os dados físicos da bacia, bem como os dados hidrológicos. Em seguida, são selecionados os métodos para o cálculo das perdas, transformação chuva-vazão, composição do escoamento de base e propagação em rios, considerando-se, desse modo, os parâmetros envolvidos nos métodos, como a área, o tempo de concentração, tempo de resposta e perdas em sumidouros.

Posteriormente, os dados são agrupados nos gerenciadores: a) Gerenciador do Modelo de Bacias – permite discretizar a bacia hidrográfica em uma ou mais sub-bacias, além de definir os processos e elementos hidrológicos associados a cada sub-bacia como características físicas da bacia, perda da precipitação, transformação em escoamento superficial e propagação da vazão; b) Gerenciador do Modelo Meteorológico é a parte responsável por definir os modelos meteorológicos que representam a forma da chuva e as estações pluviométricas utilizadas; c) Gerenciador de Especificação de Controle é utilizado para especificar o período do evento simulado e o intervalo de cálculo a ser empregado pelo modelo na formulação dos resultados; d) Gerenciador de Séries de Dados Temporais – agrega os valores pluviométricos e fluviométricos.

Os elementos hidrológicos constam em três métodos de cálculos que devem ser associados entre si, na modelagem desejada (Tabela 2). O HEC-HMS disponibiliza sete métodos de transformação, onze métodos de perda por infiltração e cinco métodos de fluxo de base, possibilitando 385 combinações diferentes em cada simulação.

Tabela 2 – Classificação dos métodos de: transformação coluna (X), perda por infiltração coluna (Y) e fluxo de base coluna (Z).

(X) Método de Transformação	(Y) Método de perda por infiltração	(Z) Método de Fluxo de Base
1. Hidrograma Unitário de Clark	1. Constante inicial	1. Bouded Recession
2. Hidrograma Unitário de Snyder	2. Número de Curva SCS (CN)	2. Constant Monthly
3. Hidrograma Unitário de SCS	3. Gridded número de curva SCS	3. Linear Reservoir
4. ModClark	4. Green and Ampt	4. Nonlinear Boussinesq
5. Onda Cinemática	5. Constante déficit	5. Recession
6. User-Specific S-Graph	6. Soil Moisture Accounting (SMA)	
7. User-Specific Unit Hydrograph	7. Gridded SMA	
	8. Exponential	
	9. Gridded Deficit Constant	
	10. Smith Parlange	
	11. Gridded Green and Ampt	

Fonte: Autor, 2015.

Na formulação do modelo hidrológico, foi adotado o método de Número de Curva do SCS (SCS, 1972 e 1986) para calcular as perdas no solo (*Loss Method*) e o método do Hidrograma unitário do SCS (SCS, 1972 e 1986), para a transformação do excedente de precipitação em vazão.

No propósito de alcançar o melhor resultado no processo de calibração do HEC-HMS, a área da bacia do rio Paraíba do Meio foi dividida em quatorze (14) unidades hidrográficas distintas (Figura 15). Strahler (1957) descreve a área de uma região hidrográfica como o parâmetro de maior importância em um estudo hidrológico, já que a maioria das características da bacia está, de alguma forma, correlacionada a sua área. Testes realizados no presente trabalho confirmam a forte influência desse parâmetro sobre os indicadores estatísticos avaliados no modelo.

Figura 15 – Discretização da bacia do rio Paraíba do Meio.



Fonte: Autor (2015).

4.2.2.1 Método de Perdas Iniciais: Número de Curva do SCS (CN)

O HEC-HMS considera como perdas iniciais a quantidade de precipitação necessária para iniciar o processo de escoamento superficial, o qual representa o armazenamento de água pela cobertura vegetal e pelas depressões locais na superfície do solo (MILDE *et al*, 2002).

No método do Número de Curva do SCS (SCS, 1972 e 1986), o cálculo das perdas iniciais é efetuado através do coeficiente adimensional CN, que representa as condições naturais do solo, do tipo de uso, da ocupação e da condição de saturação inicial do solo. O modelo estima o excesso de precipitação através da equação 17.

$$Pe = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S} \quad (17)$$

Em que Pe é a precipitação efetiva ou escoamento acumulado (mm) no instante t ; P é a chuva acumulada (mm) no instante t ; Ia são as perdas iniciais também em mm e S é o potencial máximo de retenção da precipitação (mm). A Equação 17 é válida para $P > Ia$, quando $P \leq Ia$, $Pe = 0$.

A perda inicial (Ia) compreende a água interceptada da precipitação pela vegetação ou retida em depressões do terreno, infiltrada ou evaporada, antes do início do deflúvio. Segundo a SCS, a Ia pode ser representada pela relação demonstrada pela Equação 18 (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2006).

$$Ia = 0,2S \quad (18)$$

Assim a precipitação efetiva pode ser determinada através da Equação 19.

$$Pe = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad (19)$$

Em que o potencial S pode ser calculado pela correlação da estimativa do CN (SCS, 1986), representada pela Equação 20.

$$S = \frac{25400}{CN} - 245 \quad (20)$$

Em que o CN é o número de curva que varia no intervalo de $0 \leq CN \leq 100$, em função do grupo de solo e das condições naturais do solo como tipo e uso do solo, ocupação e condição de saturação inicial do solo, conforme ANEXO A. Quando o número de curva é igual a 100, o armazenamento é nulo.

A equação 19 só é válida quando $P \geq 0,2S$; caso contrário, $P \leq 0,2S$, o modelo admite que não ocorra deflúvio superficial, ou seja, $Q=0$.

4.2.2.2 Método de transformação do Excedente de Precipitação em Vazão: Modelo do Hidrograma Unitário do SCS.

Por meio de uma análise envolvendo um grande número de bacias e de hidrogramas unitários, o Departamento de Conservação de Solo (SCS, 1972) constatou que os hidrogramas unitários expressam uma forte relação entre o tempo e a vazão, estimada com base no tempo de concentração e na área das bacias. Segundo Milde *et al* (2002), esse é um dos modelos mais utilizados em aplicações práticas, devido a sua simplicidade e facilidade de aplicação. Nesse modelo, o tempo de retardo (*lag time*) é tido como o parâmetro necessário para sua formulação. O *lag time* é definido como o intervalo de tempo entre os centros de massa da chuva e do hidrograma (TUCCI, 1993).

Segundo o SCS, o pico do hidrograma unitário (Up) e o tempo da vazão de pico do hidrograma unitário (Tp) podem ser encontrados pela Equação 21.

$$Up = C \frac{A}{Tp} \quad (21)$$

Em que A é a área da bacia hidrográfica em km^2 e C é uma constante de conversão (2.08 para SI). E o Tp pode ser encontrado pela Equação 22:

$$Tp = \frac{\Delta t}{2} + t_{lag} \quad (22)$$

Em que Δt é a duração do excesso de precipitação, t_{lag} é o tempo de retardo (t_r) já definido anteriormente. Quando o t_{lag} é especificado, o HEC-HMS resolve a Equação 22 e consequentemente calcula o tempo de pico e o hidrograma unitário.

Segundo Milde *et al* (2002), o valor do tempo de retardo (t_{lag}) em minutos é dado pela Equação 23:

$$t_{lag} = 0,6 \left[\frac{L_w}{60V_w} \right] \quad (23)$$

Em que L_w é maior percurso do fluxo de água em metros, e V_w é média em m/s.

Para Qaiser e Yuan *et al* (2011), o método de SCS explica que 37,5% do volume de escoamento ocorrem antes do fluxo de pico, e o *lag time* pode ser aproximado, tomando 60% do tempo de concentração (Equação 24).

$$t_{lag} = 0,6 \cdot t_c \quad (24)$$

4.2.2.3 Processo de Calibração de Modelos Hidrológicos

O processo de ajuste denominado calibração é definido como uma técnica de otimização no qual os valores dos parâmetros de um modelo hidrológico são modificados pelo usuário ou através de uma técnica numérica, com o objetivo de encontrar uma compatibilidade entre os valores simulados pelo modelo e os valores observados (BELING, 2013). Para Walesh (1989), a calibração tem o escopo de providenciar estimativas de parâmetros de difícil mensuração, compensar eventuais deficiências na estrutura do modelo e fornecer um indicativo da sensibilidade desse, face à alteração de seus parâmetros. Nesse processo, a estimativa dos parâmetros representativos da bacia modelada é muito importante e está sujeita a alguns problemas. Segundo Beven (2001), ainda que seja possível a determinação da magnitude dos parâmetros de um modelo, o resultado nem sempre é o esperado, havendo discrepâncias entre as séries simuladas e as observadas. O processo de ajuste dos parâmetros de um modelo hidrológico pode se dar de duas maneiras: manual e automática.

Em termos funcionais, calibrar um modelo consiste na variação de seus parâmetros dentro de uma faixa coerente, tratando-se de um processo iterativo, conforme ilustra o esquema da Figura 16.

Figura 16 – Esquema do processo de calibração.



Fonte: Beling (2013).

O método de calibração manual por tentativa e erro (aproximações sucessivas) é uma técnica que consiste num processo iterativo, em que o usuário altera os valores dos parâmetros do modelo a cada tentativa. Dessa forma, o usuário utiliza um conjunto de parâmetros diferente a cada tentativa ao utilizar o modelo hidrológico. A cada tentativa, compara-se visualmente os resultados obtidos com os valores medidos, com o objetivo de verificar se se conseguiu uma melhor representação do sistema (BRAVO *et al*, 2007). Esse processo iterativo prossegue até que o usuário encontre um conjunto de parâmetros para os quais ele considera que os resultados do modelo são os mais apropriados para o processo simulado. De acordo com Fletcher e Ponnambalam (1998), uma das grandes vantagens da calibração manual é permitir que o usuário agregue ao processo sua experiência e conhecimento sobre o modelo. Porém, em função do grande número de vezes que os valores dos parâmetros devem ser modificados, essa abordagem pode não ser recomendada em modelos complexos que envolvem um grande número de parâmetros.

Segundo Sorooshian e Gupta (1995), a calibração automática é um método que busca encontrar um conjunto ótimo dos valores paramétricos de um modelo chuva-vazão com a menor influência do usuário. A experiência do usuário é substituída, em grande parte, por uma técnica iterativa e por uma função objetiva. O escopo da calibração automática é, portanto, minimizar ou maximizar o valor de uma função objetiva, que mede a qualidade do ajuste dos hidrogramas. Esse tipo de ajuste utiliza critérios mais objetivos para definir o final

do processo de calibração quando comparada ao ajuste manual. No presente trabalho, utilizou-se o método por aproximações sucessivas e posteriormente o método automático, para um refinamento final dos parâmetros.

4.2.3. Configuração do Domínio do WRF

Visando estabelecer a configuração de grades que melhor representasse a região em estudo, o modelo WRF foi configurado com três domínios de integração, conforme a Figura 17. O primeiro domínio, o mais externo (D1), foi configurado com 81x81 pontos nas direções xy, com 25km de espaçamento de grade, cobrindo toda a região Nordeste do Brasil; o segundo domínio, aninhado (D2), foi configurado com 91x91 nas direções xy e com espaçamento horizontal entre grades de 5km; por fim, o terceiro e último domínio, aninhado (D3), foi configurado com 151x151 pontos nas direções xy e com espaçamento horizontal entre grades de 1km.

Figura 17 – Posição em projeção Mercator dos três domínios (D1, D2 e D3) do modelo WRF. A grade maior, D1, é representada pela figura inteira e possui espaçamento de 25km entre os pontos de grade. Os domínios D2 e D3 possuem 5km e 1 km de espaçamento entre pontos de espaçamento entre pontos de grades, respectivamente.



Fonte: Autor (2015).

Dentro das possibilidades dos esquemas paramétricos disponibilizados pelo modelo WRF, os domínios foram configurados, usando-se os esquemas paramétricos listados na Tabela 3. Após a configuração, o modelo foi inicializado em 27 de julho de 2011 às 00Z e foi integrado até 31 de julho de 2011 às 00Z totalizando 120h (5 dias) de simulação.

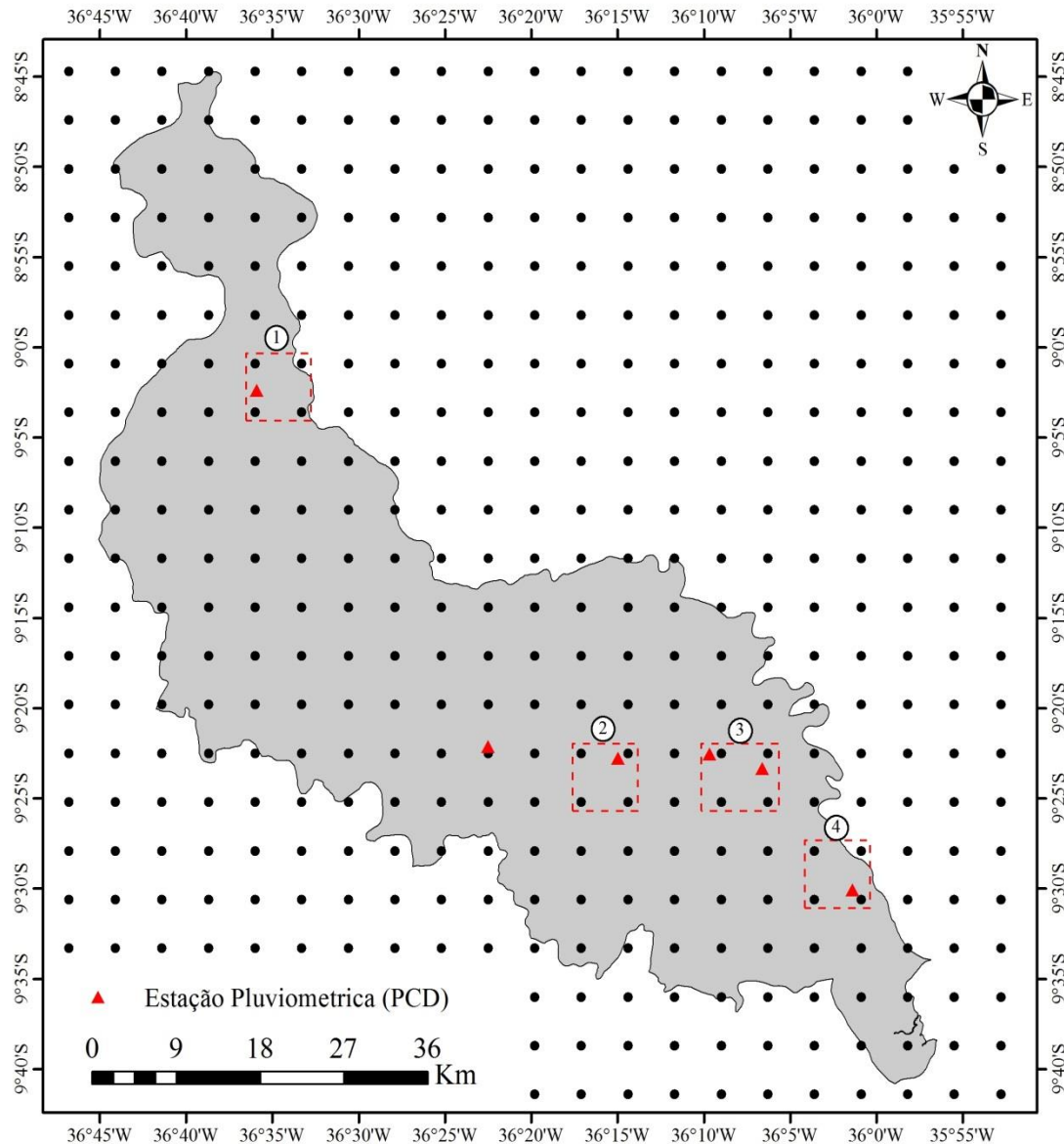
Tabela 3 – Configuração do modelo WRF utilizando-se os esquemas paramétricos.

Configuração	Esquema	Variável	Opção	Referência
Microfísica	Purdue Lin	<i>mp_physics</i>	(2)	Chen <i>et al</i> , 2002; Lin <i>et al</i> , 1983;
Cumulus	Grell 3D	<i>cu_physics</i>	(5)	Grell, 1993.
Camada Limite Superficial	MM5 Similarity	<i>sf_sfclay_physics</i>	(1)	Beljaars, 1994; Zhang <i>et al</i> , 1982.
Camada Superficial do Solo	Unified Noah Land Surface Model	<i>sf_surface_physics</i>	(2)	Tewari, 2004.
Camada Limite Planetária	Asymmetric Convection Model	<i>bl_pbl_physics</i>	(7)	Pleim, 2007.
Radiação Atmosférica	Goddard Shortwave	<i>ra_sw_physics</i>	(2)	Chou, 1994.
	RRTMG Longwave	<i>ra_lw_physics</i>	(4)	Lacono <i>et al</i> , 2008.

Fonte: Autor (2015).

A Figura 18 apresenta a distribuição espacial dos pontos de grade gerados pelo modelo WRF com resolução espacial de 5km por 5km. Entre os pontos gerados, será selecionada a série utilizada na fase de validação do modelo e, posteriormente, a série utilizada na fase de acoplamento dos modelos envolvidos na pesquisa. É interessante notar que as estações (símbolos retangulares com tonalidade vermelha) pluviométricas (PCDs) apresentam uma proximidade relativa aos pontos de grade.

Figura 18 – Distribuição espacial dos pontos de grade do modelo WRF, na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio.



Fonte: Autor (2015).

4.3 Aquisição e Tratamento dos Dados

4.3.1 Séries de precipitação e vazão

Realizou-se um levantamento das estações pluviométricas e fluviométricas na bacia do rio Paraíba do Meio. Foram selecionadas 12 estações (Tabela 4), das quais oito (8) da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), duas (2) do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) e duas (2) a Agência Nacional de Águas (ANA). Entre as estações selecionadas, apenas Viçosa e Atalaia disponibilizam dados de

vazão. As 12 estações são convencionais, e seus registros apresentam uma média de 45 anos de dados brutos, que foram tratados e utilizados no processo de caracterização climática nos limites do vale do rio Paraíba do Meio, no período da quadra chuvosa (abril, maio, junho e julho - AMJJ).

Para as etapas de calibração e validação dos modelos (Atmosférico - WRF e Hidrológico – HEC-HMS), foram utilizadas as séries de dados em escala horária (Tabela 5). Dados coletados em seis Plataformas de Coletas de Dados (PCDs), e disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA), nos sites: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>> e <<http://mapas-hidro.ana.gov.br/Usuario/mapa.aspx>>. A série de precipitação utilizada na fase de configuração (calibração) do modelo WRF apresenta um registro de 120 horas, correspondente ao período de 27 a 31 de julho de 2011, enquanto a série utilizada na fase de validação registra 192 horas, correspondente ao intervalo entre 1 a 8 de junho de 2013. Na calibração e validação do modelo hidrológico formulado no programa HEC-HMS, foi utilizada uma série de vazão com 120 registros (1 a 5 de julho de 2013) na fase de calibração e uma outra série com 192 registros (9 a 16 de Julho de 2013) na fase de validação. Entre as seis PCDs, apenas Viçosa e Atalaia disponibilizam dados de vazão.

Para as sub-bacias sem dados de precipitação, no processo de calibração do modelo hidrológico, foi utilizada a média calculada via método dos polígonos de Thiessen. No cálculo do Thiessen, utilizou-se o *software* SIGA (Sistema de Informação para o Gerenciamento da Alocação de Água), sistema de informação que reúne diversos modelos hidrológicos para dar suporte ao planejamento e gerenciamento de sistemas hídricos. O *software* foi desenvolvido e disponibilizado pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME).

Os dados pluviométricos e fluviométricos utilizados foram inseridos por meio do sistema de armazenamento de dados *Hydrologic Engineering Center Data Storage System* (HEC-DSS). Essa forma de armazenamento de dados facilitou de forma ágil e eficiente a entrada dos dados no modelo. Toda modificação realizada nos dados é automaticamente atualizada nas entradas do modelo, dispensando-se a entrada manual.

A localização geográfica das estações convencionais e automáticas utilizadas neste trabalho pode ser visualizada nas Figuras 19a e 19b, respectivamente.

Tabela 4 – Estações (Pluviômetros) Convencionais utilizadas na caracterização climática da bacia do rio Paraíba do Meio.

Posto	Código	Responsável e Operador	Período	Nº de Anos	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Atalaia/AL	936010	DNOCS	1913 - 1989	75	-9,5166	-36,017	54
Capela/AL	936049	SUDENE	1963 - 1991	29	-9,3	-36,133	170
Viçosa/AL	936111	ANA_CPRM	1913 - 1989	77	-9,3791	-36,249	300
Quebrangulo/AL	936115	ANA	1913 - 1991	79	-9,3191	-36,473	220
Mar Vermelho/AL	936031	SUDENE	1963 - 2000	37	-9,45	-36,383	620
Palmeira dos Índios/AL	936034	SUDENE	1913 - 1985	73	-9,4	-36,65	342
Pindoba/AL	936039	SUDENE	1963 - 1976	13	-9,45	-36,2	190
Bom Conselho/PE	936001	DNOCS	1934 - 1985	52	-9,1666	-36,683	654
Brejão/PE	936003	SUDENE	1963 - 1989	28	-9,05	-36,5	620
Caetés/PE	836008	SUDENE	1962 - 1989	27	-8,783	-36,633	854
Paranatama/PE	836027	SUDENE	1963 - 1989	28	-8,9167	-36,667	830
Saloá/PE	836041	SUDENE	1962 - 1993	31	-8,95	-36,666	850

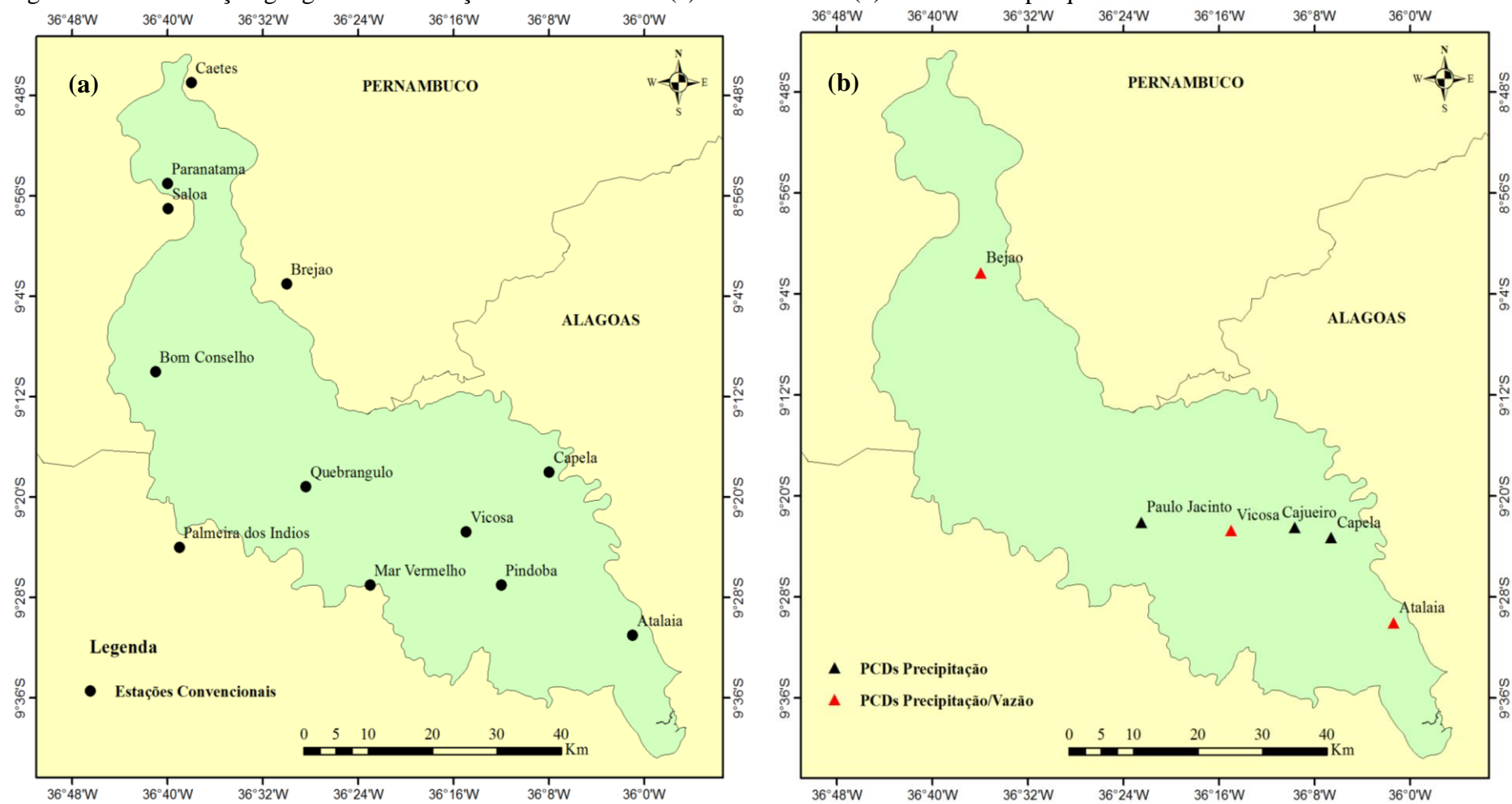
Fonte: Autor (2015).

Tabela 5 – Estações automáticas (PCDs) utilizadas na calibração e validação dos modelos (WRF e HEE-HMS).

Posto	Código	Estação	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Brejão/PE	936111	Pluviométrica	-9 2' 21,84''	-36 35' 53,88''	
Paulo Jacinto/AL	936123	Pluviométrica	-9 22' 7.00"	-36 22' 28.99"	
Viçosa/AL	936119	Pluviométrica	-9 22' 45,12''	-36 14' 57,12''	212
	39710000	Fluviométrico			
Cajueiro/AL	936122	Pluviométrica	-9 22' 31.98"	-36 9' 38.99"	
Capela/AL	936124	Pluviométrica	-9 23' 19.97"	-36 6' 36.00"	
Atalaia/AL	936110	Pluviométrica	-9 30' 4,12''	-36 1' 22,08''	54,14
	39870000	Fluviométrico			

Fonte: ANA.

Figura 19 – Localização geográfica das estações convencionais (a) e automáticas (b) utilizadas na pesquisa.



-Fonte: Autor (2015).

4.3.2 Dados de entrada no modelo WRF

Como condições iniciais e de contorno do modelo atmosférico WRF para a simulação dos eventos em estudo, foram utilizados os dados denominados *Final Operational Global Analysis* (FNL), disponibilizados pelo NCEP em grade regular de 1,0 x 1,0 grau de latitude e longitude, preparados operacionalmente a cada 6h (00h, 06h, 12h e 18h UTC). Os dados do FNL são gerados com o mesmo modelo que o NCEP utiliza para o *Global Forecast System* (GFS); os dados são preparados aproximadamente 1h após a inicialização do GFS. O atraso tem por objetivo verificar o FNL, para saber se ele pode conter mais dados observacionais. Em outras palavras, os arquivos FNL representam uma análise melhorada. A integração do modelo global GFS é feita sempre mais cedo do que o FNL com o objetivo de atender necessidades de previsão operacional (ALMEIDA e MARTON, 2014).

4.4 Avaliações da eficiência dos modelos

Na avaliação do desempenho dos dois modelos empregados nesta pesquisa (hidrológico e meteorológico), foram utilizados cinco critérios estatísticos, cada um avaliando uma característica específica. Para Weber (1982), o uso isolado desses indicadores pode ser uma forma inadequada de avaliar o desempenho de um modelo. Dessa forma, os indicadores Viés, Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), Coeficiente de Determinação (R^2) e o coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (Nash) foram usados na avaliação do modelo HEC-HMS. Para a análise do modelo WRF, foram aproveitados os três primeiros indicadores já citados mais o *Heidke Skill Score* (HSS).

4.4.1 Viés

O indicador Viés (Bias) expressa o desvio médio dos valores estimados em relação aos observados e é comumente utilizado para quantificar erros de equilíbrio de um modelo, para indicar a tendência em superestimar ou subestimar os valores observados. Quanto mais próximo a zero a estimativa dessa estatística, menor é a magnitude do erro sistemático (Gupta *et al*, 1999). Seu valor é calculado pela somatória média das diferenças dos valores simulados e observados (Equação 25), admitindo-se valores positivos e negativos, tendo o zero como valor ideal, para indicar uma exata simulação do modelo; os valores

positivos indicam que o modelo superestimou os valores observados, enquanto os valores negativos indicam que o modelo subestimou a observação.

$$\text{Viés} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - P_{Obs}) \quad (25)$$

Em que P_i é o i ésimo valor estimado, P_{Obs} é o valor observado na superfície e N é o número de dados analisados.

4.4.2 Raiz do Erro Quadrático Médio

A Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) é um indicador que tem por objetivo estimar a magnitude do erro dos valores estimados de um modelo numérico (Moura *et al*, 2010), e é definido como a raiz da diferença individual quadrática entre o valor previsto e o observado (Equação 26). Valores elevados de REQM indicam grandes erros na previsão, e valores próximos a zero indicam uma simulação ideal. Segundo Marujo (2009), o quadrado do termo da diferença, tende a fornecer maior peso às grandes discrepâncias entre os valores previstos e observados, sendo mais sensível a erros.

$$REQM = \sqrt{\left(N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right)} \quad (26)$$

Em que P_i é o i ésimo valor estimado, O_i é o valor observado na superfície e N é o número de dados analisados.

4.4.3 Coeficiente de Correlação

Um dos métodos comumente conhecido para se calcular a correlação entre duas variáveis é o Coeficiente de Correlação Linear de Pearson, também conhecido como Coeficiente de Correlação do Momento Produto. Este foi o primeiro método de correlação estudado por Francis Galton e Karl Pearson em 1897 (SCHULTZ; SCHULTZ, 1992). Seu cálculo é expresso pela equação 27.

$$r = \frac{S_{X,Y}}{S_X S_Y} \quad (27)$$

Na equação 27, r é coeficiente de correlação linear, $S_{X,Y}$ é a covariância entre as variáveis (equação 28), S_X e S_Y são os desvios-padrão das amostras calculados (equação 29 e 30).

$$S_{X,Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n - 1} \quad (28)$$

$$S_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (29)$$

$$S_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}} \quad (30)$$

O coeficiente (r) é interpretado como um indicador que descreve a interdependência entre as variáveis X e Y , com a forma $\hat{Y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta}X$, em que $\hat{\alpha}$ e $\hat{\beta}$ são constantes.

A interpretação do coeficiente quando $r = 1$ é de que existe correlação linear perfeita entre as variáveis X e Y . A correlação é linear perfeita positiva quando $r = 1$ e linear perfeita negativa quando $r = -1$. Quando se tem $r = 0$, não existe correlação linear entre as variáveis X e Y . Entretanto, na prática, ocorrem diferentes valores de r (LIRA, 2004). A interpretação do valor de r depende muito dos objetivos de sua utilização e as razões pelas quais ele é calculado. Segundo Callegari-Jacques (2003), o coeficiente de correlação pode ser avaliado qualitativamente da seguinte forma:

Se $0,00 < |r| < 0,30$, existe fraca correlação linear;

Se $0,30 < |r| < 0,60$, existe moderada correlação linear;

Se $0,60 < |r| < 0,90$, existe forte correlação linear;

Se $0,90 < |r| < 1,00$, existe correlação linear muito forte.

4.4.4 Coeficiente Nash-Sutcliffe

O coeficiente de *Nash-Sutcliffe* foi utilizado como critério avaliativo da habilidade preditiva do modelo HEC-HMS, e se trata de um indicador amplamente utilizado na avaliação

de modelos hidrológicos. Segundo Nash e Sutcliffe (1970), seu valor é determinado pela Equação 31.

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=0}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (31)$$

Em que O_i é valor observado, P_i o valor simulado e \bar{O} o valor médio observado.

O valor do coeficiente *Nash* varia entre o $-\infty$ a 1. Uma eficiência igual a 1 ($Nash = 1$) indica uma perfeita correspondência do modelo aos dados observados. Uma eficiência de zero ($Nash = 0$) indica que as previsões do modelo são tão precisas quanto a média dos dados observados, enquanto que valores inferiores a zero ($Nash < 0$) indicam que o modelo não é adequado para simulação. Basicamente, quanto mais próximo de 1 for o indicador, mais hábil é o modelo no processo de simulação.

4.4.5 Heidke Skill Score

Para a avaliação da habilidade preditiva do modelo WRF e também do modelo hidrológico, foi utilizado o índice de *Heidke Skill Score* (HSS). Este índice mede a habilidade com que o modelo prevê uma variável em relação a um padrão particular, tal como a previsão feita ao acaso, ou seja, ele elimina a influência de previsões que estariam corretas por acaso.

Na análise das previsões geradas pelo modelo WRF, foi utilizada o HSS para eventos dicotômicos (binários). De acordo com Conner e Grant (1998), o índice indica o grau de concordância entre dois pressupostos binários como chover ou não chover, calculado a partir de uma tabela de contingência de 2×2 , tal como definido pela Tabela 6. Para as previsões hidrológicas geradas no acoplamento dos modelos, foi utilizado o método para multicategoria (Tabela 7). Nesse método, o HSS utiliza a proporção de acertos como métrica para calcular a qualidade relativa do sistema de previsão.

Tabela 6 – Esquema de contingência para o cálculo do HSS.

Observação	Previsão		Total
	Choveu	Não Choveu	
Choveu	x	y	x + y
Não Choveu	z	w	z + w
Total	x + z	y + w	n

Fonte: Barnston (1992).

A precipitação é analisada por meio de categorias, isto é, o critério de erro ou acerto da previsão baseia-se na ocorrência ou não do evento de chuva. Para isso, são definidas as seguintes categorias:

- O modelo previu chuva e ocorreu no ponto de verificação (X);
- O modelo previu chuva no ponto e não ocorreu (Y);
- O modelo não previu chuva no ponto e ocorreu (Z);
- O modelo não previu chuva no ponto e não ocorreu (W).

Tabela 7 – Tabela de contingência multicategórica

		Categoria Observada				
		<i>i/j</i>	Classe-1	Classe-2	...	Classe-k	Total
Categoria Prevista	Classe-1	$n(F_1, O_1)$	$n(F_1, O_2)$	...	$n(F_1, O_k)$	$N(F_1)$
	Classe-2	$n(F_2, O_1)$	$n(F_2, O_2)$	...	$n(F_2, O_k)$	$N(F_2)$

	Classe-k	$n(F_k, O_1)$	$n(F_k, O_2)$	...	$n(F_k, O_k)$	$N(F_k)$
	Total	$N(O_1)$	$N(O_2)$	...	$N(O_k)$	N

Fonte: Adaptada de Nurmi (2003).

Em que $n(F_i, O_j)$ indica o número de previsões na categoria i que tinha observações na categoria j , $N(F_i)$ indica o número total de previsões da categoria i , $N(O_j)$ indica o número total das observações na categoria j , e N é o número total de previsões.

Os valores do HSS podem variar entre -1 a 1, com 1 indicando uma habilidade perfeita, zero indicando nenhuma habilidade ou uma previsão equivalente a uma previsão de referência que, nesse caso, significa acaso, e -1 indicando desempenho pior do que um

esquema aleatório. O índice é definido com base nos elementos das Tabelas 6 e 7, e calculado pelas Equações 32 e 33, respectivamente, para as previsões dicotômicas e multicategóricas.

$$HSS = \frac{2(xw - yz)}{[(x + z) \cdot (z + w) + (x + y) \cdot (y + w)]} \quad (32)$$

$$HSS = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^k N(F_i O_i) - \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^k N(F_i) N(O_i)}{1 - \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^k N(F_i) N(O_i)} \quad (33)$$

4.4.6 Proporção de acerto (H)

Segundo Jolliffe e Stephenson (2003, p. 46), o percentual de acerto é uma medida intuitiva de previsão correta. A expressão indica a fração de n previsões ocorridas independentemente se o evento foi abaixo ou acima do limite preestabelecido. O H varia entre 0% a 100%; é classificado como pior possível quando atinge valor igual a zero (0%) e ideal quando igual a um (ou 100%), ou seja, todas as previsões se concretizaram. O índice é calculado pela Equação 34 para previsões dicotômicas e Equação 35 para previsões multicategorizadas, com base nas Tabelas 6 e 7, respectivamente.

$$H = \frac{x + w}{n} \cdot 100 \quad (34)$$

$$H = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^k N(F_i O_i)}{N} \quad (35)$$

4.4.7 Razão de alarme falso (RAF)

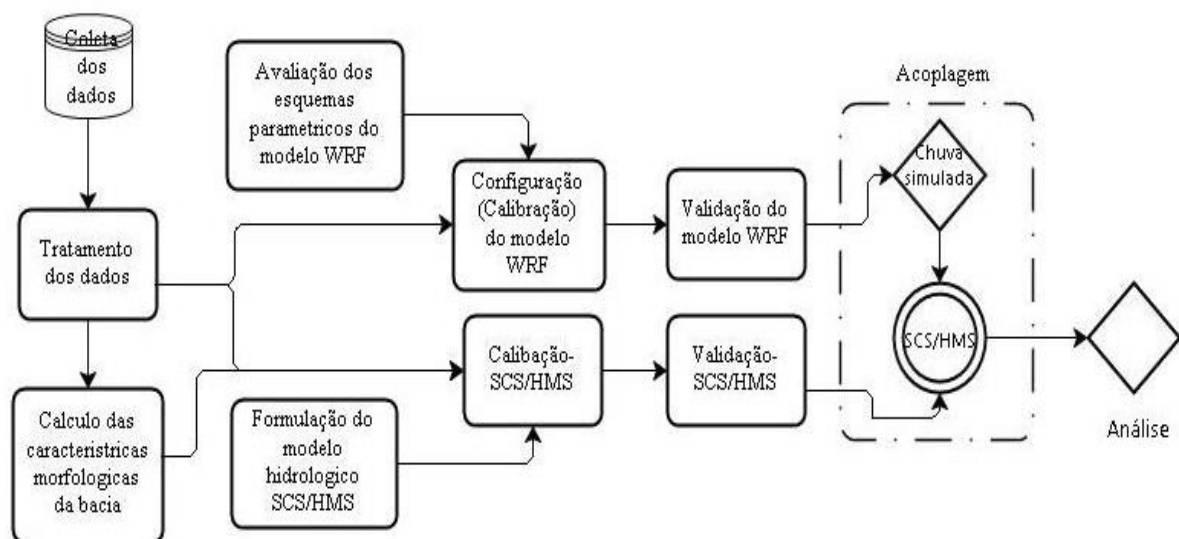
Ainda de acordo com Jolliffe e Stephenson (2003, p. 47), ao contrário do H, o RAF é uma medida de precisão que representa a proporção dos eventos previstos que não foram observados. A medida é calculada pela equação 36 de acordo com a Tabela 6. O RAF apresenta uma orientação inversa ao H, de forma que valores menores (o mais próximo de 0%) serão tidos como ideais, e inadequados, quando for próximo ou igual a 100%.

$$FAR = \frac{y}{x + y} \quad (36)$$

4.5 Resumo Procedimental

Com base na metodologia, procedeu-se ao desenvolvimento do trabalho (Figura 20). No primeiro momento, foi realizada a coleta e tratamento dos dados de precipitação e vazão sobre a área de estudo. Posteriormente, determinaram-se as principais características morfológicas da bacia do rio Paraíba do Meio. No segundo momento, foram realizados testes com os esquemas paramétricos de microfísica e convecção no modelo atmosférico WRF. Depois dos testes, o modelo atmosférico foi configurado e validado. No processo de avaliação dos ajustes, foram utilizados os critérios estatísticos descritos na subseção 4.4. Em um terceiro momento, foi formulado um modelo hidrológico semidistribuído, utilizando-se o programa HEC-HMS. Após a formulação, o modelo hidrológico foi calibrado usando-se o método manual e, posteriormente, o automático realizado no HEC-HMS. A validação do modelo ocorreu após o processo de calibração, ao se utilizar das métricas já mencionadas. Diante do ajuste dos modelos, procedeu-se à etapa de acoplamento, de maneira a se usar as precipitações geradas pelo modelo WRF como forçantes do modelo hidrológico; depois, deu-se a análise do sistema de previsão formulado via acoplamento. Nesta tese, o conceito de previsão apresentado nos resultados, refere-se ao processo de reanálise dos eventos ocorridos entre os dias 27 a 31 de julho de 2011 e os eventos de 01 a 16 de julho de 2013, simulados pelos modelos WRF e SCS/HMS bem como na acoplagem entre eles.

Figure 20 – Diagrama representando as principais etapas no desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Autor (2015).

5. RESULTADOS

5.1 Configuração do modelo WRF

Na fase de configuração do modelo WRF, foram realizados testes com diferentes esquemas paramétricos de microfísica e convecção (cúmulos), com o propósito de encontrar a melhor combinação paramétrica na simulação de chuva na área em estudo. Na configuração, foram realizados testes estatísticos com os resultados simulados obtidos em D1 e D2. As simulações foram feitas para um horizonte temporal de 120 horas, período correspondente ao intervalo entre os dias 27 a 31 de julho de 2011. Foram avaliados dois pontos distintos na análise, Atalaia e Viçosa. A Tabela 8 apresenta os esquemas paramétricos utilizados na avaliação da fase de configuração do modelo WRF. Em uma primeira análise, os indicadores estatísticos mostraram que os resultados obtidos em D1 não foram estatisticamente significativos comparados ao D2. Diante disso, o modelo foi ajustado e validado, utilizando-se os valores simulados em D2, com o propósito de reduzir o tempo computacional (tempo de rodada) em cada rodada.

Tabela 8 – Esquemas paramétricos avaliados na fase de calibração do modelo WRF.

Esquema	Notação
Kessler – Microfísica	MPK
Lin – Microfísica	MPL
Thompson – Microfísica	MPT
Kain-Fritsch – Convecção	KF
Betts-Miller-Janjić – Convecção	BMJ
Grell 3D – Convecção	G3D

Fonte: Autor (2015).

Foi criada uma matriz de nove variantes, para se usar diferentes combinações entre os esquemas de microfísica e convecção (Tabela 9), com os esquemas de Kessler (1969), Lin *et al* (1983) e Thompson (2004), por três esquemas de convecção: *Kain-Fritsch* (1993), *Betts-Miller-Janjić* (Betts; Miller, 1986; Janjic, 1994) e *Grell 3D*, que é uma versão aperfeiçoada do sistema de *Grell-Devenyi* (GRELL; DEVENYI, 2002). Para os outros parâmetros utilizados no WRF, fixamos os esquemas RRTMG (MLAWER *et al*, 1997), para radiação de onda longa; o esquema de Goddard, para radiação de onda curta; o MM5 similaridade (PAULSON, 1970; DYER; HICKS, 1970; WEBB, 1970), para camada

superficial do solo; o *Noah-LSM* (CHEN; DUBHIA, 2001), para processos de superfície e o ACM2 PBL (PLEIM, 2007), para camada limite planetária.

Tabela 9 – Possíveis combinações utilizando os três esquemas de microfísica por três de convecção no modelo WRF. As abreviações estão especificadas na tabela 7.

	KF	BMJ	G3D
MPK	MPK + KF	MPK + BMJ	MPK + G3D
MPL	MPL + KF	MPL + BMJ	MPL + G3D
MPT	MPT + KF	MPT + BMJ	MPT + G3D

Fonte: Autor (2015).

Foram analisados os resultados apenas referentes às simulações em D2 (5km x 5km). A Tabela 10 apresenta a estatística obtida após a aplicação dos critérios em cada uma das nove combinações com ponto de análise no posto de Atalaia. A análise evidenciou nesse ponto que o modelo WRF apresenta uma tendência em subestimar as observações em todas as combinações. A microfísica proposta por Thompson *et al* (2004) e a parametrização convectiva indicada por Kain-Fritsch (1993) foi a combinação que gerou a menor subestimação (-0,07), o que resultou em uma boa classificação, segundo Moriasi *et al* (2007). O REQM também indicou os dois esquemas, como os que apresentaram o menor erro entre os dados observados e previstos. A correlação obtida na análise (0,68) foi aceitável, e é classificada como forte, segundo Callegari-Jacques (2003) e Lira (2004), tendo em vista a escala de análise utilizada.

Tabela 10 – Estatística relacionada às simulações com cada uma das nove combinações avaliadas no modelo WRF-ARW, para o posto de Atalaia/AL.

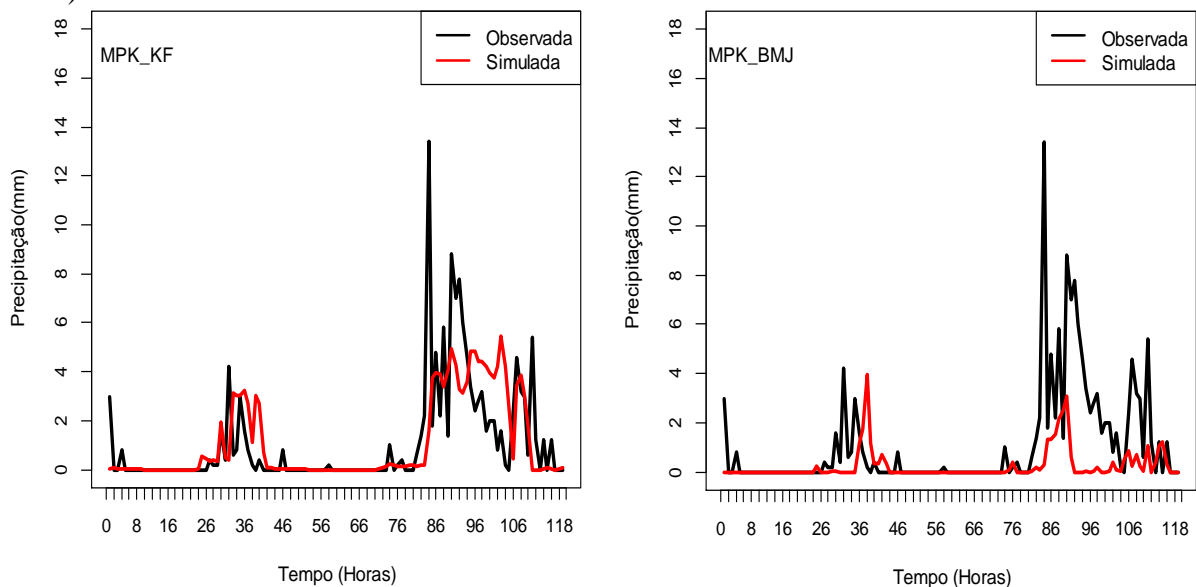
COMBINAÇÃO	r	VIÉS	REQM
MPK e KF	0,55	-0,01	1,82
MPK e BMJ	0,31	-0,84	2,17
MPK e G3D	0,53	-0,55	1,87
MPL e KF	0,63	0,07	1,66
MPL e BMJ	0,44	-0,81	2,08
MPL e G3D	0,46	-0,27	2,03
MPT e KF	0,68	-0,07	1,55
MPT e BMJ	0,38	-0,82	2,12
MPT e G3D	0,61	-0,28	1,69

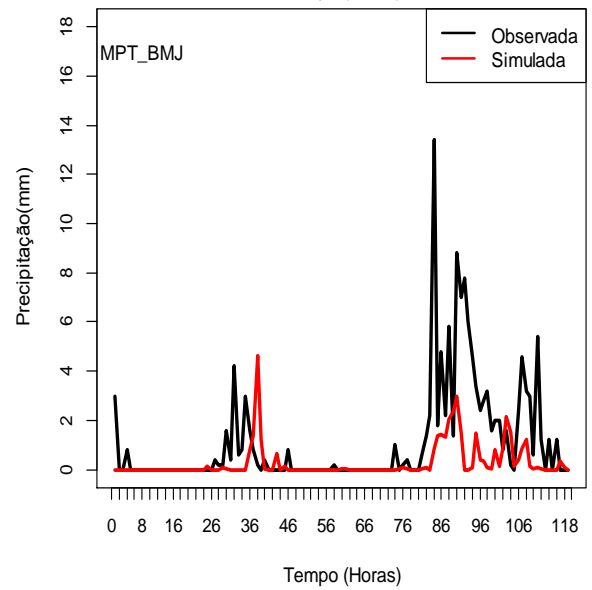
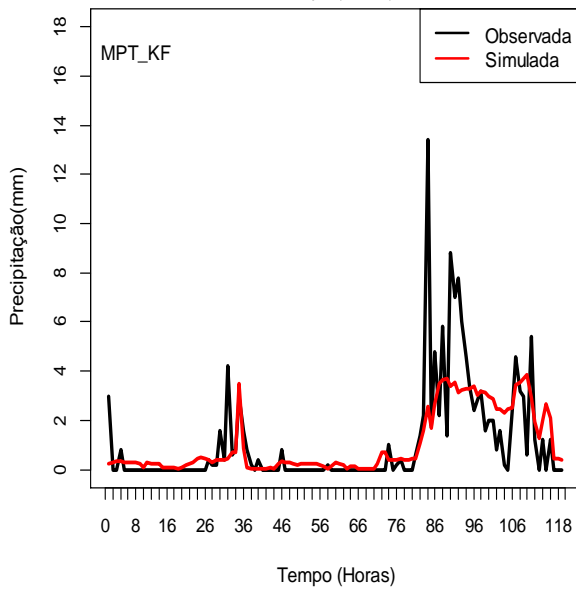
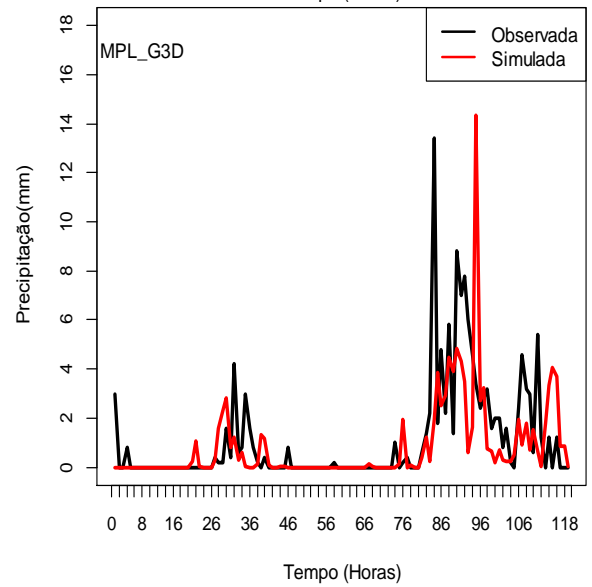
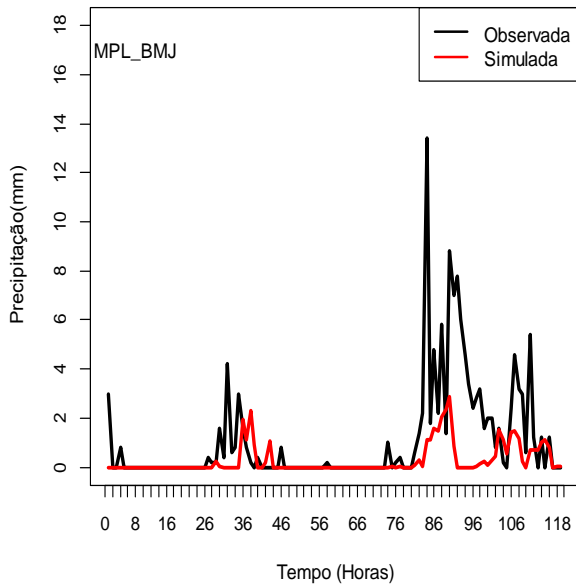
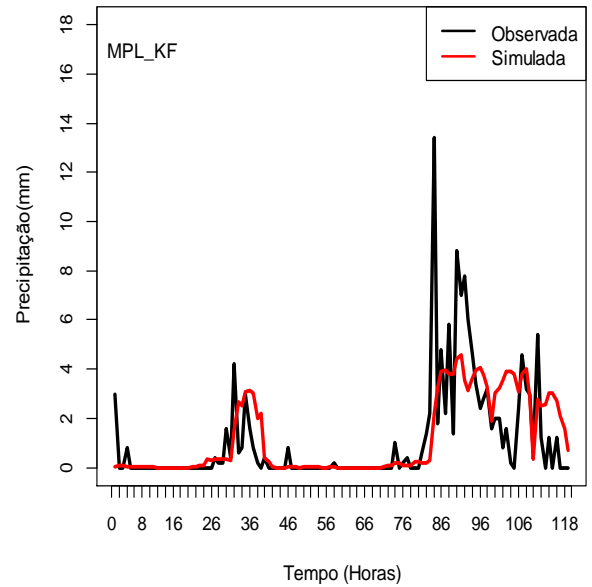
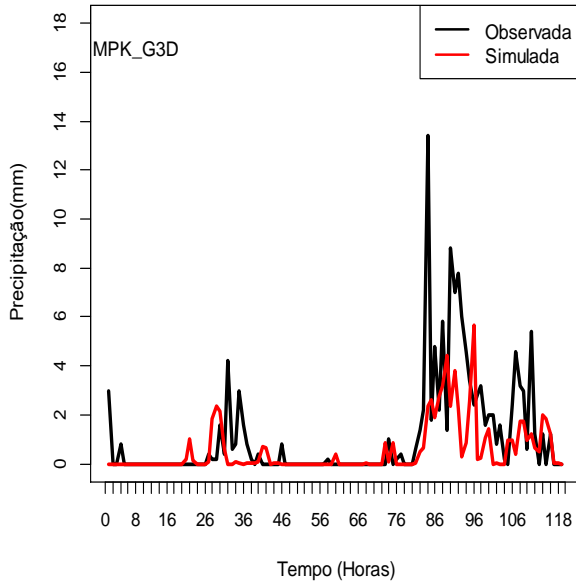
Fonte: Autor (2015).

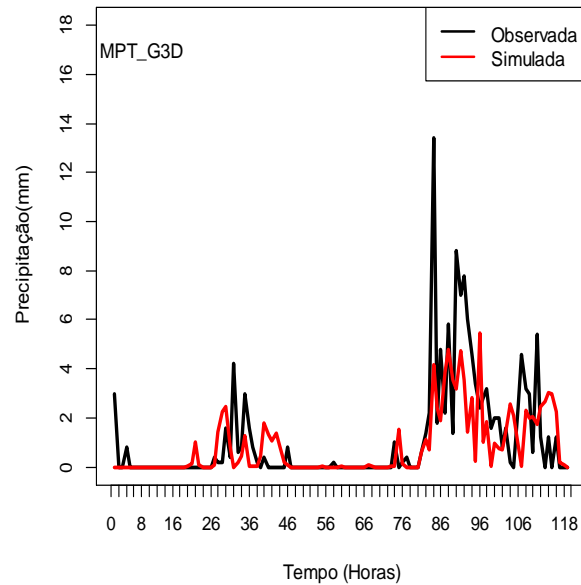
As precipitações simuladas pelo modelo WRF para as combinações avaliadas, foram comparadas aos valores observados de precipitação (Figura 21). Os dados observados corresponderam à mesma localidade das previsões (Cidade de Atalaia). A análise constatou que o modelo conseguiu prever chuvas em todos os instantes em que se registrou precipitação observada em todas as combinações. Contudo, a magnitude das chuvas previstas foi bem abaixo da observada para algumas combinações, como se constata visualmente nos gráficos (Figura 21), além de ser indicadas pelos critérios Viés e o REQM (Tabela 10).

Segundo Yuan *et al* (2009) e Argüeso *et al* (2011), o modelo WRF tem seu melhor desempenho em previsões com escalas maiores de tempo, como médio e longo prazo. Contudo, a precipitação acumulada prevista no período analisado apresentou valores significativos para algumas combinações como MPL-G3D=75%, MPT-KF=94% e MPK-KF=99% dos valores precipitados observados.

Figura 21 – Comparação da precipitação observada *versus* simulada, para as combinações (microfísica e convecção) avaliadas. Posto de Atalaia/AL. (Período: 27 a 31 de Julho de 2011).







Fonte: Autor (2015).

Na análise da simulação no segundo ponto (posto correspondente à cidade de Viçosa), os resultados mostraram que, apesar do melhor coeficiente de correlação obtido na combinação MPL e KF (Tabela 11), o acumulado precipitado no período de análise não ultrapassou os 13% do observado, o que caracterizou uma elevada subestimação dos valores registrados no posto analisado (Viçosa). No entanto, em média, o esquema de MPT e a parametrização convectiva de G3D apresentaram os melhores resultados entre as combinações avaliadas. O valor do coeficiente de correlação obtido foi de 42%, considerado um valor moderado, segundo a classificação de Callegari-Jacques (2003). Constatou-se, também, que o critério que avalia o erro sistemático (Viés) e sua magnitude (REQM) foram os melhores entre as combinações avaliadas, como se constata na Tabela 11.

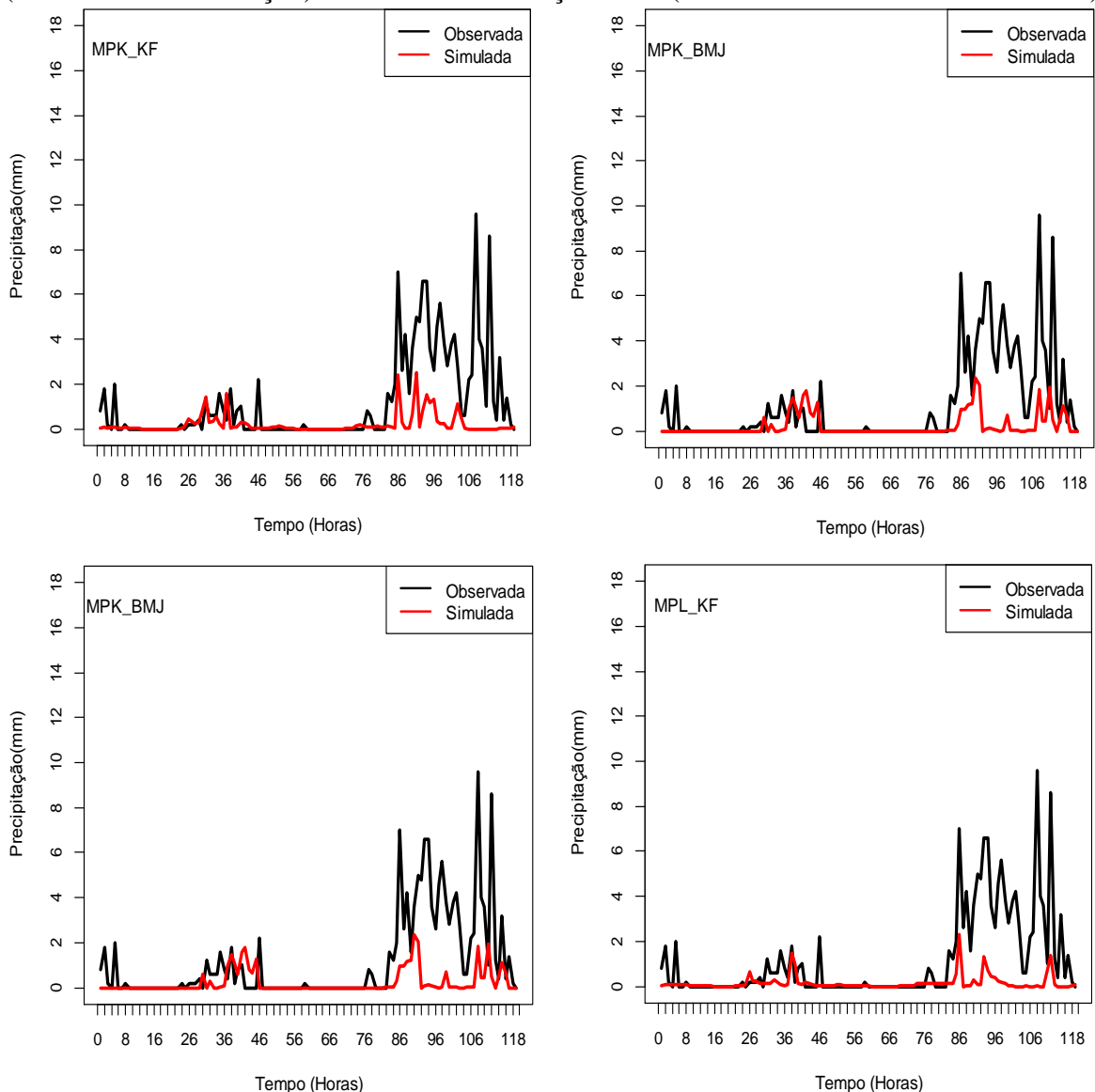
Tabela 11 – Estatística relacionada às simulações com cada uma das nove combinações avaliadas no modelo WRF-ARW, para o posto de Viçosa/AL.

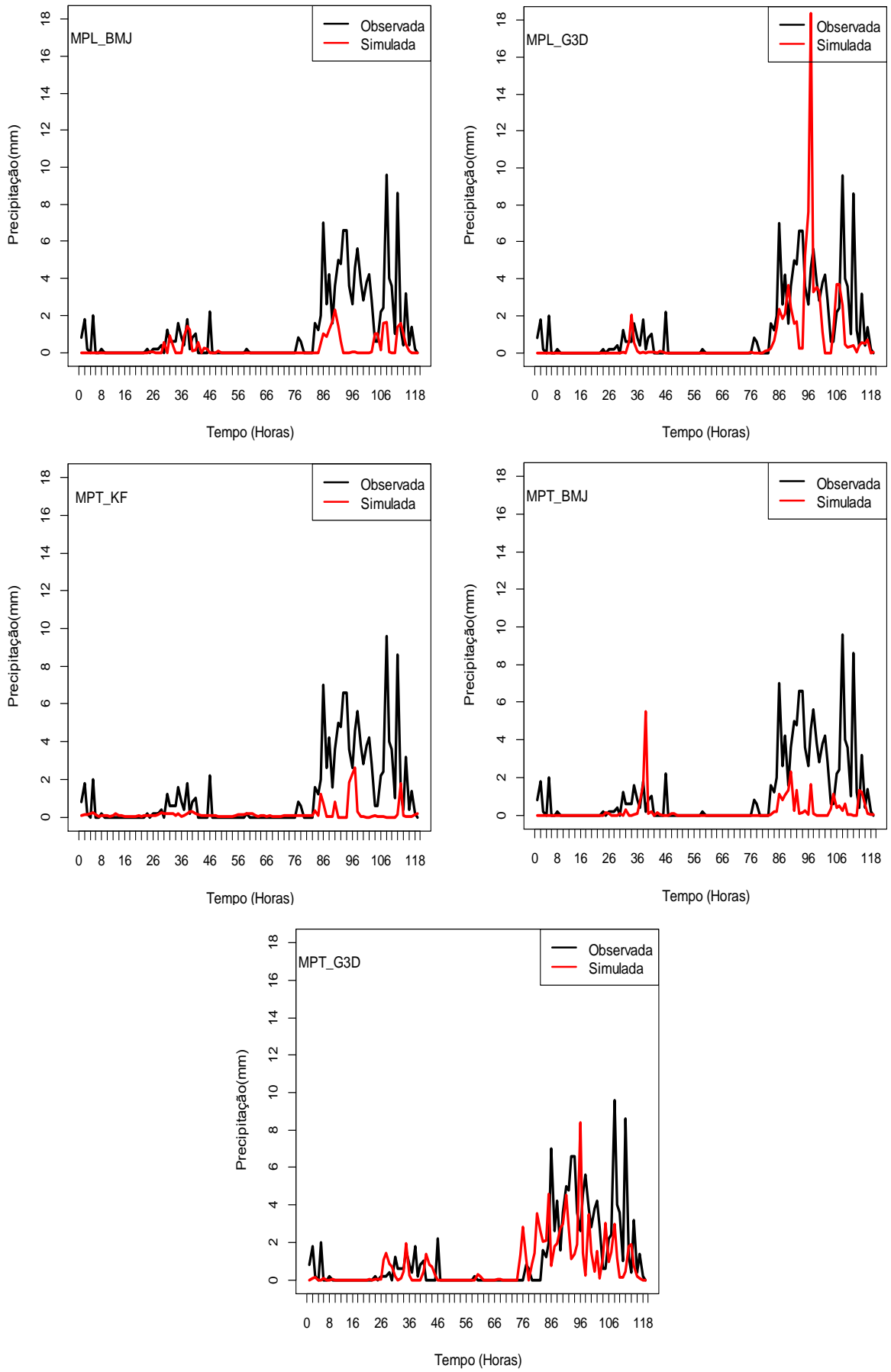
COMBINAÇÃO	r	VIÉS	REQM
MPK e KF	0,42	-0,97	2,05
MPK e BMJ	0,36	-0,93	2,04
MPK e G3D	0,29	-0,61	2,80
MPL e KF	0,46	-1,02	2,08
MPL e BMJ	0,42	-0,95	2,03
MPL e G3D	0,42	-0,50	2,19
MPT e KF	0,21	-0,99	2,14
MPT e BMJ	0,20	-0,95	2,14
MPT e G3D	0,40	-0,42	1,89

Fonte: Autor (2015).

A Figura 22 apresenta uma comparação entre as precipitações previstas e observadas para as combinações avaliadas na simulação de chuvas em Viçosa. Visualmente, constata-se o que já foi evidenciado na avaliação estatística, ou seja, uma tendência em subestimar as precipitações observadas com elevado erro de magnitude (REQM) (Tabela 11). Em termos de valores acumulados no período avaliado, o modelo WRF previu as seguintes taxas dos valores reais precipitados: MPK-KF=17%; MPK-BMJ=21%; MPK-G3D=48%; MPL-KF=13%; MPL-BMJ=19%; MPL-G3D=57%; MPT-KF=15%; MPT-BMJ=19% e MPT-G3D=64%. Como se constata na análise, as combinações que possibilitaram as melhores previsões foram as MPL-G3D e MPT-G3D.

Figura 22 – Comparação da precipitação observada *versus* simulada, para as combinações (microfísica e convecção) avaliadas. Posto Viçosa/AL. (Período: 27 a 31 de Julho de 2011).

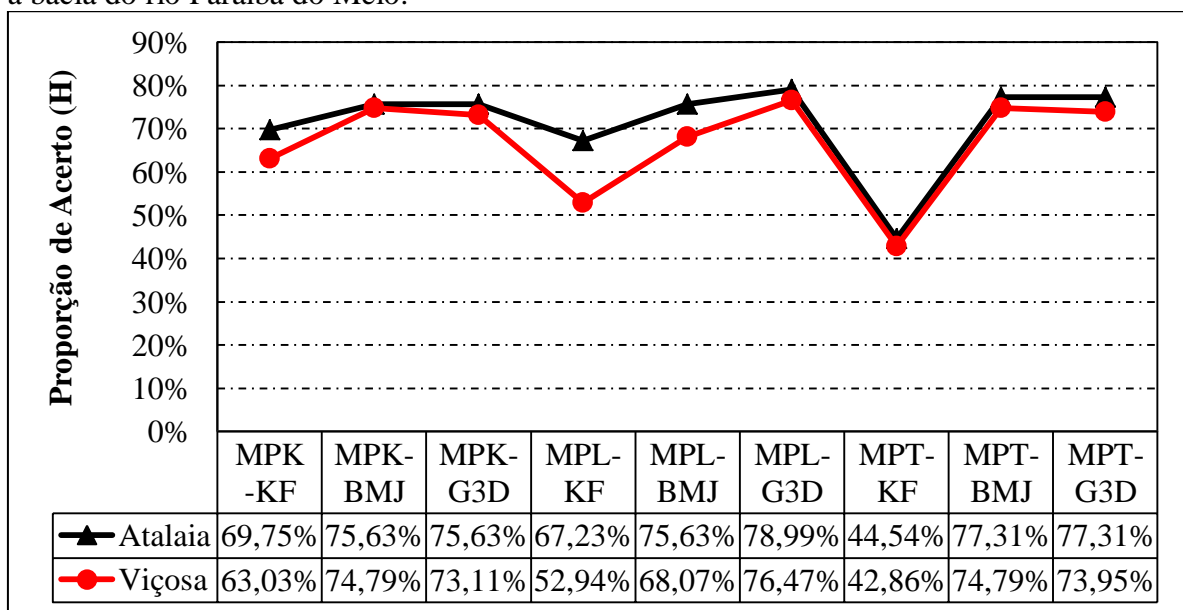




Fonte: Autor (2015).

Na Figura 23, é apresentado o índice de Proporção de Acerto (H) do modelo WRF para cada uma das nove combinações. Na análise, não foi estabelecido nenhum limiar. As combinações apresentaram índices de acerto superior a 50%, com exceção da combinação entre a microfísica de Thompson (MPT) e a convecção de Kain-Fritsch, que obteve 44,54% e 42,86% para o posto de Atalaia e Viçosa, respectivamente. A análise evidenciou ainda que o melhor H foi proporcionado pela associação paramétrica dos esquemas de microfísica de Purdue Lin e a convecção de Grell 3D, com aproximadamente 80%.

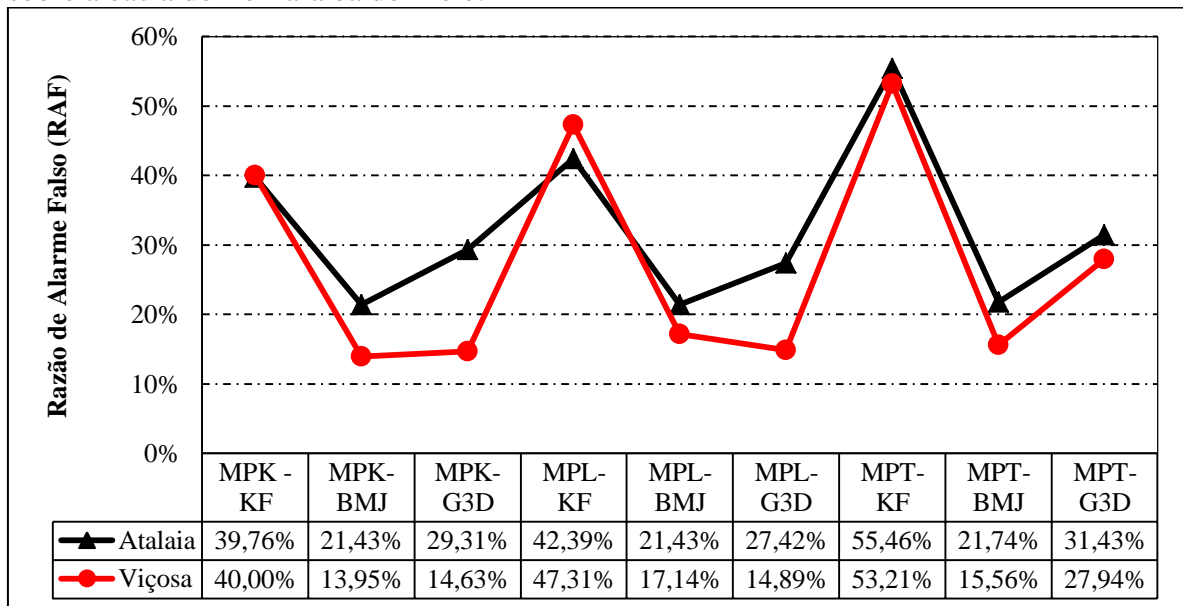
Figura 23 – Proporção de acertos (PA) das previsões de chuva geradas do modelo WRF sobre a bacia do rio Paraíba do Meio.



Fonte: Autor (2015).

A Figura 24 apresenta a Razão de Alarmes Falsos (RAF) proporcionados pelo modelo WRF na simulação de chuva para cada uma das combinações avaliadas. O RAF mostrou que a maior quantidade de desvio na simulação ocorreu com a combinação de MPT-KF, com valor médio de 54,34% entre os dois pontos de análise. As melhores combinações apresentaram um RAF variando entre 13,95% a 27,42%.

Figura 24 – Relação de alarme falso (RAF) das previsões de chuva geradas do modelo WRF sobre a bacia do rio Paraíba do Meio.

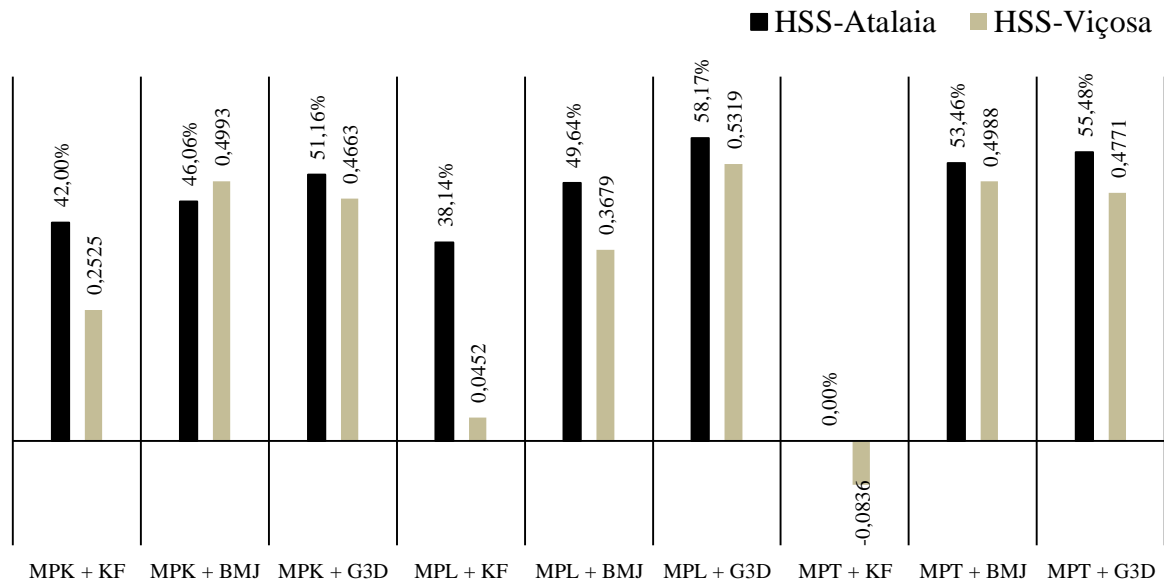


Fonte: Autor (2015).

A Figura 25 apresenta uma análise da habilidade do modelo WRF em um horizonte temporal de 120 horas, realizada para cada uma das nove combinações avaliadas anteriormente citadas, para os dois pontos analisados (Atalaia e Viçosa).

O índice HSS avalia a capacidade preditiva do WRF em cada uma das rodadas. O modelo proporcionou resultados preditivos satisfatórios em quase todas as combinações analisadas, com valores acima de zero, o que indica um desempenho melhor que uma previsão aleatória. Vale salientar que o melhor desempenho encontrado no HSS sobreveio utilizando-se os esquemas de MPL e G3D, os quais indicaram valores iguais a 0,5817 e 0,5319, em ambos os pontos analisados. A análise também evidenciou que o pior resultado foi indicado pelos esquemas paramétricos de MPT e KF, com valores de 0 (zero) e -0,0836, o que mostra que os esquemas são inadequados para previsão de chuvas nessa região, apesar de terem apresentado bons resultados na análise estatística no posto de Atalaia.

Figura 25 – Avaliação da Habilidade (HSS) do modelo WRF, com as combinações analisadas.



Fonte: Autor (2015).

Diante dos resultados apresentados na avaliação das combinações paramétricas de microfísica e convecção na geração de simulação de chuvas pelo modelo WRF, a combinação entre o esquema de Thompson (MPT) e Kain-Fritsch (KF) apresentou o pior resultado no conjunto dos critérios avaliados. No entanto, os ajustes efetuados com MPT-G3D e MPL-G3D proporcionaram os melhores indicadores na simulação de chuva sobre a bacia do rio Paraíba do Meio. Contudo, optou-se por se utilizar na configuração do modelo WRF os esquemas de microfísica e convecção (MPT-G3D) propostos por *Purdue Lin* (LIN *et al*, 1983) e o de *Grell 3D* (GRELL, 1993), respectivamente, por apresentarem, em média, o melhor resultado estatístico no conjunto dos critérios avaliados.

5.2 Validação do modelo WRF

Na etapa de validação do modelo WRF, foram usadas na avaliação as mesmas métricas utilizadas na análise do processo de configuração do modelo (r , Viés, REQM e o HSS). A série de dados usada nessa etapa correspondeu a um período entre 1 a 8 de junho de 2013. As simulações foram realizadas para um horizonte temporal de 192 horas, 72 horas a mais que o horizonte de configuração (calibração), com análise em quatro pontos ao longo da bacia (Atalaia, Capela, Cajueiro e Viçosa). A Tabela 12 apresenta os resultados da análise estatística para os valores simulados pelo modelo WRF.

Como esperado, o modelo apresentou em média uma subestimação das precipitações observadas na fase de validação. Padilha (2011), analisando as precipitações simuladas em três eventos de chuvas intensas, no estado do Rio de Janeiro, em um horizonte temporal de 72 e 144 horas, constatou que o modelo apresenta uma disponibilidade em subestimar as chuvas observadas. O REQM encontrado na fase de validação ficou dentro dos limites aceitáveis, apesar do elevado valor apresentado pelo posto em Atalaia.

Oliveira (2006) avaliou as chuvas simuladas pelo modelo WRF na bacia de União da Vitória no estado de Santa Catarina, em um horizonte de 24 e 48 horas, e ressalta que o modelo consegue identificar os eventos meteorológicos, mas não consegue fazer uma simulação com precisão horária. Já no que concerne à habilidade preditiva do modelo, o HSS indicou uma variação entre 0,37 e 0,61 (Tabela 12), em um índice que varia entre -1 a 1, com 1 indicando uma habilidade perfeita, zero, nenhuma habilidade ou uma previsão equivalente a uma previsão de referência que, nesse caso, significa acaso, e -1, apontando desempenho pior do que um esquema aleatório.

Reynaud (2008), avaliando as previsões de chuvas simuladas pelo modelo WRF na bacia do rio Iguaçu no estado do Paraná, observou que, em um horizonte de 24 horas, a previsibilidade do modelo variou entre 0,37 a 0,42, resultados esses que corroboram com os encontrados neste estudo.

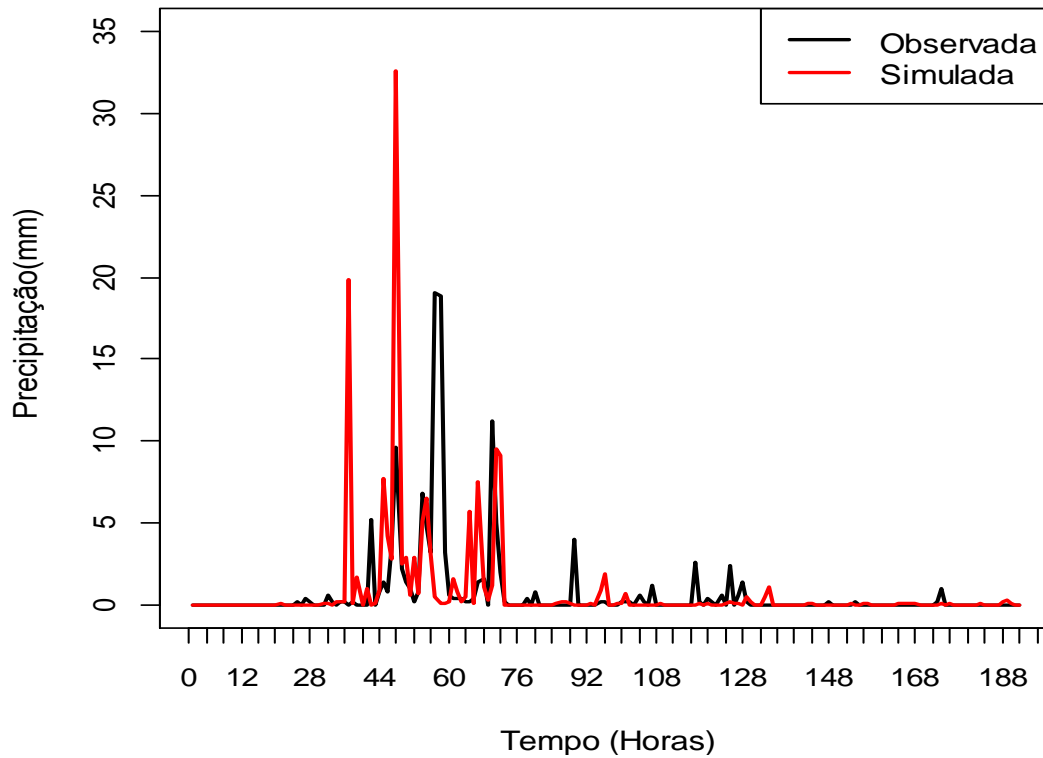
Tabela 12 – Avaliação estatística da fase de validação do modelo WRF.

Posto	r	VIÉS	REQM	HSS
Atalaia	0,32	0,07	10,45	0,61
Capela	0,40	0,07	1,71	0,52
Cajueiro	0,33	-0,16	1,65	0,51
Viçosa	0,15	-0,09	2,92	0,37

Fonte: Autor (2015).

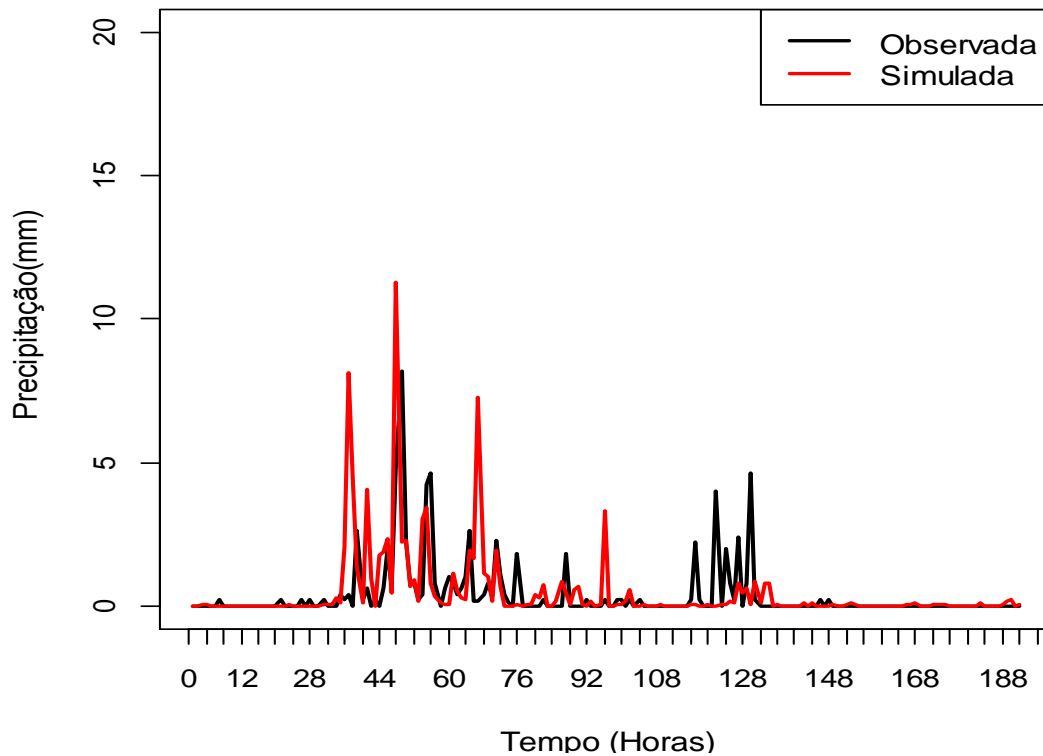
As Figuras 26, 27, 28 e 29 mostram a comparação entre as precipitações previstas e observadas nos postos de Atalaia, Capela, Cajueiro e Viçosa, respectivamente. Os resultados possibilitaram uma visualização das precipitações simuladas com o novo par de parâmetros de microfísica e convecção, utilizados no modelo WRF.

Figura 26 – Análise comparativa das precipitações previstas e observadas no posto Atalaia. (Período: 1 a 8 de julho de 2013).



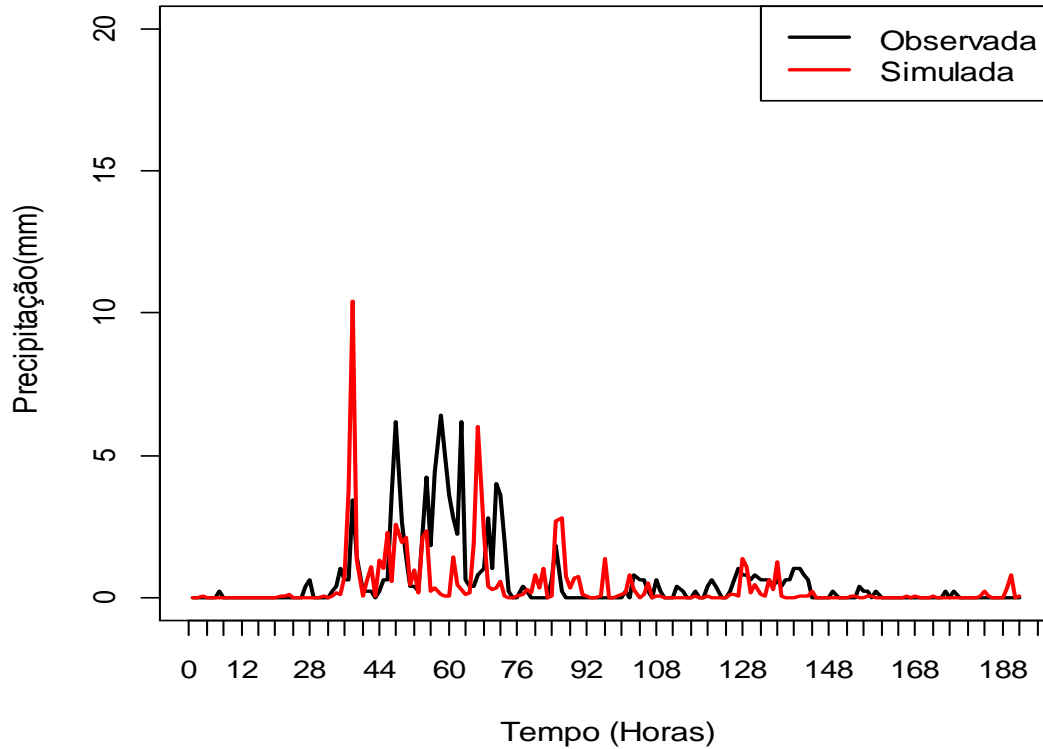
Fonte: Autor (2015)

Figura 27 – Análise comparativa das precipitações previstas e observadas no posto Capela. (Período: 1 a 8 de julho de 2013).



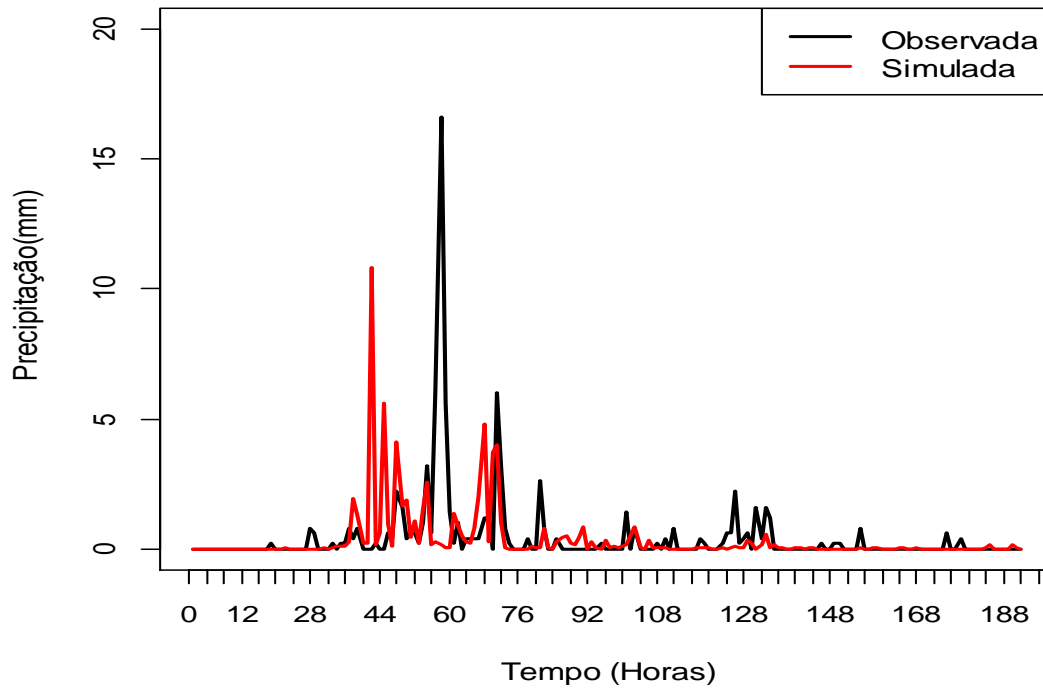
Fonte: Autor (2015).

Figura 28 – Análise comparativa das precipitações previstas e observadas no posto Cajueiro. (Período: 1 a 8 de julho de 2013).



Fonte: Autor (2015).

Figura 29 – Análise comparativa das precipitações previstas e observadas no posto Viçosa. (Período: 1 a 8 de julho de 2013).

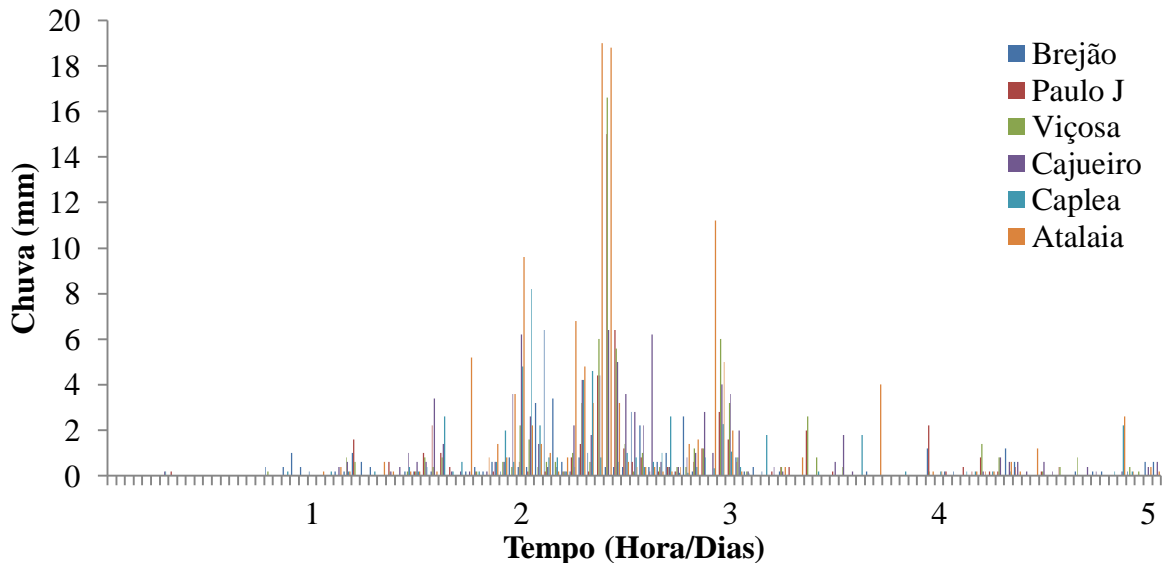


Fonte: Autor (2015).

5.3 Modelagem Hidrológica

O modelo hidrológico formulado no programa HEC-HMS foi calibrado, utilizando-se como entrada uma série de precipitações horárias com 120 registros, correspondente ao período de 01 a 05 de julho de 2013 (Figura 30).

Figura 30 – Precipitação pluviométrica usada na calibração do modelo HMS.



Fonte dos dados: Agência Nacional de Águas (ANA).

Dois postos fluviométricos foram utilizados na calibração, a PCD da cidade de Viçosa localizada na sub-bacia SB9 e a PCD de Atalaia (SB12). O Número de Curva (CN) e o Tempo de Resposta (*lag time*) foram os parâmetros a serem calibrados no modelo.

Na fase de calibração, foram adotados os métodos por aproximações sucessivas e o automático. O primeiro método consiste na modificação das ações contínuas até a obtenção de uma resposta ótima (Ajuste dos parâmetros manualmente baseados nos resultados). Em função da sua simplicidade, é um dos métodos mais utilizados. A cada tentativa, analisou-se o ajuste das vazões máximas, a forma do hidrograma calculado, o ajuste dos picos de cheias e o volume calculado. Quanto ao segundo método utilizado, foi empregado o método de ajuste automático disponível no próprio programa HEC-HMS.

Para se obter um melhor resultado na calibração, a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio foi dividida em quatorze sub-bacias. Seguidamente, foram calculados seus respectivos tempos de concentração e tempo de retardo (Tabela 13). Segundo Zhang *et al* (2013), essa grandeza (Tempo de concentração) apresenta uma alta sensibilidade aos esquemas de partições de bacias. Resultados encontrados por Majidil e Shahedi (2012)

mostraram que o tempo de resposta (T_r) é o parâmetro que apresenta uma maior sensibilidade no ajuste do HEC-HMS.

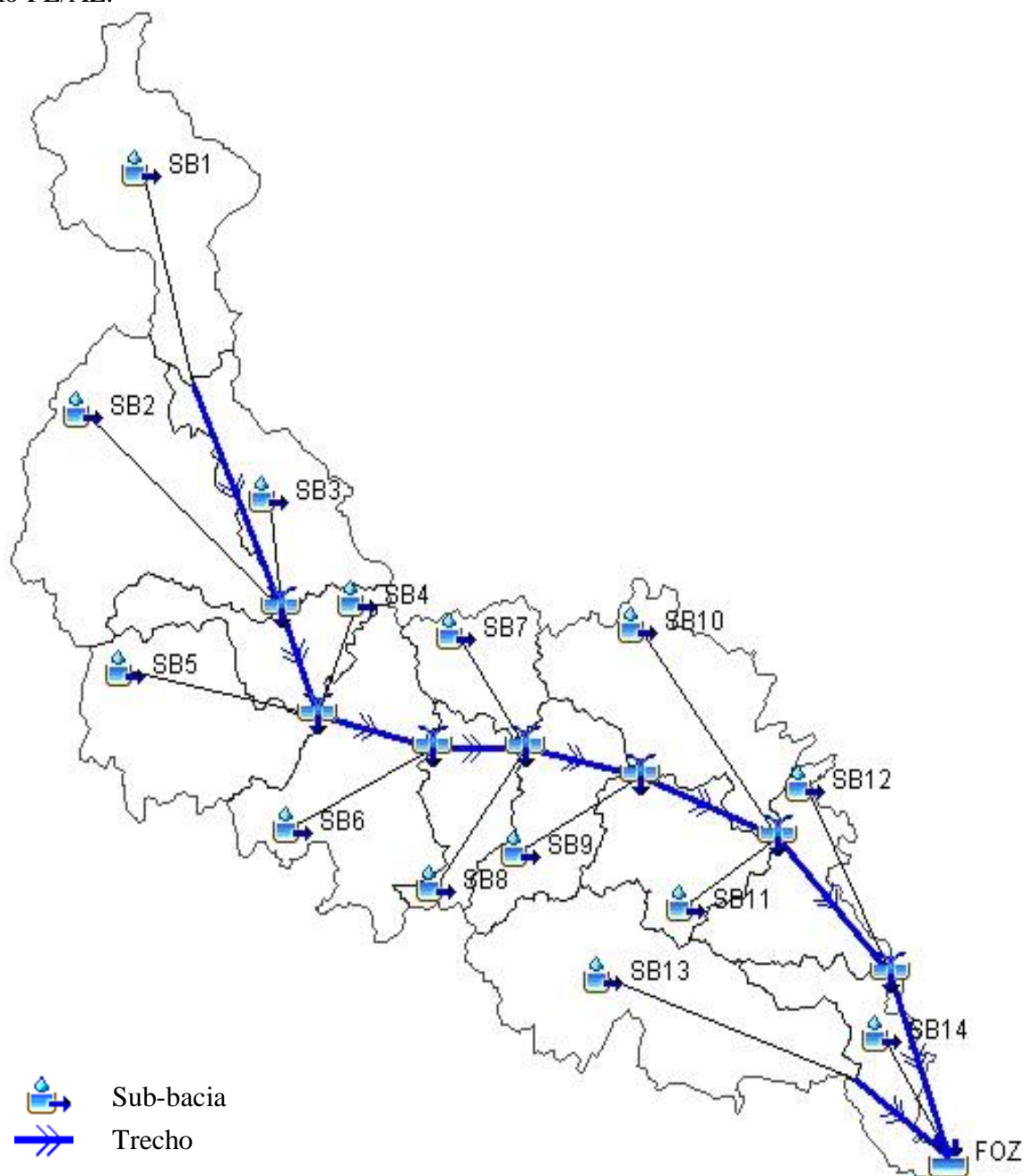
Tabela 13 – Principais características das sub-bacias, utilizadas na calibração do modelo hidrológico. T_c = Tempo de Concentração e T_r = Tempo de Retardo.

Sub-bacia	Área (km ²)	Perímetro (km)	Declividade (mm)	T_c (Horas)	T_r (Horas)
SB1	306,00	103,00	0,0037530	11,639	6,983
SB2	383,40	108,00	0,0097164	8,944	5,366
SB3	182,00	88,50	0,0132306	6,661	3,996
SB4	137,00	84,00	0,0178460	6,239	3,743
SB5	245,00	82,20	0,0122943	6,866	4,119
SB6	289,56	110,86	0,0102157	6,343	3,806
SB7	109,64	51,25	0,0332652	4,410	2,646
SB8	117,71	67,76	0,0192498	4,755	2,853
SB9	159,00	70,80	0,0220729	4,821	2,892
SB10	271,00	104,00	0,0133958	8,327	4,996
SB11	163,00	72,50	0,0133200	5,636	3,382
SB12	154,42	85,88	0,0083582	5,993	3,596
SB13	372,00	125,00	0,0116906	10,192	6,115
SB14	134,84	87,67	0,0052233	9,423	5,654

Fonte: Autor (2015).

O esquema físico da configuração hidrológica da bacia do rio Paraíba do Meio gerado pelo HEC-HMS com os seus respectivos trechos e sub-bacias podem ser visualizados na Figura 31.

Figura 31 – Configuração esquemática do HEC-HMS da bacia de drenagem do rio Paraíba do Meio PE/AL.



Fonte: Autor (2015).

5.4 Calibração Modelo Hidrológico

O ajuste dos parâmetros do modelo hidrológico no HEC-HMS objetivou minimizar a função objetiva REMQ e Viés, e a maximizar o coeficiente *Nash-Sutcliffe* e o coeficiente correlação. Valores ideais das duas primeiras funções são próximos a zero, enquanto as funções *Nash* e coeficiente de correlação admitem valores ideais próximos a um (1).

Os resultados estatísticos obtidos através da aplicação das funções objetivas após a calibração foram organizados e expostos na Tabela 14. O ajuste possibilitou vazões simuladas bem próximas aos valores observados. O modelo apresentou na fase de calibração uma habilidade avaliada como adequada e boa, de acordo com Motovilov *et al* (1999 *apud* ROY, 2013). Foi obtido um valor médio do coeficiente *Nash* entre os dois pontos de análise e igual a 0,822 com uma maior indicação na SB12 (0,836). A relação entre a série simulada e observada indicou uma correlação muito forte, com coeficiente médio de 0,921 e uma amplitude mediana entre os valores simulados e observados de 0,57, conforme a REQM. O modelo exibiu uma tendência em subestimar a vazão observada na fase de calibração; contudo, os picos de cheias foram simulados satisfatoriamente.

Os hidrogramas da Figura 32 apresentam uma comparação entre as séries observada e simulada. Constatou-se, na análise, uma adequação do ajuste dos parâmetros e, conseqüentemente, uma boa simulação dos picos de cheias.

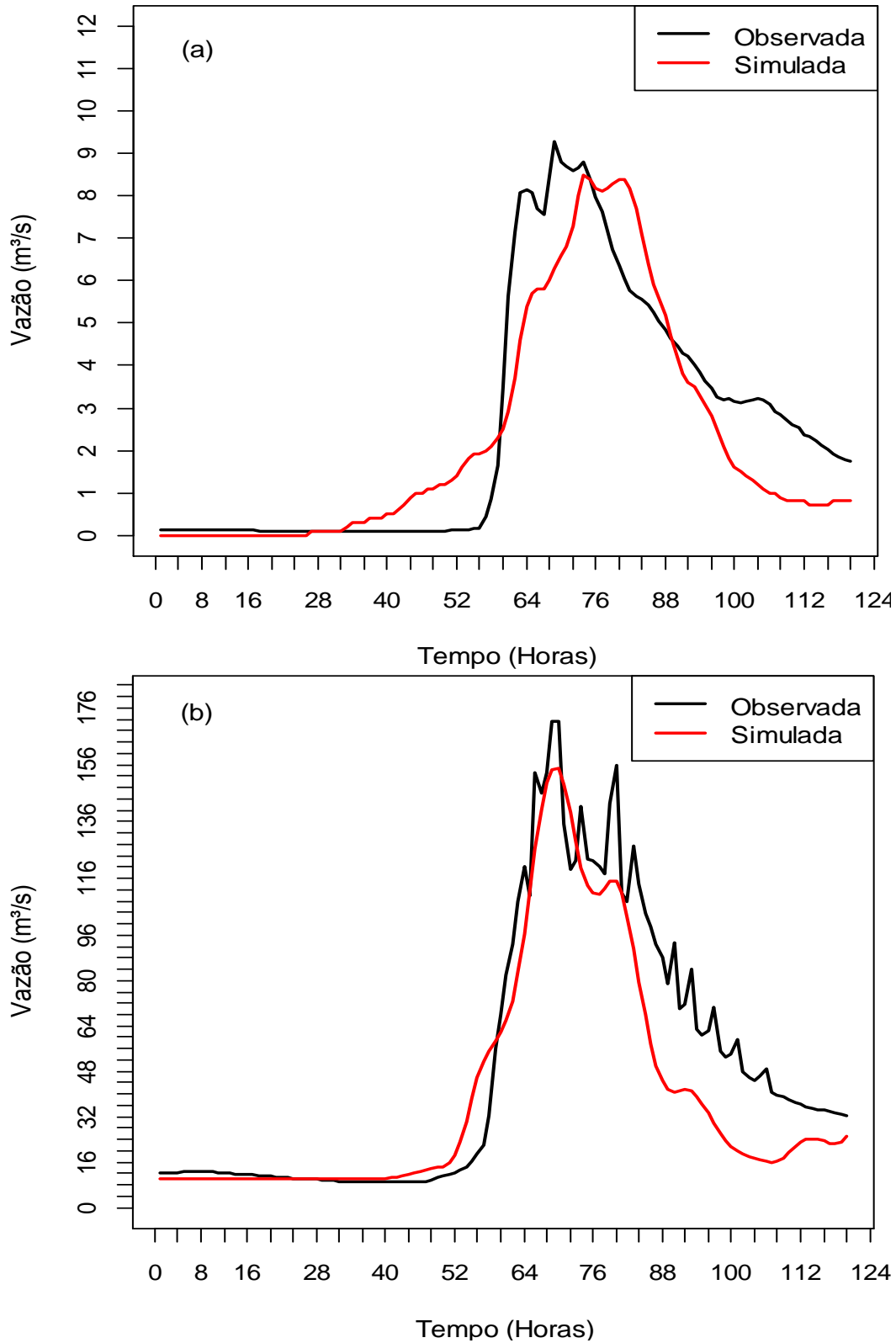
Ressalta-se, ainda, que na fase de calibração um dos aspectos mais importante na simulação de vazão para um sistema de alerta é a previsão dos hidrogramas e a ordem de grandeza de seus picos. Desse modo, procurou-se um ajuste que melhor evidencie essas duas propriedades.

Tabela 14 – Critérios estatísticos avaliados na calibração dos parâmetros do HMS na Sub-bacia SB9 e SB12 com precipitação observada.

Critérios Estatísticos	SB9	SB12
	Calibrado	Calibrado
Nash	0,809	0,836
Coef_Cor	0,905	0,938
REQM	0,073	1,067
Viés	-0,184	-5,837

Fonte: Autor (2016).

Figura 32 – Vazão observada *versus* simulada (com precipitação observada) na fase de calibração do HMS, com a contribuição da precipitação em toda a bacia e ponto de análise na PCD da SB9 (a) e SB12 (b). (Evento: 01 a 05 de Julho de 2013).



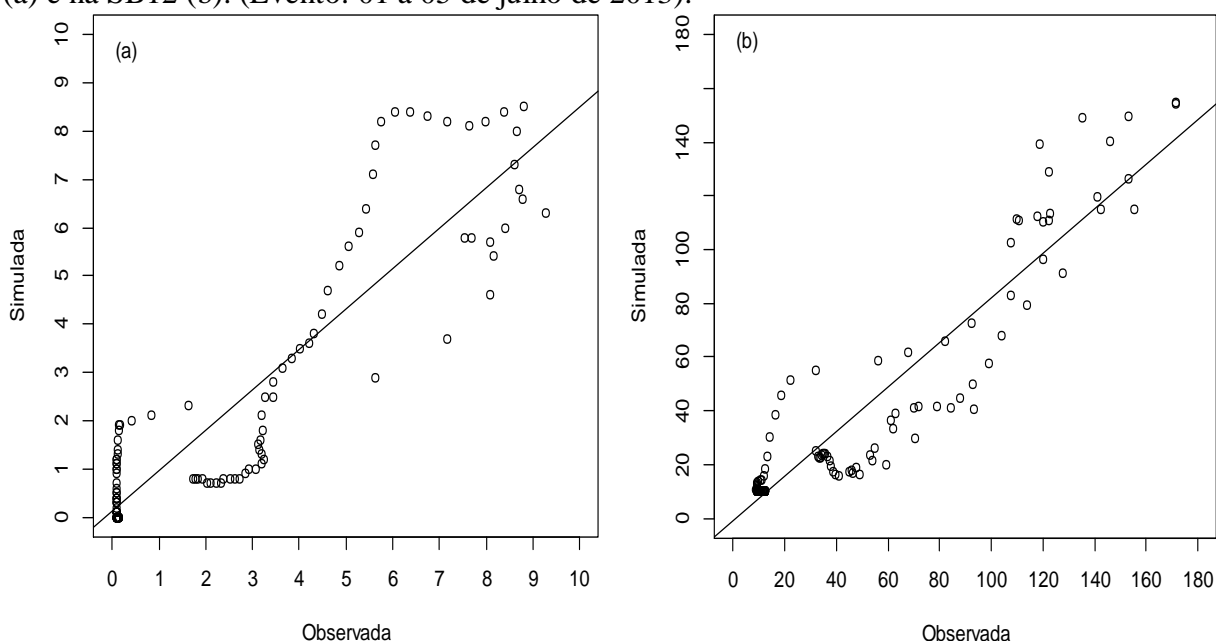
Fonte: Autor (2016).

Meenu *et al* (2013) calibraram o HEC-HMS em um estudo que buscou avaliar os impactos hidrológicos das alterações climáticas na bacia hidrográfica do rio Tunga-Bhadra na Índia. Os autores encontraram resultados estatísticos compatíveis com os apresentados neste trabalho na fase de calibração, com vazões simuladas suficientemente próximas. Os testes estatísticos de consistência apresentaram uma previsibilidade satisfatória com *Nash-Sutcliffe* igual a 0,48 e um coeficiente de correlação de 0,85. Segundo Oleyiblo e Li (2010), apesar da estrutura simples do HEC-HMS, o modelo quando calibrado se torna uma ferramenta poderosa na previsão de cheias.

Roy *et al* (2013) alcançaram valores de 0,72 para o *Nash-Sutcliffe* e 0,70 para o coeficiente de determinação, calibrando o HEC-HM para previsão de vazão sazonal em uma bacia hidrográfica no leste da Índia.

A Figura 33 apresenta os gráficos de dispersões que exibem a associação entre o conjunto de dados observados e simulados. O coeficiente de correlação entre os dados simulados e observados no ponto de análise na SB9 (Figura 33a) foi de 0,905 e de 0,938 na SB12 (Figura 33b). Gráficos com características semelhantes foram encontrados por Beling (2013), na análise do desempenho do modelo SWMM5 acoplado ao calibrador PEST na bacia do Arroio Cancela/RS.

Figura 33 – Gráficos de dispersão entre as séries das vazões observadas e simuladas na SB9 (a) e na SB12 (b). (Evento: 01 a 05 de julho de 2013).



Fonte: Autor (2016).

5.5 Validação do modelo hidrológico no HEC-HMS

A fase de validação consistiu na simulação do modelo com os parâmetros ajustados para verificar a consistência da calibração. O período de verificação avaliado foi de 9 a 16 de julho de 2013, contabilizando 192 horas. Os critérios estatísticos avaliados foram os mesmos utilizados na etapa de calibração. Os resultados da análise estão organizados na Tabela 15. De modo similar, a fase de calibração, a análise na secção de medida na SB12 exibiu o melhor *Nash* (0,809) entre os pontos avaliados. Em geral, o modelo apresentou uma previsibilidade satisfatória, segundo Motovilov *et al* (1999) e Collischonn (2001), com um coeficiente *Nash* médio de 0,70 entre os dois pontos de análise. Os picos simulados de vazão foram bem visualizados pelo modelo (Figura 34); embora a intensidade do pico na SB9 (Figura 34a) tenha se mostrado abaixo do pico observado, a habilidade preditiva do modelo nesta sub-bacia é classificada como satisfatória ($Nash = 0,591$), de acordo com Motovilov *et al* (1999).

As séries de vazão (Simulada e Observada) proporcionaram uma baixa variabilidade conjunta, ao indicarem uma correlação muito forte entre as duas séries, com valor médio de 0,93. Segundo Callegari-Jacques (2003), valores entre 0,90 e 1,00 correspondem a uma associação muito forte. No entanto, apesar da boa correlação entre a série simulada e a observada, o modelo subestimou os valores observados de vazão, de acordo com o critério Viés, porém, observou-se uma baixa discrepância entre as duas séries de acordo com a REQM. Dessa forma, os resultados apresentados na fase de validação atestam a calibração do modelo de forma aceitável. Os picos de cheias foram detectados em tempo e com intensidade cabível.

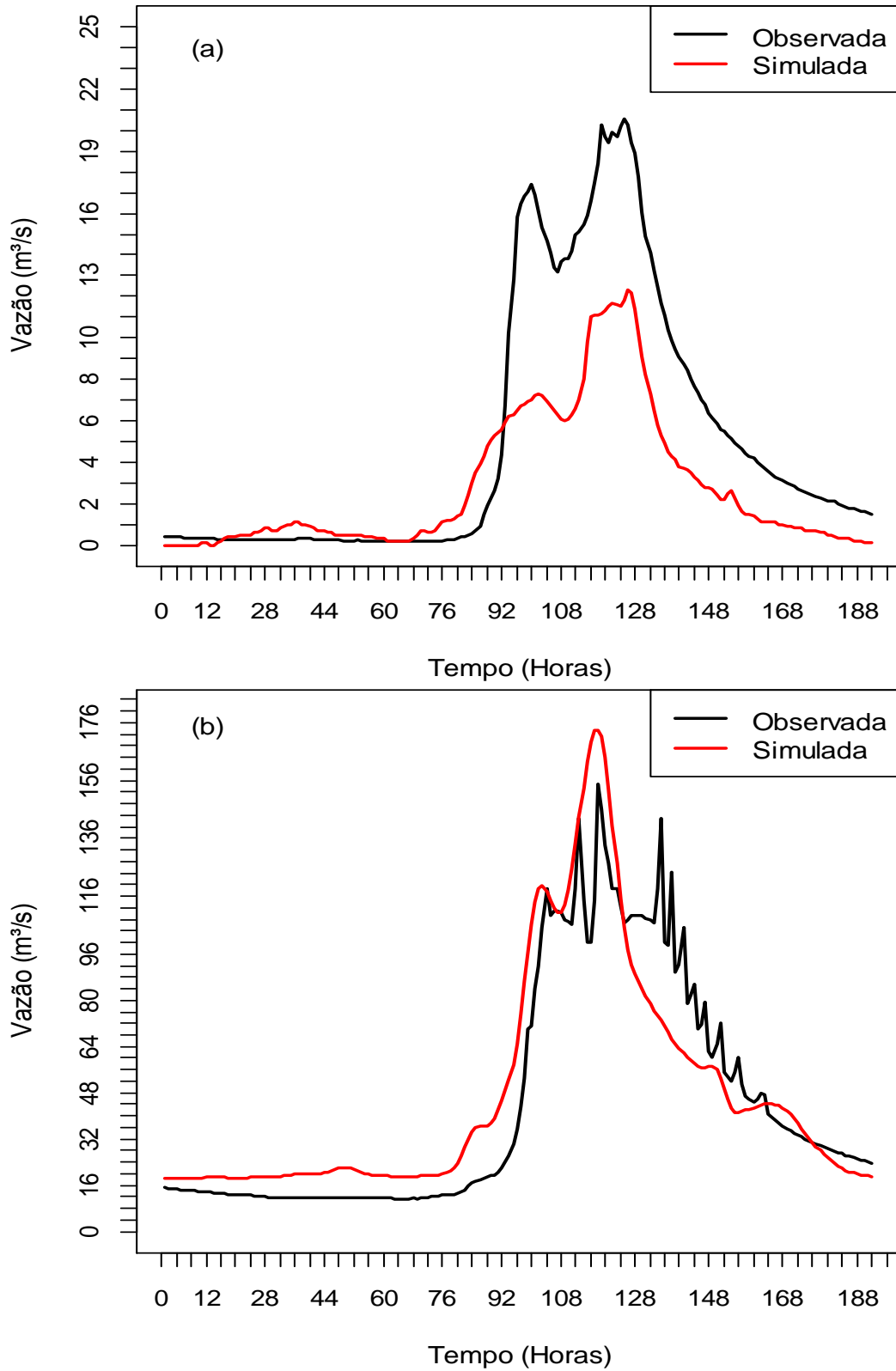
Diante dos resultados alcançados na fase de validação, foi então implementada a fase de acoplamento entre o modelo atmosférico WRF e hidrológico com a perspectiva de avaliar a técnica como uma ferramenta de previsão de eventos hidrológicos na bacia do rio Paraíba do Meio.

Tabela 15 – Critérios estatísticos avaliados na validação dos parâmetros do HMS na Sub-bacia SB9 e SB12 com precipitação observada.

Critérios Estatísticos	SB9	SB12
	Validado	Validado
Nash	0,591	0,809
Coef_Cor	0,945	0,908
REQM	0,295	1,251
Viés	-2,257	-3,866

Fonte: Autor (2016).

Figura 34 – Vazão observada *versus* simulada (precipitação observada) na fase de validação do HMS, com contribuição da precipitação em toda a bacia e com análise na PCD da SB9 (a) e SB12 (b). (Evento: de 9 a 16 de julho de 2013).

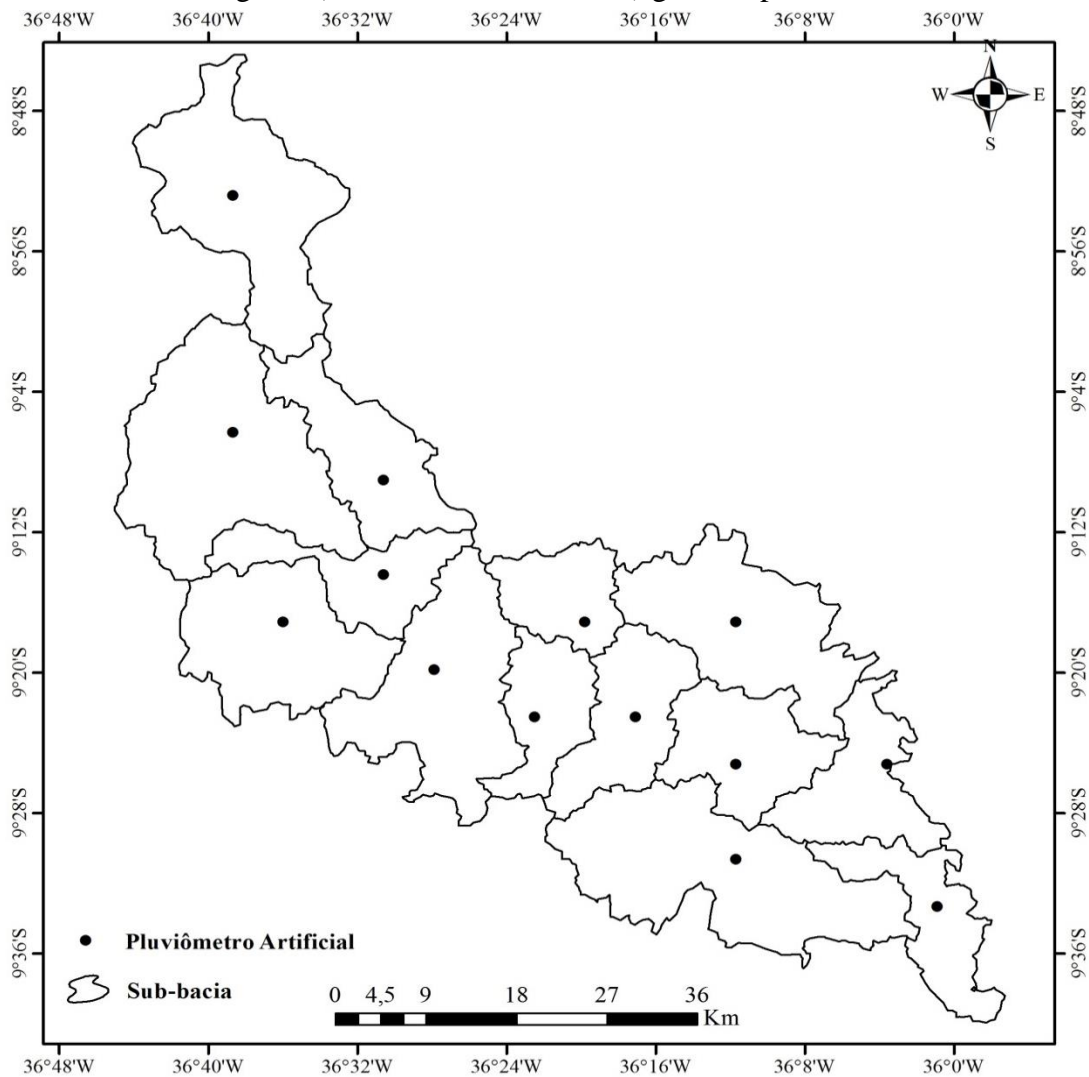


Fonte: Autor (2016).

5.6 Acoplamento unidirecional entre o modelo hidrológico e o WRF

Após a fase de calibração e validação, o modelo foi, então, utilizado para simular as vazões do rio Paraíba do Meio, utilizando-se como forçante do modelo hidrológico as chuvas simuladas pelo modelo atmosférico WRF. Para tanto, selecionou-se um ponto de grade (Pluviômetros Artificiais) gerado pelo modelo WRF em cada uma das sub-bacias, para funcionar como pluviômetro (Figura 35).

Figura 35 – Pontos de grade (Pluviômetros Artificiais) gerados pelo modelo WRF.



Fonte: Autor (2016).

O acoplamento entre o modelo atmosférico WRF e o modelo hidrológico formulado no HEC-HMS objetivou o prognóstico da vazão em curtíssimo prazo. O período de execução do acoplamento constituiu-se entre 01 a 05 de Julho de 2013.

A utilização dos critérios estatísticos já discutidos anteriormente buscou avaliar a eficiência do acoplamento unidirecional entre os dois modelos. Os resultados da avaliação estão organizados na Tabela 16. Na análise, a técnica do acoplamento aplicada na bacia do rio Paraíba do Meio mostrou-se apropriada, de acordo com os resultados estatísticos obtidos. As implicações mostram uma habilidade entre adequada e satisfatória, de acordo com o coeficiente de eficiência *Nash-Sutcliffe*, o que indicou 0,749 para o ponto de avaliação na SB9 e 0,572 para a SB12, segundo a classificação proposta por Motovilov *et al* (1999), que considera adequado e bom, se o valor do coeficiente de *Nash* for igual ou superior a 0,75, e satisfatório, se o valor estiver entre 0,36 e 0,75. O indicador HSS corrobora com o coeficiente *Nash* em classificar como satisfatória a habilidade do sistema acoplado na seção da SB12. O sistema também proporcionou uma PA de 84% na simulação de vazão na seção da SB12 e 61% na SB9.

Tabela 16 – Critérios estatísticos avaliados no acoplamento do HMS (Hidrológico) e WRF (Atmosférico) na Sub-bacia SB9 e SB12 no período de 01 a 05 de julho de 2013.

Critério Estatístico	SB9	SB12
	Acoplado	Acoplado
Nash	0,75	0,57
HSS	0,25	0,73
PA	61%	84%
Coef_Cor	0,76	0,75
EQM	0,11	2,49
Viés	-0,24	13,15

Fonte: Autor (2016).

As correlações mostram valores de 0,760 e 0,754 para a SB9 e SB12, respectivamente, em todo período avaliado, de modo a indicar uma baixa variação conjunta entre as duas séries, o que, conseqüentemente, gerou uma forte correlação, de acordo com Callegari-Jacques (2003).

Rodrigues (2012) buscou avaliar a eficiência do acoplamento entre o modelo atmosférico WRF e o modelo hidrológico MGB-IPH na bacia do rio Paraíba do Meio, na simulação de vazão em escala diária e sazonal, e encontrou coeficiente de correlação de 0,422 na comparação com os valores observados no posto de Viçosa (correspondente a SB9) e 0,566 para o posto de Atalaia (correspondente à sub-bacia SB12).

Avaliando as vazões simuladas geradas pelo acoplamento do modelo atmosférico RAMS com o modelo hidrológico SMA do HEC-HMS, na bacia hidrográfica do Alto

Jaguaribe no estado do Ceará, Cabral *et al* (2016) encontraram um coeficiente de correlação de 0,48.

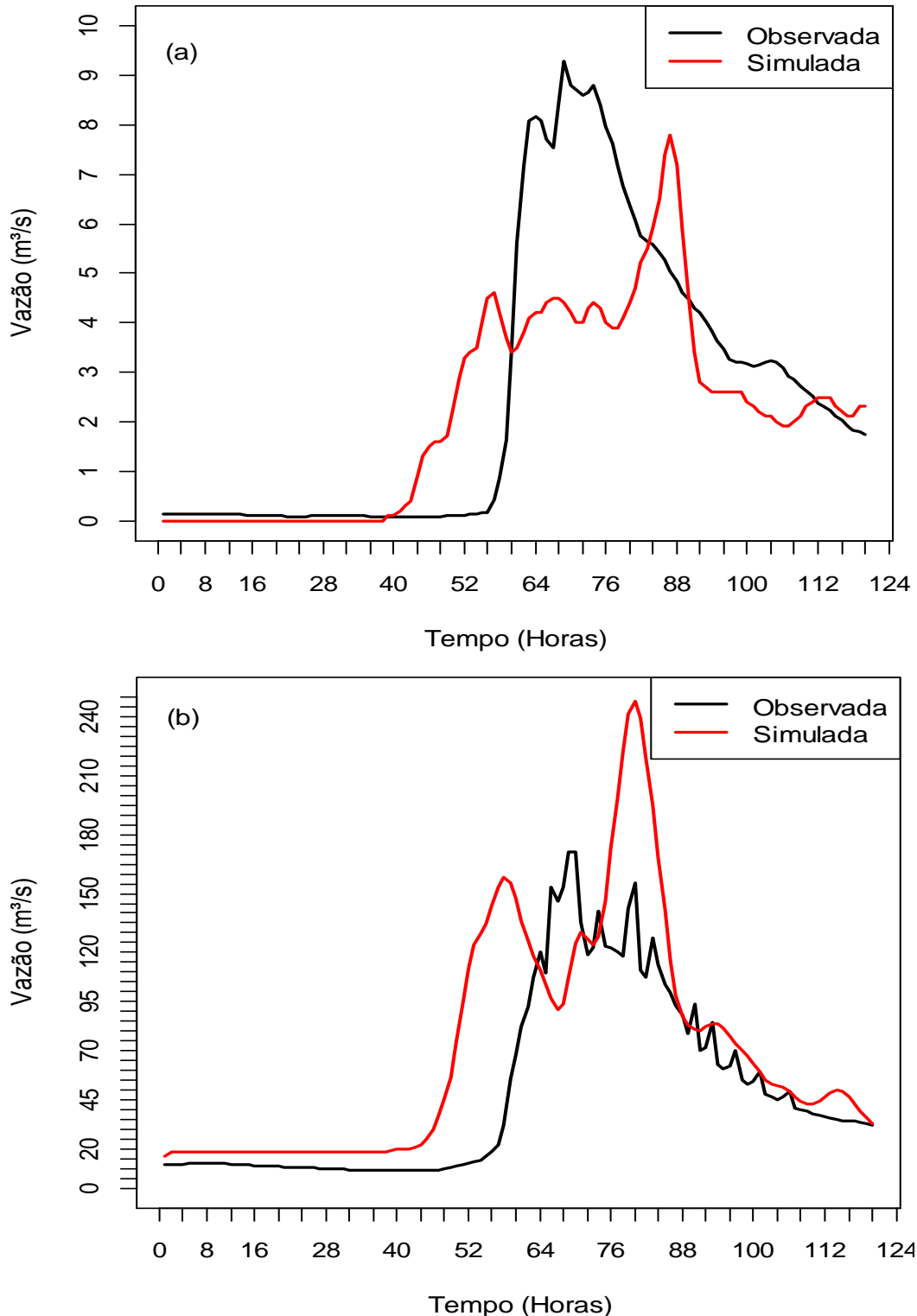
O acoplamento nesta pesquisa indicou uma leve subestimação dos valores observados, de acordo o índice Viés, na SB9. A relação entre a série observada e simulada com precipitação simulada é considerada satisfatória, tendo em vista o baixo valor do REQM. Na análise da SB12, a técnica superestimou as vazões observadas, indicando valores mais elevados dos critérios Viés e REQM (Tabela 16).

A Figura 36 apresenta os hidrogramas das vazões observadas *versus* simuladas com precipitações simuladas. Na análise, foi possível visualizar a comparação entre os picos observados e simulados. Embora as previsões tenham apresentado dificuldades em simular os picos dos hidrogramas, a técnica conseguiu captar as variações das vazões na bacia ao longo do período analisado.

Diante da avaliação dos resultados obtidos pelo acoplamento unidirecional, tornou-se evidente que existe um grande potencial na utilização dessa metodologia como ferramenta no auxílio à previsão hidrológica baseada nas previsões meteorológicas. Contudo, são necessários maiores estudos (ou testes) quanto à configuração do modelo atmosférico, já que as previsões meteorológicas (precipitações) são um fator determinante ao bom resultado do acoplamento. Tal fato se constata nas Figuras 36a e 36b, nas quais foi possível inferir que a convergência das séries das vazões simuladas à observada é função direta das chuvas simuladas pelo modelo WRF, visto que foram obtidos hidrogramas mais convergentes nas fases de calibração e validação do modelo hidrológico.

Segundo Haberts *et al* (2004), apesar de todos os avanços na modelagem atmosférica, a precipitação ainda continua sendo uma das variáveis mais difíceis de prever, uma vez que seus processos possuem grande variabilidade temporal e espacial. Contudo, a despeito da grande dependência dos valores das precipitações simuladas pelo modelo WRF, os resultados se mostraram promissores quanto à criação de um sistema de alerta a inundações mediante acoplamento.

Figura 36 – Vazão observada *versus* simulada (precipitação simulada) no acoplamento do modelo HMS (Hidrológico) e WRF (Atmosférico), com contribuição da precipitação em toda a bacia e com análise na PCD da SB9 (a) e SB12 (b). (Evento: 01 a 05 de julho de 2013).

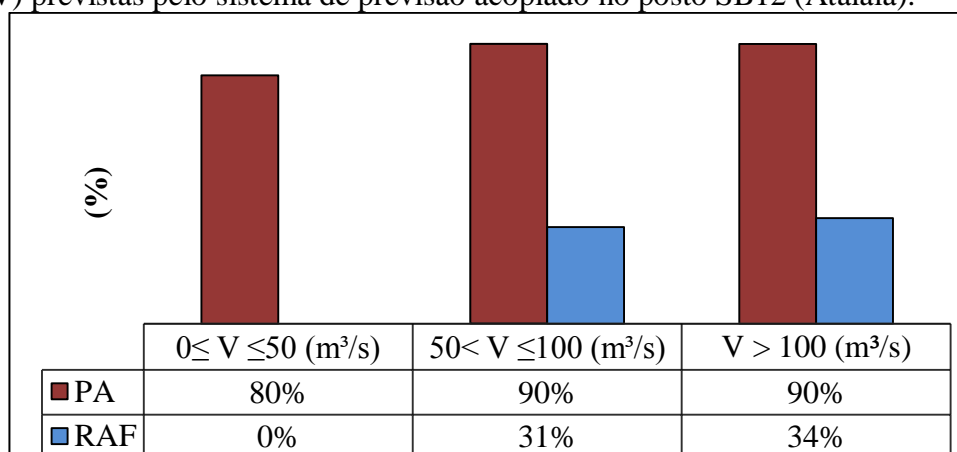


Fonte: Autor (2016).

A Figura 37 apresenta a PA e a RAF correspondente às simulações multicategorizadas geradas pelo sistema de previsão acoplado na seção de medidas, referente

à cidade de Atalaia. O sistema proporcionou uma PA de 80% para as vazões entre zero (0) a $50\text{m}^3/\text{s}$ com uma RAF de zero por cento (0%). Para as vazões entre 50 e $100\text{m}^3/\text{s}$ e superior a $100\text{m}^3/\text{s}$, a PA foi de 90%, com uma RAF de 31% e 34% respectivamente. As análises demonstraram uma acurácia satisfatória do sistema acoplado para as previsões de vazão na cidade de Atalaia, sobretudo nas vazões de picos.

Figura 37 – Proporção de acerto (PA) e Razão de alarme falso (RAF) para as três classes de vazão (V) previstas pelo sistema de previsão acoplado no posto SB12 (Atalaia).



Fonte: Autor (2016).

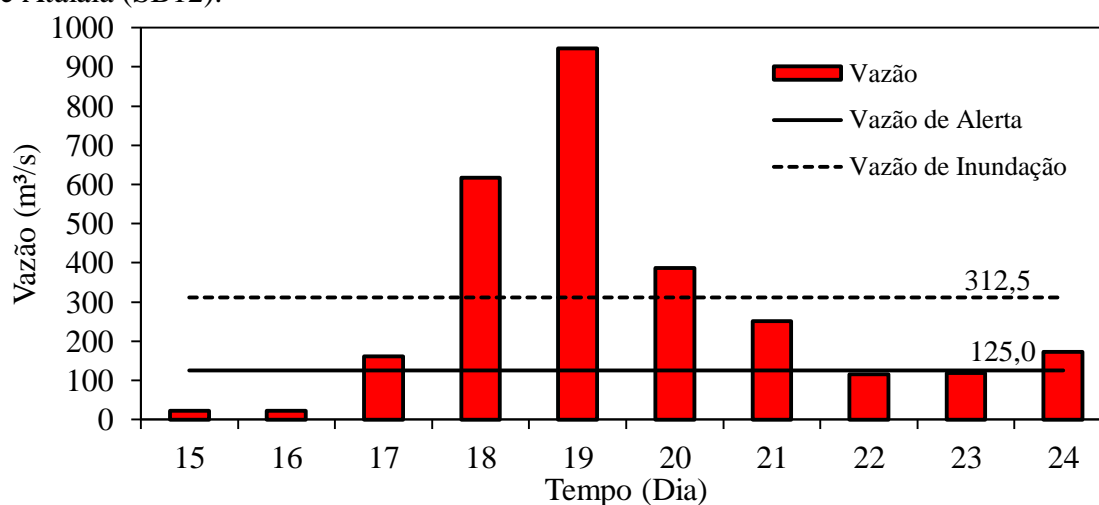
5.7 Alerta à Inundação

A Figura 38 apresenta as vazões de alerta e inundação. As estimativas das medidas foram efetuadas empiricamente com base no evento ocorrido entre os dias 18 a 20 de junho de 2010. O evento foi tomado como referência por ter alcançado uma cota de 610cm e vazão máxima superior a $948\text{m}^3/\text{s}$. A vazão de alerta foi estabelecida em $125\text{m}^3/\text{s}$, correspondente a uma cota de 250cm, enquanto a vazão de inundação estabeleceu-se em $312,5\text{m}^3/\text{s}$, valor correspondente à cota de 350cm. Logo, diante dos valores de referência estimados, quando as vazões do rio Paraíba do Meio na cidade de Atalaia (Ponto de análise correspondente a SB12) atingir um valor igual a $125\text{m}^3/\text{s}$, um alerta sobre um risco potencial à inundação será emitido à população pela Coordenadoria Municipal de Defesa Civil (COMDEC) de Atalaia. Posteriormente, será emitido o alerta à inundação se o valor limite ($312,5\text{m}^3/\text{s}$) do escoamento for atingido.

A implementação e a operação de um sistema de alerta na bacia do rio Paraíba do Meio possibilitarão minimizar os agravos econômicos e evitar perdas de vidas na região, ao se prevenir com antecedência de curto prazo os eventos extremos de vazão, de modo a se diminuir os prejuízos pela redução da vulnerabilidade física e social, dentro de uma

antecipação consentida. A emissão do alerta permitirá uma potencial redução dos riscos à população que vive em áreas vulneráveis aos eventos de inundações, com o fim de alertá-la sobre a possibilidade de transbordamento do rio Paraíba do Meio. O sistema tornará possível a articulação do plano de contingência de maneira mais eficiente, pela orientação e organização da resposta do órgão responsável durante os eventos de cheia, no caso, a COMDEC da região.

Figura 38 – Hidrograma gerado para estimativa da vazão de alerta e inundação para a cidade de Atalaia (SB12).



Fonte: Autor 2016.

Ainda ao se analisar as vazões com precipitações simuladas, os resultados mostraram hidrogramas com ajustes satisfatórios aos observados e vazões de pico calculadas dentro dos limites aceitáveis para um sistema de previsão, os quais foram obtidos em cada um dos dois pontos de análise (Figura 39). No primeiro ponto (PCD de Viçosa na SB9), o pico simulado ($7,8 \text{ m}^3/\text{s}$) subestimou em 15% o observado ($9,29 \text{ m}^3/\text{s}$). Já no segundo ponto (PCD da SB12), foi observada uma superestimação do pico simulado ($247,9 \text{ m}^3/\text{s}$) em relação ao observado ($171,4 \text{ m}^3/\text{s}$). Quanto ao tempo de antecedência, o modelo antecipou em oito horas a simulação na SB12 com dados da rede telemétrica existente na região.

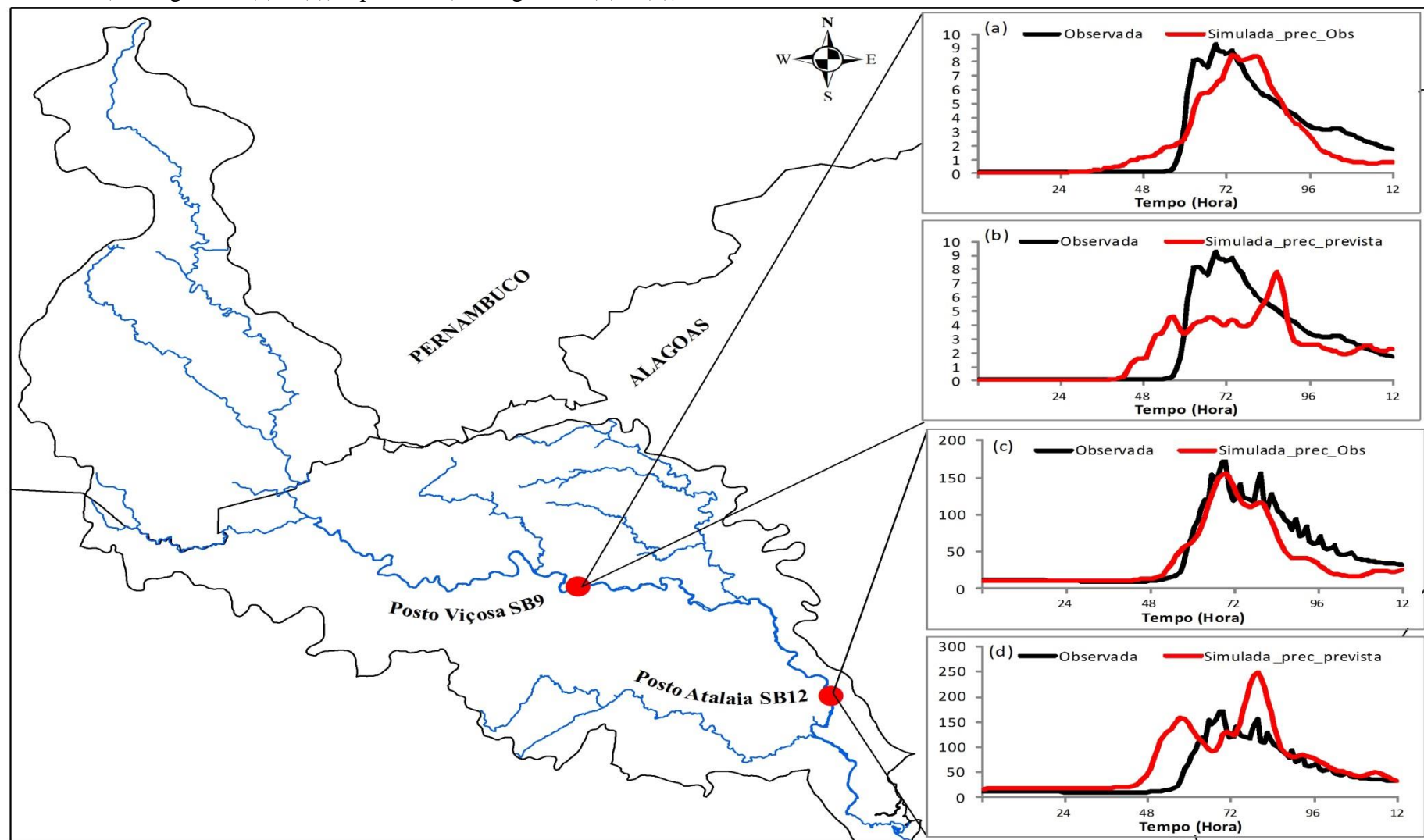
Para as vazões simuladas com precipitação simulada, e com antecedência de 120 horas e intervalo de previsão a cada hora, o sistema acoplado antecipou o início do aumento da vazão na SB12, em cerca de 12 horas antes da vazão observada e após o evento de precipitação. Em razão dessa antecipação, a vazão de alerta ($125 \text{ m}^3/\text{s}$) foi antecipada em até 10 horas em relação ao alerta em condições ideais de precipitação prevista. Quanto ao pico máximo de vazão antecipada, constatou-se um atraso de até 10 horas em relação ao observado

no segundo ponto de análise (SB12), fato este que torna ainda mais evidente a dependência direta do sistema acoplado aos resultados do modelo atmosférico.

Porém, apesar da aparente necessidade de maiores ajustes ao modelo WRF, um sistema de alerta composto pelo acoplamento entre a modelagem hidrológica e atmosférica apresenta-se quando comparado a um sistema que utiliza dados observados de rede telemétrica, com a vantagem de proporcionar uma maior antecedência nas previsões, visto que o tempo de previsão é fator primordial em um sistema de alerta. Além disso, a técnica avaliada proporciona um baixo custo econômico em sua implementação, tendo em vista que as principais ferramentas (Modelos: HEC-HMS e WRF) utilizadas, nesse caso, são de livre acesso.

Hoje no Brasil, em sua totalidade, os sistemas de alerta a enchentes e inundações em operação utilizam basicamente dados observados de redes telemétricas e radares meteorológicos, como exemplo o Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo (SAISP) e o Sistema de Alerta de Cheias da Bacia do Itajaí (CEOPS). Por essa razão, o presente trabalho propôs como ferramenta de previsão de vazão na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio a técnica do acoplamento unidirecional de um modelo hidrológico formulado no programa HEC-HMS e o modelo atmosférico de mesoescala WRF.

Figura 39 – Localização geográfica dos pontos de análises com seus respectivos hidrogramas observados e simulados com precipitação observada (Hidrogramas (a) e (c)) e prevista (Hidrogramas (b) e (d)).



Fonte: Autor (2016).

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A presente pesquisa teve como objetivo principal avaliar o acoplamento unidirecional entre o modelo atmosférico WRF e um modelo hidrológico concebido no programa HEC-HMS na previsão de vazão em curto prazo, com o propósito de desenvolvimento de um sistema de alerta a inundações na bacia do rio Paraíba do Meio. As seções de medidas utilizadas na avaliação das previsões foram as estações fluviopluiométricas (PCDs) da cidade de Atalaia e Viçosa, que possuem um registro histórico de dados desde 2010 até o presente, com intervalo de 15 em 15 minutos.

A seguir, são apresentadas as principais conclusões que foram obtidas baseadas tanto nas visualizações dos resultados sob a forma de gráficos quanto nas análises dos critérios estatísticos utilizados.

Na configuração do modelo atmosférico de mesoescala WRF, o estudo demonstrou que a melhor combinação paramétrica entre os esquemas de microfísica e convecção para previsão de chuva em curto prazo na bacia do rio Paraíba do Meio foram os esquemas propostos por *Purdue Lin* (Microfísica) associado ao *Grell 3D* (Convecção). Os critérios estatísticos utilizados na avaliação das chuvas previstas pelo modelo WRF com a microfísica de *Lin et al* (1983) e a convecção de *Grell* (1993) apresentaram valores de $r=0,44$, $Viés=-0,38$, $REQM=2,11$. Os valores satisfazem a média entre os dois pontos analisados na pesquisa. O modelo atmosférico também exibiu uma previsibilidade satisfatória na previsão em escala horária, segundo os indicadores H e HSS.

De modo geral, foram alcançados resultados estatisticamente aceitáveis dentro da escala de tempo utilizada. Em suma, a avaliação do modelo WRF na previsão de chuva em curto prazo foi apresentada como satisfatória.

Na configuração do modelo hidrológico concebido no programa HEC-HMS, a bacia do rio Paraíba do Meio foi discretizada em nove trechos e 14 sub-bacias, com áreas variando entre $109,64\text{km}^2$ e $383,40\text{km}^2$. A calibração e validação do modelo foram efetuadas em dois pontos ao longo da bacia, nas seções correspondentes às cidades de Viçosa e Atalaia. Os resultados mostraram-se satisfatórios, com coeficientes de correlações superiores a 0,90 nas duas etapas. O modelo hidrológico foi classificado com uma eficiência satisfatória nas previsões em curto prazo, de acordo com o critério *Nash-Sutcliffe*.

Diante dos resultados obtidos na avaliação do modelo WRF e do modelo hidrológico, realizou-se o acoplamento unidirecional, utilizando-se a saída do modelo atmosférico como forçante do modelo hidrológico. Os resultados do acoplamento foram

avaliados visualmente e estatisticamente, para as simulações executadas em um horizonte temporal de 120 horas correspondente ao intervalo da previsão atmosférica. Na avaliação das medidas estatísticas, obtiveram-se coeficientes de correlações superiores a 0,75 nas duas seções de avaliação. A previsibilidade do acoplamento foi classificada como satisfatória (Nash=0,749 e Nash=0,572, respectivamente), de acordo com a classificação adotada por Motovilov *et al* (1999) e Collischonn (2001).

Diante do exposto, e para fim do objetivo proposto, conclui-se que a utilização do acoplamento unidirecional entre o modelo atmosférico WRF e o modelo hidrológico concebido no HEC-HMS é uma metodologia promissora no prognóstico de vazão em curto prazo. Dessa forma, e após os novos testes sugeridos para modelo WRF, propõe-se o método como instrumento basal no desenvolvimento de um sistema de alerta às inundações na bacia do rio Paraíba do Meio, de modo a vir a auxiliar as medidas que buscam reduzir os danos causados à população residente na região diante dos eventos de inundações.

Como continuidade para este estudo e recomendações no sentido de aperfeiçoar os resultados obtidos, sugere-se:

Testar o processamento do modelo WRF utilizando diferentes configurações de parametrizações de camada limite superficial, camada limite planetária, camada superficial do solo e radiação de ondas longas e curtas, de modo a encontrar um conjunto completo de parâmetros, que satisfarão as condições locais da região exigidas pelo modelo WRF.

Utilizar como condições iniciais e de contorno no modelo atmosférico WRF dados com melhor resolução horizontal (0,5 graus), com a finalidade de refinar as resoluções horizontais das grades aninhadas.

Obter imagens de alta resolução, para uma melhor análise do uso e ocupação do solo na bacia do rio Paraíba do Meio, assim com monitoramento da ocupação desordenada ao longo do rio.

Realizar uma análise de persistência nas previsões de chuva e vazão gerada via acoplamento.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D. M. F., **Sistema de gestão de risco de inundações urbanas baseado em web mapping**. 88 Laudas, Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP). São Carlos-SP. 2010. Disponível em: <file:///C:/Users/Andr%C3%A9/Downloads/Almeida_Diogo_Martino_Fernandes.pdf>. Acesso em: 22 agosto de 2015.
- ALMEIDA, VINÍCIUS ALBUQUERQUE DE E MARTON, EDILSON. Chuvas Intensas em Santa Catarina: Análise Sinótica de um Evento Extremo e Simulação Numérica com o Modelo Atmosférico WRF. **Anu. Inst. Geocienc.** [online]. 2014, vol.37, n.2, pp. 169-179. ISSN 0101-9759. http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.11137/2014_2_169_179.
- ALVES, J. M. B.; CAMPOS, J. N. B.; Servain, J. . Reservoir Management Using Coupled Atmospheric and Hydrological Models: The Brazilian Semi-Arid Case. **Water Resources Management**, v. 26, p. 1365-1385, 2012.
- ALVES, J. M. B. Um vórtice ciclônico de altos níveis sobre o Nordeste do Brasil e Atlântico adjacente no verão de 1999. **Rev. Bras. Meteor.**, v.16, n.1, p.115-122, 2001.
- ANTHES, R. A., KUO, Y. H., HSIE, E. Y., LOW-NAM, S., BETTGE, T.W.. Estimation of skill and uncertainty in regional numerical models. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**. Vol. 115, pp. 763-806. 1989.
- ARGÜESO, DANIEL, JOSÉ M. HIDALGO-MUÑOZ, SONIA R. GÁMIZ-FORTIS, MARÍA JESÚS ESTEBAN-PARRA, JIMY DUDHIA, YOLANDA CASTRO-DÍEZ,: Evaluation of WRF Parameterizations for Climate Studies over Southern Spain Using a Multistep Regionalization. **J. Climate**, **24**, 5633–5651. 2011.
- BARNSTON, A. G.. Correspondence among the correlations, RMSE, and Heidke forecast verification measures; refinement of the Heidke score. **Wea. Forecasting**, **7**, 699–709. 1992.
- BARTHOLMES, J. AND TODINI, E.: Coupling meteorological and hydrological models for flood forecasting, Hydrol. **Earth Syst. Sci.**, **9**, 333-346, doi:10.5194/hess-9-333-2005, 2005.
- BARTHOLMES, J. AND TODINI, E.: Coupling meteorological and hydrological models for flood forecasting, Hydrol. **Earth Syst. Sci.**, **9**, 333-346, doi:10.5194/hess-9-333-2005, 2005.
- BAZZO, W. A.; PEREIRA, L. T. V. **Introdução à Engenharia, Conceitos, Ferramentas e Comportamentos**. 4. ed. Florianópolis: EdUFSC, 2013. v. 2500. 296p.
- BELING, F. A.. **Análise do desempenho do modelo SWMM5 acoplado ao calibrador PEST na bacia do Arroio Cancela/RS**. 2013. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal de Santa de Maria/Rio Grande do Sul. 2013.
- BELJAARS, A.C.M., The parameterization of surface fluxes in large-scale models under free convection. Quart. **J. Roy. Meteor. Soc.**, **121**, 255–270, 1994.

BENDER, F. D. **Verificação da Previsão do tempo em São Paulo com o Modelo Operacional WRF**. 2012. 164 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica e Ciências Atmosféricas). Universidade de São Paulo - USP. São Paulo, 2012.

BENOIT, R., KOUWEN, N., YU, W., Chamberland, S., and Pellerin, P.: Hydrometeorological aspects of the Real-Time Ultrafinescale Forecast Support during the Special Observing Period of the MAP, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 7, 877-889, doi:10.5194/hess-7-877-2003, 2003.

BERZ, GERHARD. **Flood Disasters: Lessons form the Past – Worries for the Future**. In: F. Toensmann e M. Koch (eds.) *River Flood Defence*. Kassel: Herkules Verlag, V2. p. F1-F10. (2000).

BETTS, A. K.; M. J. MILLER,: A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and Arctic air-mass data sets. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 112, 693–709. 1986.

BEVEN, K. J. **Rainfall-Runoff Modelling: the primer**. New York: John Wiley & Sons, 360 p. 2001.

BLAINSKI, E.; ARAUJO, I.; MELLO, M. F.; BORGES, R. C.. Sistema de monitoramento e previsão hidrológica do Rio Araranguá - SC. In: XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2011, Maceió. *Anais...* Maceió/AL: 2011.

BLOCK, PAUL J.; SOUZA FILHO, FRANCISCO ASSIS; SUN, LIQIANG; KWON, HYUN-HAN. A Streamflow Forecasting Framework using Multiple Climate and Hydrological Models. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 45, p. 828-843, 2009.

BRAGA, A. C. F. M.; GALVAO, C. O.; ARAÚJO, E.; SOUZA, E. P.; OLIVEIRA, K. F.; CIRNE, W. Acoplamento operacional de modelos atmosféricos, hidrológicos e de gerenciamento de recursos hídricos. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, 2005, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza/CE. 2005.

BRATLEY, P.; FOX, B. L.; SCHRAGE, L. E. **A guide to simulation**. 2nd ed. Chicago: Springer-Verlag, 424 p. 1987.

BRAVO, J. M.; ALLASIA, DANIEL ; COLLISCHONN, WALTER ; TASSI, R. ; MELLER, A. ; TUCCI, CARLOS . Avaliação visual e numérica da calibração do modelo hidrológico IPH II com fins educacionais. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2007, São Paulo. *Anais ...* Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2007. v. 1.

BRAVO, J., PAZ, A., COLLISCHONN, W., UVO, C., PEDROLLO, O., AND CHOU, S.. Incorporating Forecasts of Rainfall in Two Hydrologic Models Used for Medium-Range Streamflow Forecasting. *J. Hydrol. Eng.*, 14(5), 435–445. 2009.

BRIAN ETHELTON AND PABLO SANTOS. Sensitivity of WRF Forecasts for South Florida to Initial Conditions. *Wea. Forecasting*, 23, 725–740. 2008.

BRIAN, E.; PABLO, S.. Sensitivity of WRF Forecasts for South Florida to Initial Conditions. **Wea. Forecasting**, 23, 725–740. 2008.

BULLETIN, T. **Linear Theory of Hydrologic Systems**. Agricultural Research Service. United States Department of Agriculture. 1973. p. 341.

CABRAL, S. L.; CAMPOS, J. N. B.; SILVEIRA, C. S.; PEREIRA, J. M. R.. INTERVALO DE TEMPO DE MÁXIMA PREVISIBILIDADE DA PRECIPITAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO. **Revista Brasileira de Meteorologia** (Impresso), 2016.

CALLEGARI-JACQUES, SIDIA M. Bioestatística: princípios e aplicações. Porto Alegre: **Artemed**, 255p. 2003.

CALVETTI, LEONARDO. **Previsão hidrometeorológica probabilística na bacia do alto Iguaçu – PR com os modelos WRF e TopModel**. 2011. 133 f. Tese (Doutorado Meteorologia) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

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

CASTRO, A. L. C; CALHEIROS, L. B.; CUNHA, M. I. R.; BRINGEL M. L. N. C. **Manual de Desastres/Desastres Naturais**. Ministério da Integração Nacional/Secretária Nacional de Defesa Civil.. p. 34-48. 2007.

CASTRO, A. L. **Manual de desastres: desastres naturais**. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2003.

CEPEDa/UFSC. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012: Volume Brasil / Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres**. Florianópolis: CEPED UFSC, 126 p.: il. color. 22 cm. 2013.

CHANG, K. H., KIM, J. H. CHO, C. H. BAE, D. H., KIM, J.. Perfomance of a coupled atmosphere-streamflow prediction system at the Pyungchang river IHP basin. **Journal of Hydrology**. Vol. 288, p. 210-224. 2004.

CHATTERJEE, M.; DE, R.; ROY, D.; DAS, S.; MAZUMDAR, A.. Hydrological Modeling Studies with HEC-HMS for Damodar Basin, India. **World Applied Sciences Journal**. Vol. 31 Issue 12, p2148. 2014.

CHEN, F.; DUDHIA, J. Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. **Mon. Wea. Rev.**, v. 129, p. 569-585, 2001.

CHEN, S.–H., AND W.–Y. SUN, 2002: A one–dimensional time–dependent cloud model, **J. Meteor. Soc. Japan**, 80, 99–118. 2002.

CHI, M. B. Application of HEC-HMS 3.4 in Estimating Streamflow of the Rio Grande Under Impacts of Climate Change. Tese, 126 laudas (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade do Novo México. Albuquerque, Novo México. 2011.

CHOU, MING-DAH, AND MAX J. SUAREZ. An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models. NASA Tech. **Memo**, 84 pp. 1994.

CHOU, S. C.. **Análise de distúrbios ondulatórios de leste sobre o oceano Atlântico Equatorial Sul**. 1990. 134 f. Dissertação (Mestrado em meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE). São José dos Campos/SP, 1990.

CHOUDHARI, K.; PANIGRAHI, B.; PAUL, J. C.. Simulation of rainfall-runoff process using HEC-HMS model for Balijore Nala watershed, Odisha, India. **International Journal of Geomatics and Geosciences**, Volume 5, No 2, 2014.

CHRISTOFOLETTI, A. Modelagem de sistemas ambientais. São Paulo: **Edgard Blücher**, 236 p. 1999.

CHU, X. and STEINMAN, A.. “Event and Continuous Hydrologic Modeling with HEC-HMS.” **J. Irrig. Drain Eng.**, 135(1), 119–124. 2009.

COLLIER, C. G.; KZYZYSZTOFOWICZ, R., . Quantitative precipitation forecasting. **Journal of Hydrology** 239, 1-2. 2000.

COLLISCHONN, W. et al. Previsão sazonal de vazão na bacia do rio Uruguai 2: previsão climática-hidrológica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.10, n.4, p.61-72. 2005.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica em grandes bacias**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; DELGADO, M. C.; SILVA, B. C.; COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D. G.; PAZ, A. R.. Modelo hidrológico distribuído para previsão de vazões incrementais na bacia do rio Paranaíba entre Itumbiara e São Simão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, p. 43-56, 2007.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; DIAS, P. L. S.; SAMPAIO, G. O.. Previsão sazonal de vazão na bacia do rio Uruguai 2: Previsão Climática-Hidrológica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n.4, p. 60-72, 2005.

CONNER, MARK D., GRANT, W. PETTY. Validation and Intercomparison of SSM/I Rain-Rate Retrieval Methods over the Continental United States. **J. Appl. Meteor.**, **37**, 679–700. 1998.

CUNHA, L. K. da. **Construção de um Sistema de Análise e Simulação Hidrológica: Aplicação a Bacias Hidrográficas**. 2004. 259 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

ESPINOZA, E. S. **Distúrbios nos Ventos de Leste no Atlântico Tropical**. 1996. , 149 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1996.

FELDMAN, A.D. Hydrologic Modeling System HEC-HMS - Technical Reference Manual. Devis, CA. **Hydrologic Engineering Center**. 2000.

FERNANDES, R. O.. **Avaliação De Simulações De Precipitação E Vazão Por Um Modelo Atmosférico Em Bacias Do Semiárido Brasileiro**. 2009. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB. 2009.

FLETCHER, S.G.; PONNAMBALAM, K.. A constrained state formulation for the stochastic control of multireservoir systems. **Water Resources Research** 34(2), pp. 257-270. 1998.

GAMA, W. M.. **Impactos das Mudanças Climáticas na Resposta Hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba Do Meio (Al/Pe)**. 2011. 114 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento), Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2011.

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

GANGULY, A. R., BRAS, R. L.. Distributed quantitative precipitation forecasting using information from radar and numerical weather prediction models. **Journal of Hydrometeorology**, Vol. 4. p. 1168-1180. 2003.

GAUTAM, N. P.. Flow routing with Semi-distributed hydrological model HEC- HMS in case of Narayani River Basin. **Journal of the Institute of Engineering**, Vol. 10, No. 1, pp. 45–58. 2014.

DOOGE, J.C.I. A Linear Theory of Hydrologic Systems. **Technical Bulletin** n. 1948, ARS, US Department of Agriculture. 1973.

GRAY, D.M. Handbook on the principles of hidrology. New York. Huntigton: **Water Information. Center**, 1970.

GEBER B. DE A. MOURA, JOSÉ O. R. DE ARAGÃO, JOSÉ S. P. DE MELO, ANA P. N. DA SILVA, PEDRO R. GIONGO & FRANCINETE F. LACERDA. Relação entre a precipitação do leste do Nordeste do Brasil e a temperatura dos oceanos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.13, n.4, p.462–469, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v13n4/v13n4a14.pdf>>. Acesso em: 20 de Abril de 2014.

GRELL, G. A.; D. DEVENYI,: A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. **Geophys. Res. Lett.** 29, 1693-1696. 2002.

GRELL, GEORG A. Prognostic Evaluation of Assumptions Used by Cumulus Parameterizations. **Mon. Wea. Rev.**, 121, 764–787. 1993.

GUPTA, H. V., S. SOROOSHIAN, AND P. O. YAPO. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. **J. Hydrologic Eng.**4(2): 135-143. 1999.

HABETS, F.; LEMOIGNE, P.; NOILHAN, J. On the utility of operational precipitation forecasts to served as input for streamflow forecasting. **Journal of Hydrology**.V.293, P.270-288. 2004.

HENDERSON-SELLERS, B. New Formulation of eddy diffusion thermocline models. **Applied Mathematical Modelling**. v.9, pp.441-446. 1985.

HOLLINGSWORTH, A. Improvements in the skill of numerical weather prediction with global models. **Bulletin World Meteorological Organization**. Vol. 52, n.1, p.33-39. 2003.

HORTON, R. E.. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, v. 56. Boulder. 1945.

HORTON, R.E.. Drainage Basin Characteristics. Trans. **American Geophysical Union**, 13: 350-361. 1932.

JANJIĆ, Z. I., 1994: The step-mountain Eta coordinate model: Further developments of the convection closure schemes. **Mon. Wea. Rev.**,122,927–945.

JOLLIFFE, I. T., AND D. B. STEPHENSON, EDS. Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science. **John Wiley and Sons**. 2003. 247 pp.

KAIN, J. S., AND J. M. FRITSCH. The role of the convective “trigger function” in numerical prediction of mesoscale convective systems. **Meteor. Atmos. Phys.**,49,93–106. 1993.

KALMA, J. D., CALDER, I. R.. Land surface processes in land-scale hydrology. **Geneve. Published** online 7 October 2008 in Wiley InterScience. 1994.

KANE, R. P.. Relationship Between El Nino Timings And Rainfall Extremes In Ne Brazil, São Paulo City And South Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.15, n.1,45-57,2000.

KESSLER, E.: On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulation. **Meteor. Monogr.**, No. 32, **Amer. Meteor. Soc.**, 84 pp. 1969.

KOBOLD, M. AND SUŠELJ, K.: Precipitation forecasts and their uncertainty as input into hydrological models, **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 9, 322-332, doi:10.5194/hess-9-322-2005, 2005.

KOUSKY, V.E., Frontal influences on Northeast Brazil. **Mon. Wea. Rev.**, Vol 107, p. 1140-53, 1979.

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

LACONO, M. J., J. S. DELAMERE, E. J. MLAWER, M. W. SHEPHARD, S. A. CLOUGH, AND W. D. COLLINS. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. **J. Geophys. Res.**, 113, D13103. 2008.

LAPRISE, R. The Euler Equations of motion with hydrostatic pressure as independent variable, **Mon. Wea. Rev.**, 120, 197–207, 1992.

LIMA, Júlio Guilherme da Costa; Schulze, Sheila Maria Bretas Bittar; RIBEIRO, Mateus Rosas; BARRETO, Sandra de Brito. Mineralogia de um Argissolo Vermelho-Amarelo da zona úmida costeira do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** (Impresso), v. 32, p. 881-892, 2008.

LIMA, L. S.. **Implementação de um Modelo Hidrológico Distribuído na Plataforma de Modelagem Dinâmica Ego**. 2011. 108 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2011.

LIN, YUH-LANG, RICHARD D. FARLEY, AND HAROLD D. ORVILLE. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. **J. Climate Appl. Met.**, 22, 1065–1092. 1983.

LIRA, S. A.. **Análise de correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações**. 2004. 209 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Setores de Ciências Exatas e Tecnologia). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.

MACEDO, L. R. ; HENKES, A. F. ; YAMASAKI, Y. . Modelo WRF Na Previsão de um Evento Severo no Rio Grande do Sul. In: IV ENCONTRO SUL-BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2011, Pelotas. **Anais...**, 2011. v. 4.

MACFARLANE, A. G. J. engineering systems analysis. 272 pp., illus. **Reading, Mass.** 1964.

MAJIDI, A. K. SHAHEDI. Simulation of Rainfall-Runoff Process Using Green-Ampt Method and HEC-HMS Model (Case Study: Abnama Watershed, Iran). **International Journal of Hydraulic Engineering**, 1(1): 5-9. 2012.

MANSIKKANIEMI, H.. The sinuosity of rivers in northern Finland: **Publicationes Instituti Geographici Universitatis Turkuensis**, 52 :16-32. 1970.

MARCELINO, EMERSON VIEIRA. **Desastres naturais e geotecnologias: conceitos básicos**. Santa Maria: INPE, 2008.

MARCUZZO, F. F. N.; Oliveira, N. de L.; Cardoso, M.R.D.; Tschiedel, A. F. Detalhamento Hidromorfológico da Bacia do Rio Paraíba. In: XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2012, João Pessoa. Anais do XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Porto Alegre: ABRH, v. 1. p. 1-20. 2012.

MARUJO, R. A. P. **MOS – Model Output Statistics – Aplicação a Previsões MM5 de curto prazo em Portugal Continental**. 2009. 52 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geofísicas). Universidade De Lisboa, Faculdade De Ciências, Departamento De Engenharia Geográfica, Geofísica E Energia. LISBOA, 2009. Disponível em: <http://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/4970/1/ulfc095840_tm_Raquel_Marujo.pdf>. Acesso em: 19 de Abril de 2014.

MCT/CGE – Ministério de Ciência e Tecnologia / Centro de Gestão e Estudos Estratégicos Diretrizes estratégicas para o Fundo de Recursos Hídricos de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Brasília, Shaping an exciting future for the hydrological sciences **Hydrological Sciences Journal**, Wallingford, UK, v. 48, n. 6, p. 857-880, 2002.

MEDEIROS, F. C. **Influência do clima global nos prognósticos das descargas de bacia hidrográficas do estado de Alagoas**. 2002. 69 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Instituto de Ciências Atmosférica. Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 2002.

MEENU, R.; REHANA, S.; MUJUMDAR, P. P.. Assessment of hydrologic impacts of climate change in Tunga-Bhadra river basin, India with HEC-HMS and SDSM. **Hydrological Processes**, v.27, p.1572-1589, 2013.

MELLER, A.. **Previsão de Cheias Por Conjuntos em Curto Prazo**. 2012. 224 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisa Hidráulicas. Porto Alegre. 2012.

MELLER, A.; COLLISCHONN, W.; FAN, F.; BUARQUE, D.; PAIVA, R. C. D.; SILVA DIAS, P. L.; MOREIRA, D. S.. Previsão de Cheias por Conjunto em Curto Prazo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, p. 33-49, 2014.

MENDES, C. A. B. Integração de modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas: fundamentos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.1, n.1, p. 47- 66, 1996.

MENDES, H.C.; MENDIONDO, E.M. Histórico da Expansão Urbana e Incidência de Inundações: O Caso da Bacia do Gregório, São Carlos – SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH**. Volume 12. n.1 Jan/Mar, p.17-27, 2007.

MICHALAKES, J., J. DUDHIA, D. GILL, J. KLEMP AND W. SKAMAROCK: Design of a next-generation regional weather research and forecast model : Towards Teracomputing, **World Scientific**, River Edge, New Jersey, 1998, pp. 117-124.

MILDE, L. C. E.; MORAES, J. M.; MORTATTI, J.; FERRAZ, F. F. B.; GROppo, J. D. Modelo Espaço Temporal HEC-HMS: Avaliação na bacia de drenagem de Analândia. **Revista de Ciência e Tecnologia da UNIMEP**, Piracicaba, v. 10, n.19, p. 61-69, 2002.

MLAWER, E. J., TAUBMAN, S. J., BROWN, P. D., IACONO, M. J. e CLOUGH, S. A. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. **J. Geophys. Res.**, 102 (D14), p. 16663–16682, 1997.

MOLDERS, N.; RUHAAK, W. On the impact of explicitly predicted runoff on the simulated atmospheric response to small-scale land-use changes--an integrated modeling approach. **Atmospheric Research**, v. 63, n. 1-2, p. 3-38, 2002.

MORIASI, D.N., ARNOLD, J.G., VAN LIEW, M.W., BINGNER, R.L., HARMEL, R.D., VEITH, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers** 50, 885–900. 2007.

MOTOVILOV Y.G., GOTTSCHALK L., ENGELAND K. AND BELOKUROV A. ECOMAG: **Regional model of hydrological cycle**. Application to the NOPEX region. Department of Geophysics, University of Oslo P.O. Box 1022 Blindern 0315 OSLO, NORWAY. Institute Report Series No.: 105 ISBN 82-91885-04-4. May, 1999.

MOURA, R. G.; HERDIES, D. L.; MENDES, D.; MENDES, M. C. D. Avaliação do modelo regional eta utilizando as análises do CPTEC e NCEP. **Rev. bras. meteorol.** [online]. 2010, vol.25, n.1, pp. 46-53. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862010000100005>. Acessado em 19 de Abril de 2014.

NASH, J.E. Y SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models, part I: A discussion of principles. **Journal of Hydrology**. V. 10. 282-290. 1970.

NETO, S. L. R.. **Um Modelo Conceitual de Um Sistema de Apoio à Decisão Espacial Para Gestão de Desastres Por Inundações**. 2000. 234 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

NURMI, P.. Recommendations on the verification of local weather forecasts. ECMWF. 2003. Disponível em: <http://www.ecmwf.int/en/research>. Acesso em: 30/05/2016.

OLEYIBLO, J. O.; LI, Zhi-jia. Application of HEC-HMS for flood forecasting in Misai and Wan'an catchments in China. **Water Science and Engineering**, 2010, 3(1): 14-22.

OLIVEIRA, A. C. **Implementação do Modelo Atmosférico WRF Acoplado Com o Modelo Hidrológico TOPMODEL Para A Bacia de União da Vitória**. 2006. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

OLIVEIRA, Alex Conselvan de; CALVETTI, L.; GONCALVES, J. E.; BENETI, C.. Validação da Previsão de Precipitação gerada pelo modelo atmosférico WRF para a bacia de União da Vitória utilizando o modelo hidrológico Top Model.. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006, Florianópolis. XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006.

OLIVEIRA, E. M. G.. **Parametrizações Convectivas no Modelo WRF e Sua Relação Com a Precipitação Durante Ciclogêneses no Sudeste da América do Sul**. 2014. 95 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Santa Maria, RS. 2014.

PADILHA, S. F. **Simulações de Eventos de Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro usando o Modelo WRF**. 2011. 127 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011. (<http://www.meteorologia.ufrj.br/pos/dissertacoes-e-teses/Padilha-Mestrado-PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ-2011.pdf>).

PAIVA, A. P. O. Avaliação da eficiência do acoplamento de modelos atmosféricos e modelos hidrológicos. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. p. 19-27. 2011.

PAIVA, A. P. O.; RODRIGUES, M. T.; SILVA JUNIOR, R. S.; FRAGOSO JUNIOR, C. R. . Acoplamento Unidirecional de Modelos Atmosféricos e Hidrológicos para fins de previsão de cheia. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Maceió. Anais XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011.

- PAULINO, P. F.. **Estudo sobre a sensibilidade dos parâmetros do método SCS na determinação de hidrogramas de cheia em bacias urbanas**. 2014. 126 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Engenharia Hidráulica e Saneamento). Universidade de São Carlos. São Paulo, 2014. Disponível em: <file:///C:/Users/Andr%C3%A9/Downloads/Paloma_Fernandes_Paulino.pdf.> Acesso em: 19 de Novembro de 2015.
- PIELKE, R. A.. **Mesoscale meteorological modeling**. 2nd Edition, Academic Press, San Diego, CA, 676 pp. 2002.
- PIELKE, R.A., COTTON, W. R., WALKO, R. L.. A comprehensive meteorological modeling system - RAMS. **Meteorology and Atmospheric Physics**. Austria. Vol. 49, p.69-91. 1992.
- PLEIM, JONATHAN E.. A Combined Local and Nonlocal Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. Part I: Model Description and Testing. **J. Appl. Meteor. Climatol.**,46, 1383–1395.). 2007.
- QAISER, K. AND Y. YUAN. Floodplain Modeling in the Kansas River Basin Using Hydrologic Engineering Center (HEC) Models: Impacts of Urbanization and Wetlands for Mitigation. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-11/116, 2011. Fonte:<<http://www2.epa.gov/water-research>>.
- RAO, V.B.; LIMA, M.C.; FRANCHITO, S.H. Seasonal and interannual variations of rainfall over eastern Northeast Brazil. **J. Clim**, Vol. 6, p. 1754-63, 1993.
- REYNAUD, F.. **Desagregação Espacial Estatística da Chuva Prevista Pelo Modelo Atmosférico WRF**. 2008. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental), Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008.
- RODRIGUES, G. C. F. R.. **Validação do modelo WRF na simulação do vento e precipitação na ilha das Flores, no contexto da produção de energia renovável**. 2014. 83 f. Dissertação (Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente). Universidade de Lisboa – Faculdade Ciências. 2014.
- RODRIGUES, M.T. **Acoplamento do Modelo Hidrológico MGB ao Modelo Atmosférico WRF Visando Estimar Vazão na Bacia do Rio Paraíba Do Meio Al/Pe**. 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Ciências Atmosférica. Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 2012.
- ROY, D. S. BEGAM, S. GHOSH AND S. JANA. Calibration And Validation of Hec-Hms Model for a River Basin in Eastern India. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**. VOL. 8, NO. 1, January, 2013.
- ROZANTE, J.R. AND CAVALCANTI, I.F.A.. Regional Eta model experiments: SALLJEX and MCS development. **Journal of Geophysical Research** 113. doi: 10.1029/2007JD009566. issn: 0148-0227. 2008.
- SAKAMOTO, M. S. **Análise do impacto de parâmetros satelitais no entendimento de processos convectivos tropicais e na assimilação em modelos numéricos regionais de**

tempo para nowcasting. 2009. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SANTIAGO, Simulação da camada limite planetária sobre a região metropolitana da grande vitória com o uso do modelo de mesoescala WRF. 2009. Dissertação, 139 laudas 139 f. (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santos. Vitória - ES, 2009.

SANTO, A. R. S. E.; SOUSA, J. M.; CANDIDO, L. A.; TOTA, J.; MANZI, A. O.; SOUSA, A.J.S.. Avaliação da influência da convecção de meso-escala no prognóstico de precipitação do modelo WRF em alta resolução: Um estudo de caso.. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belém, 2010. Disponível em: <http://www.sbmet.org.br/cbmet2010/artigos/407_11707.pdf>. Acesso em 20/02/2016.

SANTOS, Keyla Almeida. **Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude. Estudo de caso: bacia do rio mundaú**. 2013. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE. 2013.

SANTOS, M. J. **Análise e Modelagem dos Eventos Extremos de Precipitação sobre o Estado de São Paulo**. 2012. 159 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

SARTORI, ADERSON; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M.. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, p. 5-18, 2005.

SCHULTZ, Duane P.; SCHULTZ, Sydney Ellen. História da psicologia moderna. 16. ed. São Paulo: **Cultrix**, 1992. 439 p.

SCHUURMANS, J. M., BIERKENS, M. F. P. Ability to forecast regional soil moisture with a distributed hydrological model using ECMWF rainfall forecasts. **Journal of Hydrometeorology**. Vol. 10. P.544-554. 2009.

SILANS, A. M. B. P. et al. Aplicação do modelo hidrológico distribuído à bacia hidrográfica do rio do Peixe - estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, João Pessoa, v. 5, n. 3, p. 5-19, 2000.

SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M.; COLIISCHONN, Walter. Previsão de vazão com modelos hidroclimáticos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, p. 45-56, 2006.

SILVA, B. C.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; DELGADO, M. C.. Previsão hidroclimática de vazão de curto prazo na bacia do rio São Francisco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, p. 31-42, 2007.

SILVA, B. F. P.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; PERESETSKY, A.; BRITO, B. M.. Sistemas Sinóticos Associados às Precipitações Intensas no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n.3, 323 - 338, 2011.

SILVA, S. M. S.; SOUSA, A. R.; ALBUQUERQUE, S. F.; NUNES FILHO, J.; SILVA, A. B.; LOPES, G. M. B.. Características Físicas e Químicas de um Neossolo Regolítico Eutrófico do Agreste Pernambucano. In: XXXIV Congresso Brasileiro de Ciências do Solo, 2013, Florianópolis. XXXIV Congresso Brasileiro de Ciências do Solo, 2013.

SILVA, V. P. R.; PEREIRA, E. R. R.; ALMEIDA, R. S. R. Estudo da Variabilidade Anual e Intra-Anual da Precipitação na Região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de meteorologia**. Vol. 27, n. 2, p 163 - 172, 2012.

SINGH, V.P.; WOOLHISER, D.A. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. **Journal of Hydrologic Engineering**, v 7, n 4, p 270-292, 2002.

SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; DUDHIA, J.; GILL, D. O.; BARKER, D. M.; WANG, W.; POWERS, J. G. **A Description of the Advanced Research WRF Version 2**. NCAR/Tech. Notes, 2005.

SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; DUDHIA, J.; GILL, D. O.; BARKER, D. M.; DUDA, M. G.; HUANG, X. -Y.; WANG, W.; POWERS, J. G. **A description of the Advanced Research WRF Version 3**. National Center for Atmospheric Research (NCAR). Boulder, Colorado (EUA), p. 125. 2008.

SMITH, K. T; AUSTIN, G. L.. Nowcasting precipitation – a proposal for a way forward. **Journal of Hydrologic**, n. 239, p. 34-45. 2000.

SOIL CONSERVATION SERVICE, National Engineering Handbook, Sec. 4, Hydrology, U. S. Department of Agriculture, 1972.

SOIL CONSERVATION SERVICE, National Engineering Handbook, Sec. 4, Hydrology, U. S. Department of Agriculture, disponível a partir de U. S. Government Printing Office, Washington D.C, 1985.

SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. Model calibration In: Singh, V. J. (editor) **Computer models of watershed hydrology**. Water Resources Publications, Highlands Ranch. 1130 p. 1995.

SOUSOUNIS, P. J., HUTCHINSON, T. A., MARSHALL, S. F. A comparison of MM5, WRF, RUC, and ETA performance for great plains heavy precipitation events during the spring of 2003. In: 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting, Seattle, **American Meteorological Society**, v. J24.6, 2004.

STRAHLER, A.N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. New Halen: Transactions: **American Geophysical Union**, 1957. v.38. p. 913-920.

TEIXEIRA, P.C., R.K. MISRA. Erosion and sediment characteristics of cultivated forest soils as affected by the mechanical stability of aggregates. **Catena** v. 30:199-134, 1997.

TEMEZ, R.. **Calculo hidrometeorologico de caudales maximos en pequenas cuencas naturales**, MOPU, Direccion General de Carreteras, Madrid, 1978.

TEWARI., M., F. CHEN, W. WANG, J. DUDHIA, M. LEMONE, K. MITCHELL, M. EK, G. GAYNO, J. WEGIEL, AND R. CUENCA. Implementation and verification of the unified Noah land surface model in the WRF model. 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction. 11-15 January, 2004, Seattle, Washington.

THOMPSON, GREGORY, ROY M. RASMUSSEN, KEVIN MANNING: Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part I: Description and Sensitivity Analysis. **Mon. Wea. Rev.**, 132, 519–542. 2004.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, [Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos], 678 p. 2005.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. EDUSP, Editora da UFRGS, ABRH, 952p. 1993.

TUCCI, C.E.M.; BERTONI, J.C. **Inundações Urbanas na América do Sul**. ABRH, Porto Alegre-RS, 150p. 2003.

TUCCI, C. E. M. **Modelos determinísticos**. In: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Modelos para gerenciamento de recursos hídricos, Nobel/.ABRH. 1987. p. 211-324.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Dam Break Analysis for Reservoir 24 (HI00073)**. Tetra Tech, Us Army Corps of Engineers. Final Report. 83 p. 2008.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User Manual**, CPD-74A version 3.0.1. Hydrologic Engineering Center, 280 p. 2006.

USACE. Hydrologic Modeling System HEC - HMS – Technical Reference Manual. Hydrologic Engineering Center, Davis-CA. 2010.

VARELA, G. M.. **Um Sistema de Alerta para Monitoração, Divulgação e Coordenação de Atividades em Situações de Enchentes**. 2003. 78 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2003.

VITORINO, M. I.; SILVA, M. E.S.; ALVES, J. M. B. Classificação De Sistemas Convectivos De Mesoescala No Setor Norte Do Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.12, n.1,21-32, 1997.

WALESH, S. G. **Urban Surface Water Management**. New York: Wiley, 518 p. 1989.

WANG, J.F., ANDERSON, M.P. **Introduction to Groundwater Modelling**. Freeman, San Francisco, CA: 237 pp. 1982.

WEBER, R.L.; BUCKNER, M.; WEBER, J. Statistical Performance of several mesoscale atmospheric dispersion models. **Journal of Applied Meteorology**, NOAA Central Library, Department of Commerce, v. 21, n. 11, 1633-1644, 1982.

XUE, M., DROEGEMEIER, K. K., WONG, V., SHAPIRO, A., BREWSTER, K., CARR, F., WEBER, D., LIU, Y., WANG, D.. The advanced regional prediction system (ARPS) - a

multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. part II: Model physics and applications. **Meteorology and Atmospheric Physics**, Vol. 76, p. 143–165. 2001.

YAMAZAKI, Y.; RAO, V.B. Tropical cloudiness over the South Atlantic Ocean. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, Tokyo, v.55, p.205-207, 1977.

YENER M. K.; ŞORMAN A. Ü.; ŞORMAN A.A.; ŞENSOY A.; GEZGIN T.. Modeling Studies with HEC-HMS and Runoff Scenarios in Yuvacik Basin Turkey, **International Congress on River Basin Management**, 22-24 March, Antalya, Turkey. 2007.

YU, Z.; BARRON, E. J.; YARNAL, B.; LAKHTAKIA, M. N.; WHITE, R. A.; POLLARD, D.; MILLER, D.A. Evaluation of basin-scale hydrologic response to a multi-storm simulation. **Journal of hydrology**, v.257, 2002. pp. 212-225.

YU, Z.; LAKHTAKIA, M.; YARNAL, B.; WHITE, R.; MILLER, D.; FRAKES, B.; BARRON, E.; DUFFY, C.; SCHWARTZ, F. Simulating the river-basin response to atmospheric forcing by linking a mesoscale meteorological model and hydrologic model system. **Journal of Hydrology**, v. 218, p. 72-91, 1999.

YUAN Y. AND QAISER, K. Floodplain Modeling in the Kansas River Basin Using Hydrologic Engineering Center (HEC) Models: Impacts of Urbanization and Wetlands for Mitigation. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-11/116, 2011. Fonte: <<http://www2.epa.gov/water-research>>.

YUAN, HUILING, CHUNGU LU, JOHN A. MCGINLEY, PAUL J. SCHULTZ, BRIAN D. JAMISON, LINDA WHARTON, CHRISTOPHER J. ANDERSON, 2009: Evaluation of Short-Range Quantitative Precipitation Forecasts from a Time-Lagged Multimodel Ensemble. **Wea. Forecasting**, 24, 18-38.

ZABEL, F. AND MAUSER, W.: 2-way coupling the hydrological land surface model PROMET with the regional climate model MM5, Hydrol. **Earth Syst. Sci.**, 17, 1705-1714, doi:10.5194/hess-17-1705-2013, 2013.

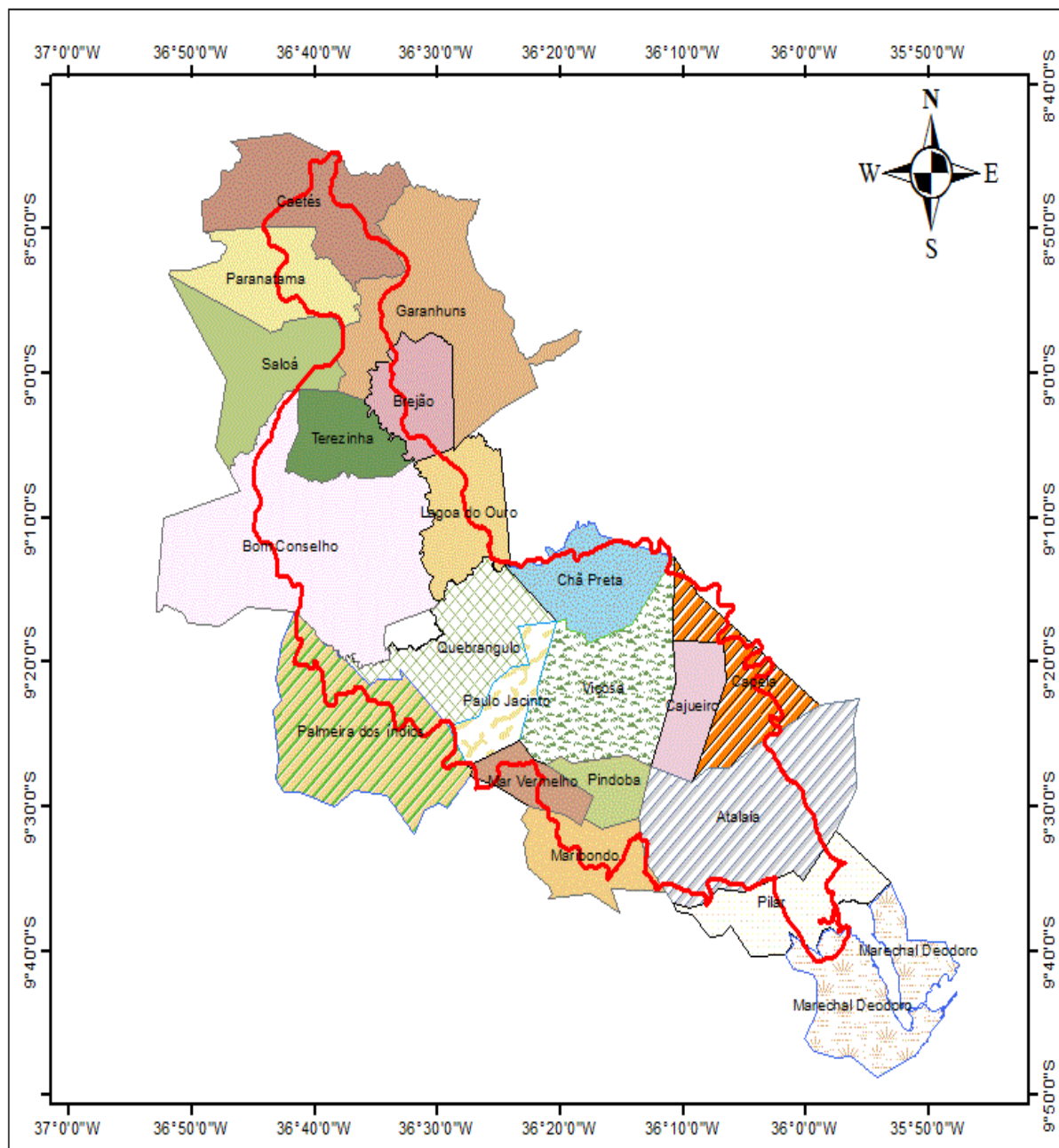
ZEPKA, G. S. **Previsão de Descargas Atmosféricas Usando o Modelo de Meseoescala WRF**. 2011. 178 f. Tese (Doutorado em Geofísica/Ciências Atmosféricas) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. São José dos Campos-SP. 2011.

ZHANG, D.-L., AND R.A. ANTHES,. A high-resolution model of the planetary boundary layer- sensitivity tests and comparisons with SESAME-79 data. **J. Appl. Meteor.**, 21, 1594–1609, 1982.

ZHANG, H. L.; WANG, Y. Q. WANG, D. X. LI, AND X. K. WANG. The effect of watershed scale on HEC-HMS calibrated parameters: a case study in the Cleek watershed in Iowa, US. Hydrol. **Earth Syst. Sci.**, 17, 2735-2745, 2013.

ZHAO, Q., LIU, Z., YE, B., QIN, Y., WEI, Z., AND FANG, S.: A snowmelt runoff forecasting model coupling WRF and DHSVM, Hydrol. **Earth Syst. Sci.**, 13, 1897-1906 doi:10.5194/hess-13-1897-2009, 2009.

APÊNDICE A – CIDADES QUE COMPÕEM A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO MEIO.



Fonte: Autor (2014).

**ANEXO A – VALORES DO CN EM FUNÇÃO DA COBERTURA E TIPO
HIDROLÓGICO DE SOLO PARA IA/S=0,20.**

Uso do Solo	Superfície do Solo	Grupo de Solo			
		A	B	C	D
Solo lavrado	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações regulares	Em curvas de nível	67	77	83	87
	Terraceado em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais	Em curvas de nível	62	74	82	85
	Terraceado em nível	60	71	79	82
	Em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de legumes ou cultivados	Em curvas de nível	60	72	81	84
	Terraceado em nível	57	70	78	89
	Pobres	68	79	86	89
	Normais	49	69	79	94
	Boas	39	61	74	80
Pastagens	Pobres, em curvas de nível.	47	67	81	88
	Normais, em curvas de nível.	25	59	75	83
	Boas, em curva de nível.	6	39	70	79
Campos permanentes	Normais	30	58	71	78
	Esparsas, de baixa transpiração.	45	66	77	83
	Densas, de alta transpiração.	25	55	70	77
Chácaras/ Estradas de terra	Normais	56	75	86	91
	Más	72	82	87	89
	De superfície dura	74	84	90	92
Florestas	Muito esparsas, baixa transpiração.	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Densas, alta transpiração.	26	52	62	69
	Normais	36	60	70	76

Fonte: Tucci et al, 1993.