



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m18/2014/04.15.19.16-TDI

## **PREVISIBILIDADE DE CHEIAS NA BACIA DO RIO IGUAÇU/SARAPUÍ - RJ, USANDO MODELAGEM HIDROLÓGICA DISTRIBUÍDA**

Ana Carolina da Encarnação Paiva

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos Drs. Javier Tomasella, e Regina Célia dos Santos Alvalá, aprovada em 23 de abril de 2014.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/3G5R4KS>

INPE  
São José dos Campos  
2014

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):****Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**Membros:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m18/2014/04.15.19.16-TDI

## **PREVISIBILIDADE DE CHEIAS NA BACIA DO RIO IGUAÇU/SARAPUÍ - RJ, USANDO MODELAGEM HIDROLÓGICA DISTRIBUÍDA**

Ana Carolina da Encarnação Paiva

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos Drs. Javier Tomasella, e Regina Célia dos Santos Alvalá, aprovada em 23 de abril de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/3G5R4KS>>

INPE  
São José dos Campos  
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Paiva, Ana Carolina da Encarnação.

P166p Previsibilidade de cheias na bacia do rio Iguaçu/Sarapuí - RJ, usando modelagem hidrológica distribuída / Ana Carolina da Encarnação Paiva. – São José dos Campos : INPE, 2014.  
xxiv + 80 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m18/2014/04.15.19.16-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

Orientadores : Drs. Javier Tomasella, e Regina Célia dos Santos Alvalá.

1. Cheias. 2. Modelo hidrológico. 3. Radar meteorológico.  
4. Previsibilidade. I. Título.

CDU 556.06(815.3)

---

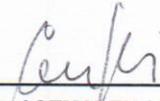


Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de **Mestre** em  
**Meteorologia**

Dr. Carlos Frederico de Angelis

  
\_\_\_\_\_  
Presidente / CEMADEN / Cachoeira Paulista - SP

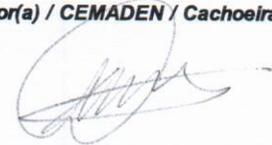
Dr. Javier Tomasella

  
\_\_\_\_\_  
Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

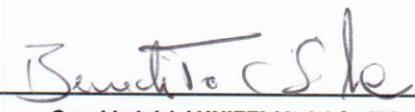
Dra. Regina Célia dos Santos Alvalá

\_\_\_\_\_  
Orientador(a) / CEMADEN / Cachoeira Paulista - SP

Dr. Daniel Andrés Rodriguez

  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Benedito Cláudio da Silva

  
\_\_\_\_\_  
Convidado(a) / UNIFEI / Itajubá - MG

*Este trabalho foi aprovado por:*

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Ana Carolina da Encarnação Paiva**

**São José dos Campos, 23 de Abril de 2014**



*Dedico esta conquista a dois grandes homens.*

*Ao meu pai Horácio Paiva e ao meu primo Wagner Ferreira, exemplos de dedicação, esforço e honestidade.*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao INPE a oportunidade de estudar em renomada instituição.

Aos professores que compartilharam seus conhecimentos e experiências comigo.

Aos funcionários do INPE que sempre me trataram com muita cordialidade.

À CAPES pela bolsa que financiou minha pesquisa.

Agradeço aos meus orientadores Javier Tomasella e Regina Célia dos Santos Alvalá pelos ensinamentos, paciência e disponibilidade.

Ao INEA e ao INMET por ceder os dados necessários para esta pesquisa.

A todos os membros do PROCLIMA pela companhia, conselhos, comemorações e ensinamentos. Especialmente ao José Lázaro, que me ajudou muito ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço também aos pesquisadores do INPE, Vanessa Canavesi e Alexandre Jardim, que contribuíram para minha pesquisa. E aos pesquisadores do CEMADEN/MCTI, Luiz Bacelar, Isabelly Costa, Wendell Farias, Anderson Sene, Mosefran Firmino e Rochane Caram.

Agradeço aos amigos, que conquistei ao longo do mestrado, Felipe Rocha, Lia Amaral, Alejandro Ordóñez, Camilla Correa, Tullius Nery, Ana Paula Santos, e outros, pela companhia, risos, grupos de estudos; enfim, pela amizade.

Aos amigos de longa data, Lauro, Morgana, Milena, Gabriela, Mariana e Jully, que mesmo com a distância sempre estiveram presentes. Em especial ao amigo Edson Júnior pelo incentivo, amizade, companhia e zelo.

A minha família que sempre me deu suporte para continuar estudando. Ao meu pai Horácio Paiva, aos meus irmãos, Tatiana, Mônica, Letícia e Horácio, e aos meus sobrinhos Marco Antônio e Miguel que são motivo de muita alegria.

Aos meus primos Wagner Ferreira, Ingrid e Giovana que me acolheram, incentivaram, cuidaram de mim e a quem sou muito grata.

Aos novos e velhos amigos de trabalho que fiz e reencontrei na ONS.

E, por último, porém mais importante, agradeço a Deus pela oportunidade concedida. Pelo conhecimento adquirido, pelo crescimento e amadurecimento pessoal e profissional, pelas pessoas que conheci, pelas amizades que formei e pelas que reafirmei. Obrigada Senhor.

Obrigada a todos!



## RESUMO

A impermeabilização do solo, a ocupação de áreas ribeirinhas e a drenagem inadequada, combinada com um aumento da frequência de eventos extremos resultam em enchentes urbanas mais frequentes em muitas cidades brasileiras. A ocorrência recorrente de inundações leva a um aumento da vulnerabilidade da população que ocupam as várzeas dos rios. A bacia do Rio Iguaçu / Sarapuí - RJ, foco deste estudo, é uma das bacias urbanas do Estado do Rio de Janeiro que freqüentemente sofre com inundações durante o verão. O objetivo deste trabalho é avaliar ferramentas que possam contribuir para uma melhor compreensão das características de inundações na bacia e as informações necessárias para a sua previsão e monitoramento. Para este fim, o modelo hidrológico distribuído MHD - INPE foi calibrado para a bacia do Rio Iguaçu (RJ), utilizando precipitação observada interpolada como dados de entrada. Na fase seguinte, dados do radar são utilizados como dados de entrada do modelo. O modelo hidrológico apresenta um desempenho aceitável para prever inundações quando utilizados dados de precipitação como dados de entrada. Por outro lado, o modelo mostrou desempenho insuficiente quando usado chuvas estimada a partir de refletividade radar. Para melhorar a capacidade de previsão de enchentes na região metropolitana do Rio de Janeiro é necessário uma melhor cobertura de pluviômetros, especialmente à captação das cabeceiras que são mais afetadas por chuvas significativas e, portanto, têm uma forte influência das características hidrológicas do escoamento em áreas urbanas áreas.



# **PREDICTABILITY FLOODS IN RIVER BASIN IGUAÇU/SARAPUÍ- RJ, USING MODELING DISTRIBUTED HYDROLOGIC**

## **ABSTRACT**

The soil sealing, the occupation of riparian areas, inadequate drainage, combined with an increased frequency of extreme events in many Brazilian cities resulted in more frequent urban flooding. The recurrent occurrence of flooding leads to an increase vulnerability of the population that occupy the river floodplain. The basin of the Rio Iguaçu / Sarapuí - RJ, focus of this study, is one of the urban basins of the State of Rio de Janeiro that frequently suffers with floods during the summer. The objective of this work is to evaluate tools that might contribute to a better understanding of the characteristics of floods in this basin and the information necessary for their prediction and monitoring. To this end, the INPE distributed hydrological model MHD - INPE was calibrated for the basin of the Rio Iguaçu (RJ), using as input data fields interpolated observed precipitation. In a next step, the model used radar data as input. The hydrological model presented acceptable performance to forecast flooding when used rainfall data as input data. Conversely, the model showed insufficient performance when used rainfall estimated from radar reflectivity. Improvement on the ability of predicting floodings on the metropolitan area of Rio de Janeiro requires improved coverage of the real time raingauge netywork, particularly at headwater catchment which are more affected by significant. rainfall and therefore have an strong influence the hydrological characteristics of the flooding in urban areas.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Resumo dos Desastres Naturais no Brasil e percentual de ocorrência dos eventos registrados no período de 1900-2012. ....	7
Figura 4.2 – Climatologia da passagem de frentes frias sobre a América do Sul.....	15
Figura 4.3 – Climatologia da precipitação média diária e ventos (850hPa) para o verão da América do Sul. ....	16
Figura 4.4 - Comparação entre relações Z-R, com refletividade de 34 a 48 dbz.....	19
Figura 4.5 - Vazões calculadas pelo CABC utilizando a chuva do pluviógrafo Imobel, radar e com a correção pelo método de Brandes, e observada no posto Campos Lemos. ....	20
Figura 4.6 - Comparação entre a vazão observada e a prevista para 40, 30, 20 e 10 minutos antes da vazão de pico, para o evento dia 27/03/2002.....	21
Figura 4.7 – Mancha obtida para as condições atuais de urbanização da bacia.....	24
Figura 5.1 – Bacia do Rio Iguaçu/Sarapuí.....	27
Figura 5.2 – Representação da variação do lençol freático dentro da célula. ....	29
Figura 5.3 – Representação da célula do modelo particionada em “n” unidades de resposta hidrológica uniforme.....	34
Figura 5.4 – Esquema de operação do MHD-INPE para a bacia do rio Iguaçu/Sarapuí. ....	35
Figura 5.5 - Rede de monitoramento hidrometeorológico da Baixada Fluminense monitorada pelo do INEA. Os triângulos vermelhos representam os postos hidrométricos e pluviométricos enquanto os círculos, somente postos pluviométricos.....	37
Figura 5.6 – Localização das estações automáticas do INMET utilizadas. ....	38
Figura 5.7 – Imagem do radar do Pico do Couto - RJ. ....	40
Figura 5.8 – Corte vertical da seção trapezoidal utilizada para o calculo de área das calhas dos rios.....	42
Figura 5.9 – Bacia do Rio Iguaçu/Sarapuí de acordo com a delimitação apresentada pelo INEA. Sub-bacias delimitada conforme os rios de maior contribuição e micro-bacias de acordo com o posicionamento das estações fluviométricas.....	45
Figura 5.10 – Codificações de direções de fluxo. ....	46
Figura 5.11 – Mapa de solos para a região da bacia.....	47
Figura 5.12 – Mapa de vegetação para a região da bacia. ....	48
Figura 5.13 – Mapa de uso do solo para a região da bacia e seu entorno.....	50
Figura 6.1 – Exemplos de correções de falhas identificadas na série de vazão.....	52
Figura 6.2 – Hidrograma de vazão observado e calculado para bacia 1 (Rio Sarapuí) de 2008 a 2011.....	57
Figura 6.3 – Curva de Permanência da bacia 1. ....	58

Figura 6.4 – Correlação entre os dados de vazão observados e os estimados pelo modelo.....	58
Figura 6.5 – Hidrograma de vazão observado e calculado para bacia 2 (Rio Acari) de 2008 a 2011.....	59
Figura 6.6 – Curva de Permanência da bacia 3. ....	60
Figura 6.7 – Correlação entre os dados de vazão observados e os estimados pelo modelo.....	60
Figura 6.8 – Hidrograma de vazão observado e calculado para bacia 3 (Rio Iguaçu) de 2008 a 2011.....	61
Figura 6.9 – Curva de Permanência da bacia 3. ....	62
Figura 6.10 – Correlação entre os dados de vazão observados e os estimados pelo modelo.....	62
Figura 6.11 – Hidrograma de vazão observado e calculado para bacia 4 (Rio Saracuruna) de 2008 a 2011. ....	63
Figura 6.12 – Curva de Permanência da bacia 4. ....	64
Figura 6.13 – Correlação entre os dados de vazão observados e os estimados pelo modelo.....	64
Figura 6.14 – Passagem de um Sistema Frontal sobre o oceano atuando sobre o sudeste brasileiro, em destaque o Setor São Paulo+ Rio de Janeiro.....	67
Figura 6.15 – Hidrograma horário da vazão observada (vermelho), vazão calibradas usando dados de pluviometro (verde) e vazão simulada utilizando dados de radar (azul); para a bacia 1 – rio Sarapuí – das 0h de 29 de dezembro de 2009 as 23h de 31 de dezembro de 2009.....	67
Figura 6.16 – Hidrograma horário da vazão observada (vermelho), vazão calibradas usando dados de pluviometro (verde) e vazão simulada utilizando dados de radar (azul); para a bacia 2 – rio Acari – das 0h de 29 de dezembro de 2009 as 23h de 31 de dezembro de 2009.....	68
Figura 6.17 - Hidrograma horário da vazão observada (vermelho), vazão calibradas usando dados de pluviometro (verde) e vazão simulada utilizando dados de radar (azul); para a bacia 3 – rio Iguaçu – das 0h de 29 de dezembro de 2009 as 23h de 31 de dezembro de 2009.....	68
Figura 6.18 - Hidrograma horário da vazão observada (vermelho), vazão calibradas usando dados de pluviometro (verde) e vazão simulada utilizando dados de radar (azul); para a bacia 3 – rio Saracuruna – das 0h de 29 de dezembro de 2009 as 23h de 31 de dezembro de 2009.....	69
Figura 6.19 – Sistema Frontal atuando sobre sudeste brasileiro, em destaque o Setor São Paulo+ Rio de Janeiro. ....	70
Figura 6.20 - Hidrograma horário da vazão observada (vermelho), vazão calibradas usando dados de pluviometro (verde) e vazão simulada utilizando dados de radar (azul); para a bacia 1 – rio Sarapuí – das 0h 04 de abril de 2010 a 23h 07 de abril de 2010.....	70

Figura 6.21 - Hidrograma horário da vazão observada (vermelho), vazão calibradas usando dados de pluviometro (verde) e vazão simulada utilizando dados de radar (azul); para a bacia 2 – rio Acari – das 0h 04 de abril de 2010 a 23h 07 de abril de 2010 .....	71
Figura 6.22 - Hidrograma horário da vazão observada (vermelho), vazão calibradas usando dados de pluviometro (verde) e vazão simulada utilizando dados de radar (azul); para a bacia 3– riolguaçu – das 0h 04 de abril de 2010 a 23h 07 de abril de 2010 .....	71
Figura 6.23 - Hidrograma horário da vazão observada (vermelho), vazão calibradas usando dados de pluviometro (verde) e vazão simulada utilizando dados de radar (azul); para a bacia 4 – rio Saracuruna – das 0h 04 de abril de 2010 a 23h 07 de abril de 2010.....	72



## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Resumo dos Desastres Naturais no Brasil desde 1900.....	8
Tabela 4.2 – Tipos de alerta.....	13
Tabela 4.3 – Modelos Hidrológicos utilizados no gerenciamento dos recursos hídricos.....	22
Tabela 5.1 – Densidade populacional dos municípios da Baixada Fluminense que integram a bacia do Rio Iguaçu/Sarapuí. ....	28
Tabela 5.2 – Lista de postos da rede de monitoramento do INEA para a Baixada Fluminense.....	36
Tabela 5.3 – Lista de postos da rede de monitoramento do INMET.....	37
Tabela 5.4 – Características físicas das bacias estudadas. ....	45
Tabela 5.5 – Classificação dos tipos de solo.....	47
Tabela 5.6 – Classificação dos tipos de vegetação.....	49
Tabela 6.1 – Valores dos parâmetros após a calibração.....	53
Tabela 6.2 – Valores das funções objetivo.....	55
Tabela 6.3 – Número de alertas de transbordamento para a bacia do Rio Iguaçu/Sarapuí para o período de janeiro de 2008 a dezembro de 2011.....	66



## LISTA DE SIGLAS

AHPS	Advanced Hydrologic Prediction Service
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
BF	Baixada Fluminense
CCM	Complexo Convectivo de Mesoescala
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
DEM	Modelo Digital de Elevação
DHM-TF	Distributed Hydrologic Model with Threshold Frequencies
EM-DAT	Emergency Events DataBase
FEEMA	Fundação Estadual de Engenharia e Meio Ambiente
GFDS	Global Floods Detection System
HPC	Hydrological Prediction Center
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEF	Instituto Estadual de Florestas
IES	Institute for Environment and Sustainability
INEA	Instituto Estadual do Meio Ambiente
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MCTI	Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação
MGB	Modelo Hidrológico de Grandes Bacias
MGB-IPH	Modelo Hidrológico de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas
MHD –INPE	Modelo Hidrológico Distribuído do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
NOAA	Nation Oceanic and Atmospheric Administration
RMRJ	Região Metropolitana do Rio de Janeiro

SCM	Sistema Convectivo de Mesoescala
SEA	Secretaria de Estado do Ambiente
SERLA	Superintendência Estadual de Rios e Lagoas
SF	Sistema Frontal
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. JUSTIFICATIVA .....	3
3. OBJETIVOS .....	5
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	7
4.1. Desastres naturais no Brasil .....	7
4.1.1 Conhecendo o Risco .....	9
4.1.2 Monitoramento e Previsibilidade.....	10
4.1.3 Sistema de Alerta de Cheias na Baixada Fluminense .....	12
4.2. Regime de chuvas na Região Metropolitana do Rio do Janeiro .....	13
4.2.1. Frentes Frias .....	14
4.2.2. Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).....	15
4.2.3. Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM).....	17
4.3 Radar Meteorológico .....	18
4.4 Modelos hidrológicos e suas aplicações.....	21
5. MATERIAL E MÉTODOS .....	27
5.1. Área de Estudo .....	27
5.2 Modelos Hidrológicos Distribuído do INPE .....	28
5.3 Dados de Entrada do MHD-INPE .....	34
5.3.1 Dados Meteorológicos .....	36
5.3.2 Dados do radar do Pico do Couto .....	38
5.3.3 Dados Fluviométricos .....	41
5.4. Calibração e Validação do Modelo .....	43
5.5 Dados do Meio Físico .....	45
6. RESULTADOS .....	51
6.1 Controle de Qualidade dos Dados Observados .....	51
6.2 Calibração .....	52
6.3 Condições Meteorológicas e Hidrológicas Associadas as Grande Cheias na Bacia e Comparação do Desempenho do Modelo Hidrológico Quando Alimentado por Dados de Pluviômetros e de Radar.....	65
6.3.1 Caso 1 – 30 e 31 de dezembro de 2009.....	66
6.3.2 Caso 2 – 5, 6, 7 de abril de 2010.....	69
7 CONCLUSÕES .....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	75



## **1. INTRODUÇÃO**

Desastre natural pode ser definido como o resultado do impacto de um fenômeno natural extremo ou intenso em um sistema social, causando sérios danos e prejuízos que excedem a capacidade dos afetados em conviver com o impacto (MARCELINO 2008). Os eventos extremos têm se tornado mais frequente nas últimas décadas, provocando grandes perdas econômicas, sociais e ambientais. A sociedade e os governos tendem a minimizar o perigo que o risco representa com a execução de obras de engenharia e, só após uma catástrofe, a população toma ciência de sua vulnerabilidade.

Antes da industrialização, os desastres naturais eram diretamente ligados a manifestações naturais, tais como inundações, temperaturas extremas, secas e fortes tempestades. Após o processo de industrialização, foram acrescentados novos riscos, tais como o lançamento de poluentes na atmosfera, incêndios e explosões associados a usinas. Com o passar dos anos, danos decorrentes das ações antrópicas estão se tornando mais frequentes. Atualmente, é comum casos de erosão em vista da utilização inapropriada do solo, e inundações devido às condições de impermeabilização da superfície, remoção de matas em encostas, ocupação dos leitos dos rios, modificações indevidas na rede de drenagem, e não mais apenas decorrentes de tempestades intensas.

Para melhor entendimento do impacto desses processos em nosso meio utiliza-se a modelagem. O modelo é a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas (TUCCI, 1998).

Existem vários tipos de modelos, aplicados para vários fins. Na abordagem do presente estudo considerou-se a aplicação de um modelo hidrológico, que é uma ferramenta desenvolvida para representar e compreender o comportamento de uma bacia hidrológica (TUCCI, 1998), gerando um hidrograma de escoamento superficial, a partir de uma precipitação conhecida (SOUZA, 2010). Este tipo de modelo é essencial na antecipação de eventos, na avaliação dos impactos decorrentes das mudanças na cobertura da terra e no entendimento dos processos hidrológicos.

Os modelos hidrológicos vêm sendo utilizados em diferentes localidades com intuito de prever e, conseqüentemente auxiliar na mitigação das dinâmicas destes eventos extremos associados a riscos hidrológicos. Entre os modelos existentes o *European Floods Awareness System* (EFAS) do *Institute for Environment and Sustainability* (IES) utiliza o modelo LISFLOOD, um modelo hidrológico de grandes bacias, para fornecer previsões de cheias com antecedência de 3 a 10 dias. Esse sistema de alertas abrange todo o continente europeu e também conta com uma ferramenta chamada *Global Floods Detection System* (GFDS), usada para obter informações sobre o impacto e a amplitude das cheias por meio de imagens de satélites. Outro centro que tem como missão a previsão nowcasting de chuvas e inundações é o *Hydrological Prediction Center* (HPC) da *Nation Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Com a aplicação de algumas ferramentas tais como: *Distributed Hydrologic Model with Threshold Frequencies* (DHM-TF) e o *Advanced Hydrologic Prediction Service* (AHPS) o HPC fornece previsões de cheias em uma escala temporal de dias até meses.

Devido ao grande número de registros de ocorrência de cheias e inundações na região metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) priorizou-se aplicar o modelo hidrológico MDH-INPE para a bacia do rio Iguaçu/Sarapuí, localizada na Baixada Fluminense, visando de avaliar o desempenho deste tipo de modelagem na emissão de alertas de cheias para a RMRJ.

## 2. JUSTIFICATIVA

O Estado do Rio de Janeiro é marcado por muitos desastres naturais e essas ocorrências tornam-se mais numerosas com o crescimento desordenado das cidades que o integram. Nos últimos anos, ocorreram vários eventos de inundações e deslizamentos de grandes proporções, como na cidade de Angra dos Reis em dezembro de 2009; no município de Niterói em abril de 2010; na Região Serrana em janeiro de 2011; no Norte e Noroeste Fluminense em janeiro de 2012 e na Baixada Fluminense em janeiro e dezembro de 2013. Estes culminaram em centenas de mortes e desaparecidos, milhares de desabrigados e grandes perdas econômicas para as cidades atingidas.

O foco do presente trabalho é a bacia do Rio Iguaçu/Sarapuí, localizada na Baixada Fluminense (BF), onde em todos os verões são registrados deslizamentos de encostas, rolamentos de pedras, soterramento de casas e inundações nas áreas de várzeas, que hoje se encontram densamente ocupadas (PAIVA, 2011). A BF apresenta um grande número de áreas susceptíveis a enxurradas, deslizamentos e inundações; é altamente populosa e, conseqüentemente, vulnerável aos eventos extremos. Por outro lado, as ações governamentais para redução destes riscos ainda não são suficientes para seu enfrentamento. Em particular, as enchentes recorrentes de verão sobre áreas de ocupação dos rios, riachos, córregos, ribeirões, charcos, baixadas, hoje ocupadas por bens materiais e pessoas, causam perdas e mortes de forma sistemática.

A Bacia do Rio Iguaçu/Sarapuí frequentemente é atingida pelas enchentes, sendo considerada uma das mais problemáticas bacias do Estado, uma vez que são registrados vários eventos de cheias durante o verão. Em razão do exposto, faz-se necessário desenvolver ferramentas que venham a contribuir ao entendimento das características hidrológicas das cheias na bacia do rio Iguaçu/Sarapuí e na modelagem destes fenômenos, de maneira a contribuir para o alerta antecipado de eventos hidrológicos extremos.



### **3. OBJETIVOS**

- Entender quais são as condições meteorológicas e hidrológicas associadas às cheias ocorridas na bacia do Rio Iguaçu/Sarapuí.
- Calibrar o modelo MHD-INPE para a Bacia do Rio Iguaçu/Sarapuí, utilizando como dados de entrada a precipitação observada.
- Avaliar o desempenho do modelo na representação dos processos de transformação chuva – vazão na bacia do Rio Iguaçu/Sarapuí.
- Examinar o desempenho do mesmo modelo quando alimentado por dados de radar.
- Avaliar a capacidade e adequação dessa estrutura de modelagem na emissão de alerta de cheias para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro - RMRJ.



## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1. Desastres naturais no Brasil

Segundo o *Emergency Events DataBase* (EM-DAT) da Universidade Católica de Louvain, da Bélgica, a maior parte dos desastres naturais ocorrem em países em desenvolvimento. Isto em consequência dos problemas socioeconômicos desses países, como o crescimento desordenado das cidades, ocupação das áreas de riscos, entres outros fatores.

A Tabela 4.1 apresenta o resumo dos desastres naturais ocorridos no Brasil desde 1900 até 2012. Nota-se que os eventos de inundações se destacam entre os 198 desastres registrados, correspondendo a 57% das ocorrências (Figura 4.1). Estas são responsáveis por 61% das mortes; 25% dos afetados e 53% das perdas econômicas. Ressalta-se que o EM-DAT só contabiliza os desastres classificados como severos e que resultam em dezenas de mortes, centenas de desabrigados e/ou grandes perdas econômicas. Os desastres de pequeno e médio porte são desconsiderados, o que indica que esses valores são ainda maiores do que os apresentados na tabela.



Figura 4.1 – Resumo dos Desastres Naturais no Brasil e percentual de ocorrência dos eventos registrados no período de 1900-2012.

Fonte: EM-DAT (2012)

Tabela 4.1 – Resumo dos Desastres Naturais no Brasil desde 1900.

Desastres		Nº de Eventos	Nº de Mortes	Nº de Afetados	Prejuízo (US\$)
Seca	Seca	16	20	47812000	4723100
	Média por evento	-	1,3	2988250	295193,8
Epidemia	Não Especificado	2	303	235	-
	Média por Evento	-	151,5	117,5	-
	Doenças Infecciosas (Bacteriana)	5	1696	45893	-
	Média por Evento	-	339,2	9178,6	-
	Doenças Infecciosas (Viral)	9	218	994095	-
	Média por Evento	-	24,2	110455	-
Temperaturas Extremas	Onda de Frio	5	154	600	1075000
	Média por Evento	-	30,8	120	215000
	Onda de Calor	3	201	-	-
	Média por Evento	-	67	-	-
Inundações	Não Especificado	51	4016	8155931	2887814
	Média por Evento	-	78,7	159920,2	56623,8
	Enchente	7	591	245331	175770
	Média por Evento	-	84,4	35047,3	25110
	Inundações em Geral	54	2875	10142494	4186170
	Média por Evento	-	53,2	187824	77521,7
Infestação de Insetos	Não Especificado	1	-	2000	-
	Média por Evento	-	-	2000	-
Movimento de massa	Deslizamentos	23	1656	4237484	86027
	Média por Evento	-	72	184238,4	3740,3
Tempestades	Não Especificado	7	277	50076	-
	Média por Evento	-	39,6	7153,7	-
	Ciclone Extratropical	1	3	1600	-
	Média por Evento	-	3	1600	-
	Tempestade Local	8	66	11356	91000
	Média por Evento	-	8,3	1419,5	11375
	Ciclone Tropical	1	4	150060	350000
	Média por Evento	-	4	150060	350000
Incêndio	Incêndios Florestais	1	-	-	-
	Média por Evento	-	-	-	-
	Incêndios em Pastagens	2	1	12000	36000
	Média por Evento	-	0,5	6000	18000
<b>Total</b>		196	12081	71863155	13610881

Fonte: EM-DAT (2012).

O Estado do Rio de Janeiro destaca-se por apresentar cheias, principalmente durante o verão; porém, muitos desses casos ficaram registrados somente em relatos da população e em publicações em jornais da época, já que não há uma gestão de risco que documentasse esses eventos. A seguir, apresenta-se um breve histórico desses eventos, extraído de Paiva (2011), Souza (2010) e do relatório final do Projeto Iguaçu (COPPE,1996):

- No dia 02 de janeiro de 1966, o Estado da Guanabara sofreu com a cheia, o que culminou em 250 mortes e 50000 desabrigados.
- No dia 20 de janeiro de 1967, novamente o Estado da Guanabara foi atingido pelas cheias, acarretando em 300 mortes e 25000 desabrigados.
- Em fevereiro de 1988, uma cheia excepcional deixou um rastro de destruição, mortes e doenças na Baixada Fluminense (COPPE, 1996). Registraram-se cerca de 280 mortes e 2000 desabrigados.
- No dia 11 de novembro de 2009, intensa atividade convectiva oriunda da Zona Convectiva de Umidade situada sobre o Rio de Janeiro deixou 3039 pessoas desabrigadas.
- No dia 30 de dezembro de 2009, fortes tempestades, associadas à instabilidade atmosférica, deixaram 68 mortos e 520 desabrigados na Baixada Fluminense e em Angra dos Reis.
- Nos dias 05 e 06 de abril de 2010, um sistema frontal atuou sobre o Rio de Janeiro gerando inundações e deslizamentos em toda a RMRJ, atingindo principalmente a BF e Niterói.

#### **4.1.1 Conhecendo o Risco**

A vulnerabilidade a qual a população brasileira está frequentemente exposta tem sido cada vez mais destacada em fóruns nacionais e internacionais (IPCC, 2007). Esta tem aumentado, visto que, hoje em dia, a maioria da população vive nas grandes regiões metropolitanas nacionais, como, por exemplo, nas regiões metropolitanas de São Paulo e Rio de Janeiro.

De acordo com Veyret (2004), o risco natural é a percepção da uma população ou indivíduo sobre um grande perigo, normalmente associado a fenômenos climáticos, geológicos, hidrológicos e morfológicos. Dependendo das suas dimensões espaciais e temporais, o risco pode gerar uma catástrofe. O acontecimento de uma catástrofe gera a necessidade de conhecer o risco, para que se forme uma política de previsão, prevenção e de proteção. Essas medidas tornaram viáveis a análise da crise e a experiência obtida com ela, formando assim uma gestão de risco preparada para uma nova crise. Segundo Marcelino (2007), essa política pode ser dividida em 3 fases:

- Antes – Período que antecede o evento, também conhecida como fase de previsão e preparação. Determinam-se medidas para a redução dos danos causados pelo evento. Esta é a fase mais importante, em que se destacam os trabalhos da Meteorologia e da Hidrologia (previsão e alertas).
- Durante – Realizações de ações emergenciais que visam o socorro e assistência às vítimas.
- Depois - Associado à reestruturação das áreas afetadas.

Estas geram um ciclo que precisa ser administrado de forma abrangente, para obtenção da redução do número de vítimas fatais.

#### **4.1.2 Monitoramento e Previsibilidade**

O monitoramento tem como finalidade prever o acontecimento de um determinado desastre, com o máximo de antecipação possível, reduzindo danos e prejuízos, aprimorando as ações de resposta aos desastres e reduzindo as vulnerabilidades da população em risco (CASTRO, 1999).

De acordo com Chan (2007), a Meteorologia atua no monitoramento e previsão de vários tipos de riscos naturais, tais como chuvas intensas, vendavais, geadas, ondas de calor/frio, secas, incêndios florestais, entre outros. Essa atuação se dá através de:

- 1- Previsão *Nowcasting* (previsão de curtíssimo prazo);

- 2- Previsões com até 15 dias de antecedência;
- 3- Previsão climática;
- 4- Previsão das mudanças climáticas.

A capacidade de prever com exatidão a evolução da atmosfera é restringida pela natureza caótica do sistema atmosférico (CHAN, 2007). Em função desse caráter dinâmico, imagens de satélites e informações de radares meteorológicos, adicionados aos resultados dos modelos matemáticos, podem auxiliar na previsão do tempo, e assim subsidiar a emissão de alertas de tempestades severas.

O monitoramento e a previsão fazem parte das medidas para o controle das inundações que devem ser tomadas para a redução das consequências dos desastres. Essas medidas podem ser dos tipos estrutural e não-estrutural, conforme descritas por Tucci (2003) e Castro (2003). As medidas estruturais são aquelas que modificam o sistema fluvial, utilizando obras de engenharia com a finalidade de reduzir os prejuízos decorrentes das enchentes; enquanto que as medidas não-estruturais são aquelas que englobam a utilização de informações geográficas racionais, como, por exemplo, os zoneamentos urbano, periurbano e rural que definem as áreas susceptíveis a inundações.

O zoneamento de áreas de inundação que avalia o uso do solo segundo o risco de inundação, associado ao tempo de recorrência de um determinado evento, deveria reduzir a exposição da população, mas nem sempre está disponível ou é respeitado, seja por despreparo técnico ou político, por desconhecimento pela população ou pela omissão de fiscalização (NAGEN, 2008).

Alterações no nível ou na vazão do rio estão diretamente ligadas às características climatológicas e físicas da bacia hidrográfica. As distribuições temporais e espaciais da precipitação só podem ser previstas com antecedência de poucos dias ou horas. O tempo máximo para previsão de cheias, a partir da ocorrência da precipitação, é limitado pelo tempo médio de deslocamento da água na bacia até a seção de interesse (TUCCI, 2003).

Segundo Tucci (2003), a previsão dos níveis de um rio pode ser estimada a curto ou a longo prazo. A previsão de cheia a curto prazo permite determinar o nível e o tempo de concentração para a seção do rio. Porém, a antecedência depende da previsão da precipitação e dos deslocamentos da cheia na bacia. A previsão de cheia a longo prazo é realizada com até nove meses de antecedência, quantificando as chances de ocorrência da inundação a partir de análises estatísticas de ocorrências passadas e permitindo estimar níveis de enchentes.

No Brasil, após os desastres ocorridos na última década, a cultura de prevenção de desastres naturais está se estabelecendo, devido à frequência e às intensidades desses fenômenos. Isto mobilizou a atenção dos governantes e da população para as vulnerabilidades a que estamos expostos.

Instituições federais, como o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), e o recém-criado Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) do MCTI, instituições estaduais como o Instituto Estadual do Meio Ambiente (INEA) do Rio de Janeiro, bem como a Defesa Civil são algumas das instituições brasileiras competentes que tem como objetivo prover informações meteorológicas confiáveis e monitorar, prever e/ou alertar a sociedade em casos de eventos extremos e riscos iminentes de desastres naturais.

#### **4.1.3 Sistema de Alerta de Cheias na Baixada Fluminense**

Criado pelo Governo do Estado do Rio de Janeiro, através da Lei nº 5.101 de 04 de outubro de 2007, o Instituto Estadual do Ambiente (INEA), tem como missão "proteger, conservar e recuperar o meio ambiente promovendo o desenvolvimento sustentável". Instalado em 12 de janeiro de 2009, unifica a ação dos três órgãos ambientais vinculados à Secretaria de Estado do Ambiente (SEA): a Fundação Estadual de Engenharia e Meio Ambiente (FEEMA), a Superintendência Estadual de Rios e Lagoas (SERLA) e o Instituto Estadual de Florestas (IEF). Entre as atividades mantidas pelo INEA encontra-se a operação da rede de monitoramento do Sistema de Alerta de Cheias, que

tem como objetivo informar autoridades e a população quanto à possibilidade de chuvas intensas e inundações graduais que possa causar algum desastre (Tabela 4.2). Essa rede de monitoramento possui estações telemétricas, que enviam dados automaticamente via celular, a cada 15 minutos, com medição da quantidade de chuva e do nível d'água dos rios (INEA, 2012).

Tabela 4.2 – Tipos de alerta.

<b>Estágio</b>	<b>Situação</b>
<b>Vigilância</b>	Sem chuvas ou chuvas fracas e esparsas. Nível d'água normal.
<b>Atenção</b>	Previsão de ocorrência de chuvas moderadas e fortes.
<b>Alerta</b>	Registro de chuvas intensas. Subida do rio acima do normal.
<b>Alerta Máximo</b>	Continuação da chuva. Rio atingindo 80% do nível de transbordamento.

Fonte: INEA

O Sistema de Alarme de Cheias abrange algumas regiões do Estado do Rio de Janeiro. Inicialmente, esse sistema foi implantado em 2007 para o monitoramento da Bacia do Rio Iguaçu/Sarapuí, RJ (Tabela 5.2) e começou a operar em janeiro de 2008. Posteriormente, foi expandido pra a Região Serrana (Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo) em novembro de 2011, para a Região Norte-Noroeste (Lajes de Muriaé, Itaperuna, Cardoso Moreira, Italva, Porciúncula, Natividade, Santo Antônio de Pádua, Bom Jesus do Itabapoana e Campos dos Goytacazes) em dezembro de 2011, para Macaé em setembro de 2011 e outras regiões (Miguel Pereira, Niterói, Tanguá, Paracambi, Angra dos Reis e Maracanã).

#### **4.2. Regime de chuvas na Região Metropolitana do Rio do Janeiro**

Diversos fenômenos meteorológicos estão diretamente ligados ao regime de chuvas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), tais como as Frentes Frias, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM). A magnitude da precipitação nas sub-regiões da RMRJ depende da localização geográfica, topografia e da proximidade com o mar. Outro fator que também contribui com esses eventos é

a sazonalidade, de modo a proporcionar uma maior ou menor intensidade de precipitação (LEAL et al., 2010). Em relação à variação anual de precipitação, destaca-se a influência dos fenômenos El Niño e La Niña (ESTEVEZ et al., 2006).

O Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) predomina sobre a maior parte do tempo sobre o Estado do Rio de Janeiro. Esse padrão de estabilidade é interrompido pelos sistemas transientes que geram aumento da nebulosidade, intensificação dos ventos e precipitação. Dentre eles, os sistemas frontais (SF) são os que provocam a maior parte das chuvas intensas sobre a cidade do Rio de Janeiro (DERECZYNSKI, 2008).

#### **4.2.1. Frentes Frias**

Um SF é a zona de transição entre duas massas de ar de densidades diferentes, que apresenta fortes gradientes de temperatura e umidade (AHRENS, 1993).

A frente fria representa uma zona onde o ar polar frio, seco e estável, que se desloca em direção as baixas latitudes, encontra o ar subtropical quente, úmido e instável. Isto gera acentuadas mudanças de temperatura, variação na umidade atmosférica, mudanças na direção do vento, alterações de pressão, aumento da nebulosidade e ocorrência de precipitação.

A climatologia da passagem de frentes frias sobre a América do Sul (FIGURA 4.2) durante o período de 1979 a 2005 foi realizada por Cavalcanti e Kousky (2009). Sobre o Rio de Janeiro verificou-se, em média, cerca de 20 a 35 frentes por ano, dependendo da região do Estado. Observou-se também que existe uma sazonalidade na frequência de passagens das frentes frias, sendo mais numerosas de maio a setembro e menos de dezembro a fevereiro (verão no Hemisfério Sul).

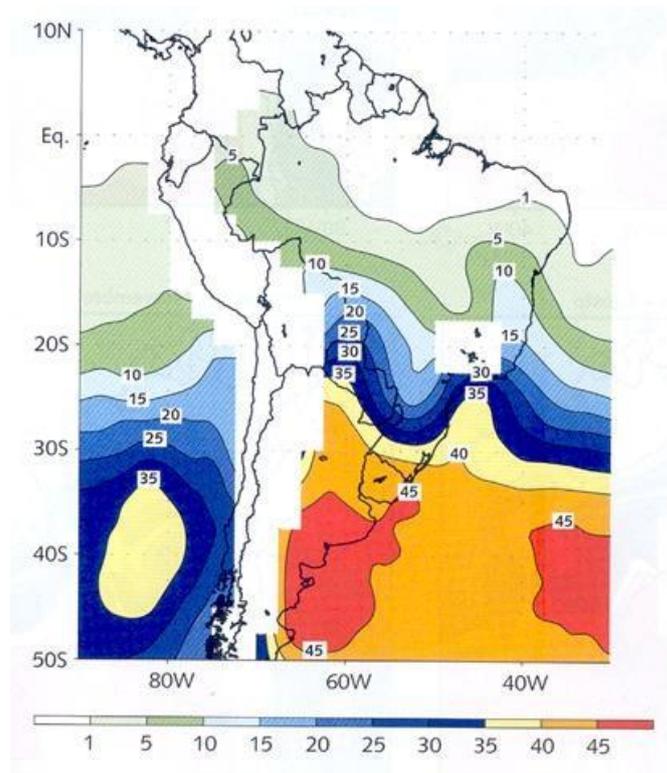


Figura 4.2 – Climatologia da passagem de frentes frias sobre a América do Sul.  
 Fonte: Tempo e Clima.

Segundo Oliveira (1986) e Lemos e Calbet (1996) (citados por JUSTI DA SILVA E SILVA DIAS, 2002), apesar de haver maior frequência de entrada de frentes frias durante o período do inverno, a atividade convectiva associada a elas é extremamente baixa. É durante o verão que as frentes possuem maior atividade convectiva, gerando mais precipitação.

#### 4.2.2. Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)

Kodama (1992) definiu a ZCAS como uma zona de precipitação significativa que ocorre durante o verão da América do Sul, com extensão entre o trópico e o extra-trópico, no sentido NW-SE. As propriedades estruturais e das características da ZCAS variam de acordo com sua intensidade e localização, oceano ou continente (Carvalho, 2003). Na Figura 4.3 tem-se a representação das características estudadas por Carvalho (2003) para o comportamento da ZCAS na América do Sul.

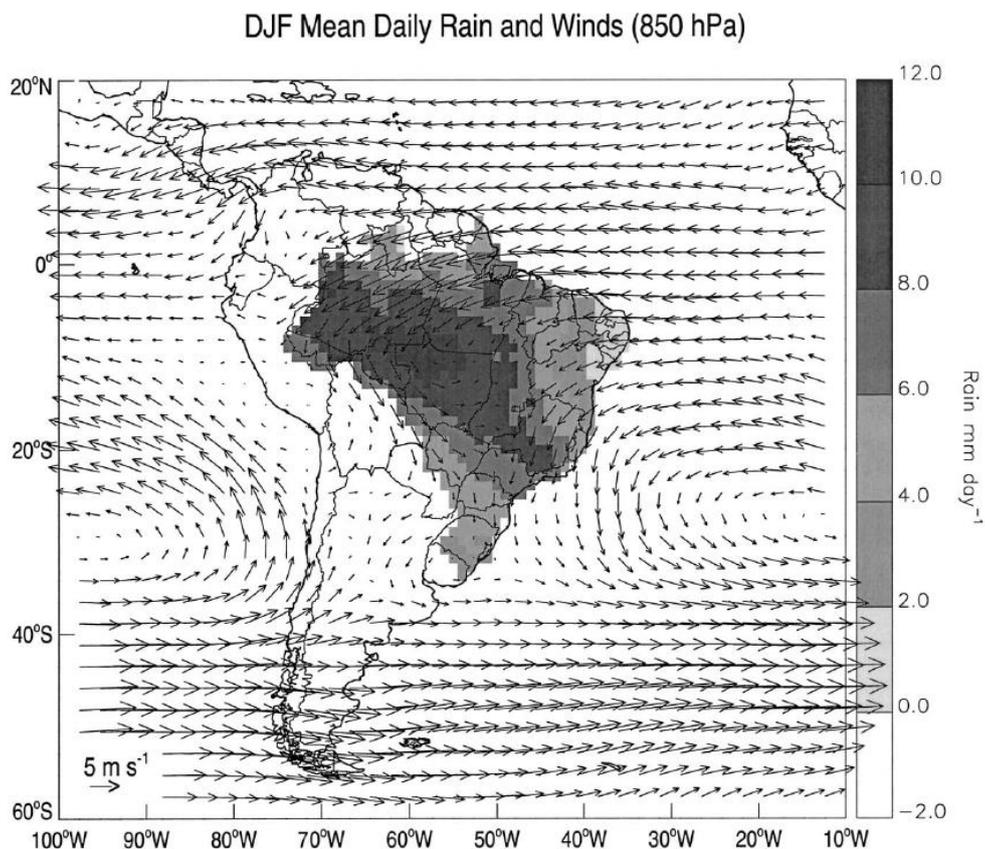


Figura 4.3 – Climatologia da precipitação média diária e ventos (850hPa) para o verão da América do Sul.

Fonte: Carvalho, 2003.

A ZCAS tem grande influência no regime pluviométrico, devido à permanência do sistema por vários dias sobre uma mesma região. Consequentemente, a precipitação média mensal, quando há a ocorrência deste fenômeno, é maior do que o valor médio mensal de quando não ocorre (SANCHES, 2002). Observações indicam uma associação entre a permanência da ZCAS sobre a região Sudeste e os eventos de enchentes de verão no Sudeste e secas no Sul. Contudo, períodos extremamente chuvosos no Sul coincidem com seca na Região Sudeste, indicando a presença de ZCAS mais ao sul (KODAMA, 1992).

Segundo Carvalho (2003), a intensidade da ZCAS está associada às anomalias negativas da radiação de onda longa. Ela sofre influência da Oscilação de Madden Julian, que atua sobre a persistência da ZCAS ocasionando precipitações extremas.

Em um estudo realizado por Seabra (2004), foi constatado que um mesmo evento ZCAS pode gerar diferentes impactos sobre uma bacia hidrográfica, dependendo do posicionamento da banda de nebulosidade associada a ela. Mesmo não apresentando uma relação linear com a precipitação, a vazão é influenciada pelos altos valores de precipitação decorrentes da persistência do fenômeno.

#### **4.2.3. Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM)**

Os SCM são compreendidos por um conjunto de nuvens convectivas, que apresentam área com precipitação contínua, estratiforme e/ou convectiva (HOUZE, 1993). Esses sistemas são classificados como Linhas de Instabilidade (LI) ou Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM). Maddox (1980) denominou por CCM, SCM com forma quase circular e diâmetro de centenas de quilômetros. Predominantemente ocorrem em regiões com frequência máxima de convecção profunda (VELASCO, 1987).

Na região de estudo não há ocorrência de CCMs. O SCM atuante naquela área é a LI, definida como a formação de uma linha de tempestades severas. Frequentemente posicionadas na dianteira da frente fria, cerca de 100 a 300 km, em alguns casos elas estão localizadas ao longo de uma frente fria (AHRENS,1993). Sua propagação pode ser dada em função do efeito das correntes descendentes, geradas pela precipitação, que ao atingirem a superfície divergem em todas as direções, porém encontrando contrastes térmicos e de umidade apenas adiante da banda de precipitação. Novas células se formam acima da frente de rajada, produzida pelas correntes descendentes, que convergem com o ar ambiente adiante da linha (SILVA DIAS,1987).

A partir de uma análise de 160 eventos de precipitação intensa, Dereczynski *et al.* (2009) obtiveram a frequência de ocorrência dos sistemas meteorológicos que atingiram a cidade do Rio de Janeiro ao longo do ano. Os resultados indicaram que 77% das chuvas intensas foram provocadas por sistemas frontais, 13% pela ZCAS, 8% por SCMs e 2% por efeito de circulação marítima. Observaram também que os sistemas frontais ocorrem ao longo de todo ano,

com declínio no mês de agosto; o período de maior frequência da ZCAS é de outubro a dezembro, com queda de janeiro a março e nula de abril a setembro; e os SCM ocorrem durante todo ano com menor frequência durante o inverno.

Segundo Barbieri (2007), a estação chuvosa no Sudeste acontece entre outubro e março, podendo ter um pequeno desvio no início da estação chuvosa entre um ano e outro. Na cidade do Rio de Janeiro, o trimestre mais chuvoso ocorre entre novembro e janeiro e o menos chuvoso de junho a agosto. Os máximos de precipitação situam-se nos Maciços da Tijuca, Gericinó e Pedra Branca, segundo Dereczynski *et al.* (2009).

### **4.3 Radar Meteorológico**

A precipitação é o processo mais importante do ciclo hidrológico; porém, é uma das variáveis mais difíceis de monitorar, devido ao efeito de sua alta variação espacial e temporal. Esse problema pode ser minimizado através do uso de radares meteorológicos, com alta resolução espacial ( $\leq 1 \text{ km}^2$ ) e temporal ( $\leq 15 \text{ min}$ ), que permite a amostragem do campo de chuva e fornecimento da estrutura tridimensional do sistema precipitante; medições de área e não pontuais; a aquisição de dados não interfere no processo que está sendo observado; obtenção de informações em áreas de difícil acesso para as medições convencionais; entre outras (TROVATI, 2007).

Apesar da alta resolução temporal e espacial, a precipitação que chega a superfície não é a mesma detectada pelo radar, já que o feixe do radar está bem acima do chão, e a relação entre a refletividade do radar e a razão de precipitação depende da distribuição do tamanho das gotas, que varia de um sistema para outro e até mesmo dentro do mesmo sistema (ALMEIDA, 2002). Também, a distância entre o radar e o alvo e a atenuação da radiação por diversos fatores comprometem as medidas de refletividade do radar (AUSTIN, 1987), precisando ser comparadas aos dados de pluviômetros, ou outra fonte de informação conhecida e que possa ser usada como referência. Isso pode ser feito para avaliar os erros associados aos processos de aquisições de dados (COSTA, 2007). A diferença encontrada entre as medidas de

precipitação do radar e pluviômetros é decorrente do próprio método de medida do instrumento e dos erros devido aos princípios físicos de medidas por radar (TROVATI, 2007).

Vários estudos têm procurado melhorar a estimativa da precipitação por radar. Principalmente os que relacionam a intensidade da precipitação obtida através da potência dos alvos espalhados com a precipitação observada por pluviômetros. Por exemplo, Almeida (2002) determinou uma relação entre a refletividade do radar do Pico do Couto e a taxa de precipitação para a RMRJ para chuvas convectivas e estratiformes. Essa estimativa é também fundamental como dado de entrada na modelagem hidrológica e no balanço hídrico (CALHEIROS, 1987). Concluindo que as relações Z-R determinadas no trabalho (Fig. 4.4) não mostraram melhoria significativa em relação à equação de Marshall Palmer usada atualmente no radar do Pico do Couto. E conta-se, também, que devido às grandes incertezas na estimativa de precipitação pela aplicação da relação Z-R é indiferente a escolha da relação a ser empregada, neste caso.

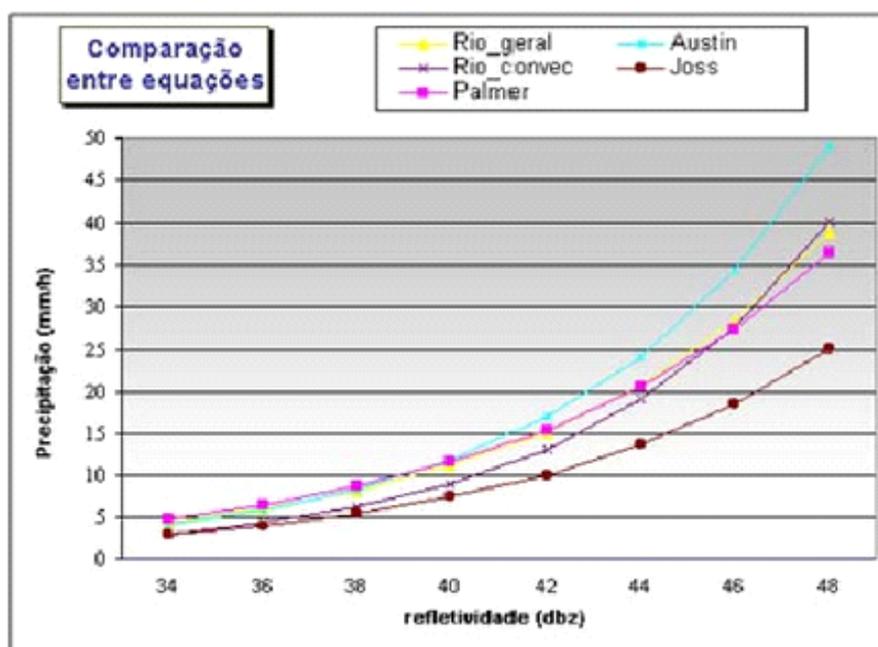


Figura 4.4 - Comparação entre relações Z-R, com refletividade de 34 a 48 dbz.  
Fonte: Almeida (2002)

Gonçalves (2008) avaliou a calibração de radar meteorológico por uma rede de pluviógrafos, para a quantificação da chuva do radar em superfície e a sua aplicação em um modelo hidrológico para prever ondas de cheias. Da Figura 4.5 abaixo se verifica a necessidade de calibração dos dados de radar a partir de dados de uma rede em superfície, uma vez que a precipitação estimada por dados do radar subestimou muito a chuva dos postos. Também a partir da Figura 4.4 pode-se notar uma sensível melhora na estimativa de chuvas após a calibração dos dados de radar pelo Método de Brandes.

Com os dados de radar já calibrados, aplicou-se o modelo do SCS na tentativa de prever as cheias na bacia do rio Cabuçu de Baixo. Os resultados mostraram que o modelo conseguiu prever o valor da vazão máxima com 40 minutos de antecedência (Figura 4.6). Para intervalos de tempo menores ocorre uma subestimação do pico do hidrograma.

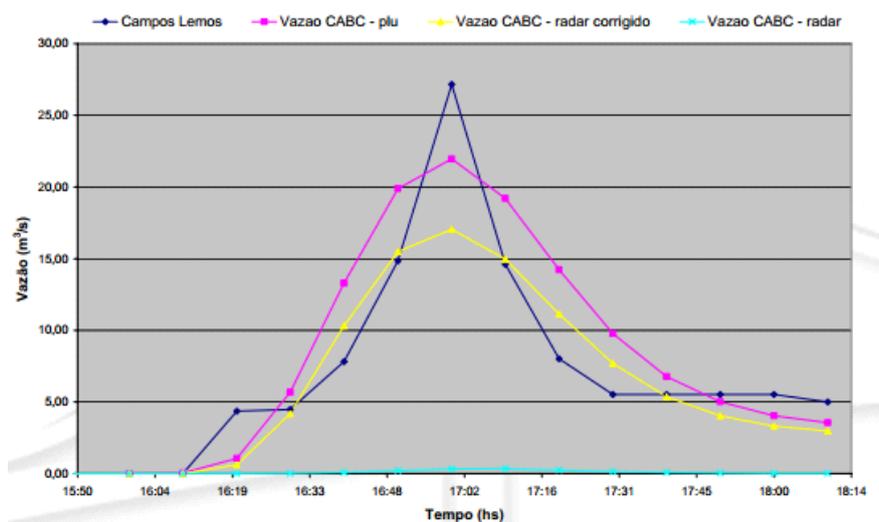


Figura 4.5 - Vazões calculadas pelo CABC utilizando a chuva do pluviógrafo Imobel, radar e com a correção pelo método de Brandes, e observada no posto Campos Lemos.

Fonte: Gonçalves (2008)

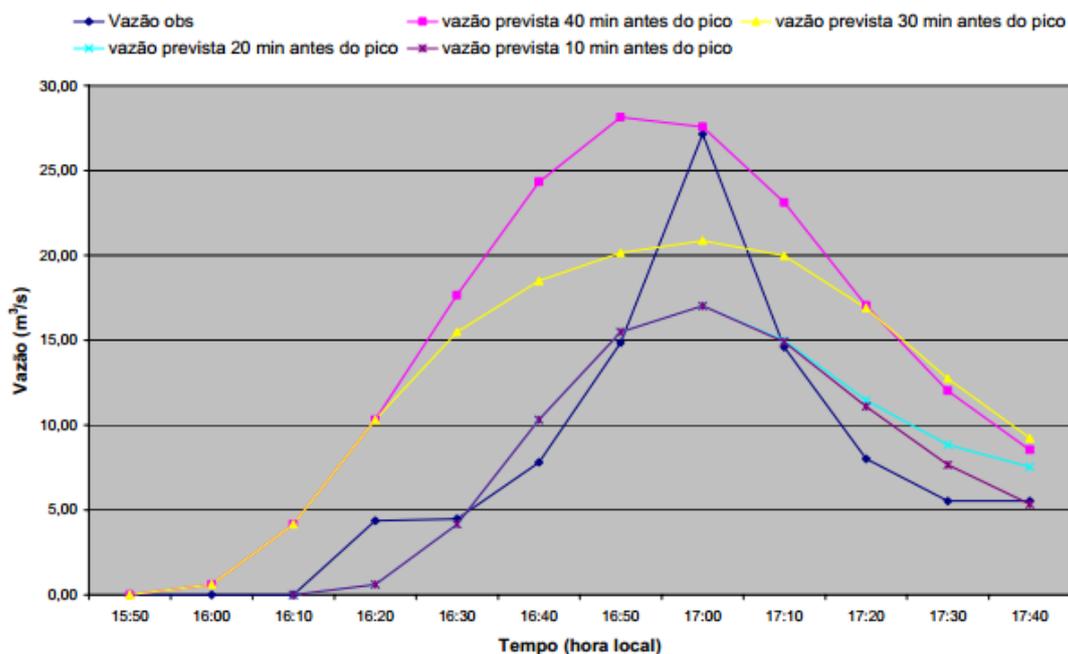


Figura 4.6 - Comparação entre a vazão observada e a prevista para 40, 30, 20 e 10 minutos antes da vazão de pico, para o evento dia 27/03/2002.

Fonte: Gonçalves (2008)

#### 4.4 Modelos hidrológicos e suas aplicações

O modelo hidrológico é uma ferramenta desenvolvida para representar e compreender o comportamento de uma bacia hidrológica (TUCCI, 1998), gerando um hidrograma de escoamento superficial (saída do modelo), a partir de uma precipitação conhecida (entrada do modelo) (SOUZA, 2010). Este tipo de modelo é essencial na antecipação de eventos, na avaliação dos impactos decorrentes das mudanças dos usos e cobertura da terra e no entendimento dos processos hidrológicos. Porém, tem como dificuldades a baixa qualidade e escassez de dados disponíveis, a formulação matemática de alguns processos físicos e a simplificação espacial e temporal dos fenômenos.

A Tabela 4.3 relaciona alguns modelos hidrológicos empregados no gerenciamento dos recursos hídricos.

Tabela 4.3 – Modelos Hidrológicos utilizados no gerenciamento dos recursos hídricos.

<b>Nome</b>	<b>Tipo</b>	<b>Características</b>	<b>Usos</b>
<b>Precipitação-Vazão</b>	Determinístico; empírico; conceitual.	Calcula a vazão de uma bacia a partir da precipitação	Extensão de séries de vazão; dimensionamento; previsão em tempo atual, avaliação do uso da terra
<b>Vazão-Vazão</b>	Determinístico; empírico; conceitual.	Calcula a vazão de uma seção a partir de um ponto a montante	Extensão de séries de vazão; dimensionamento; previsão de cheia
<b>Geração estocástica de vazão</b>	Estocástico	Calcula a vazão com base nas características da série histórica	Dimensionamento do volume de um reservatório
<b>Fluxo saturado</b>	Determinístico	Determina o movimento, vazão potencial de águas subterrâneas a partir de dados de realimentação, bombeamento, etc	Capacidade de bombeamento; nível do lençol freático; interação rio-aquífero, etc
<b>Hidrodinâmico</b>	Determinístico	Sintetiza vazões em rios e rede de canais	Simulação de alterações do sistema; efeitos de escoamento de jusante.

Continua

Tabela 4.3 – Conclusão

<b>Qualidade de Água de rios e reservatórios</b>	Determinístico	Simula a concentração de parâmetros de qualidade da água	Impacto de efluentes; eutrofização de reservatórios; condições ambientais.
<b>Fluxo saturado</b>	Determinístico	Determina o movimento, vazão potencial de águas subterrâneas a partir de dados de realimentação, bombeamento, etc	Capacidade de bombeamento; nível do lençol freático; interação rio-aquífero, etc
<b>Hidrodinâmico</b>	Determinístico	Sintetiza vazões em rios e rede de canais	Simulação de alterações do sistema; efeitos de escoamento de jusante.
<b>Qualidade de Água de rios e reservatórios</b>	Determinístico	Simula a concentração de parâmetros de qualidade da água	Impacto de efluentes; eutrofização de reservatórios; condições ambientais.
<b>Rede de canais e condutos</b>	Determinístico	Otimiza o diâmetro dos condutos e verifica as condições de projeto	Rede de abastecimento de água; rede de irrigação.
<b>Operação de reservatórios</b>	Determinístico Estocástico	Determina a operação ótima de sistemas de reservatórios	Usos múltiplos
<b>Planejamento e gestão de sistemas múltiplos</b>	Determinístico Estocástico	Simula condições de projeto e operação de sistemas (usa vários modelos)	Reservatórios, canais, estações de tratamento, irrigação, navegação fluvial, etc

Fonte: Tucci (1998)

Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos com o intuito de aprimorar os conhecimentos de hidrologia. Várias aplicações de modelos hidrológicos geraram uma grande variedade de abordagens de modelagem e de modelos.

Carneiro (2008) estudou a integração entre o planejamento do uso do solo à gestão dos recursos hídricos, com enfoque no controle de inundações na Bacia do rio Iguaçu/Sarapuí. Para tanto, utilizou o Modelo Matemático de Células de Escoamento para a modelagem hidrodinâmica da bacia e imagens do satélite Landsat-5 para a obtenção do mapa de usos da terra para diferentes cenários. A Figura 4.7 representa um dos mapas de inundação obtidos a partir do modelo de células para os cenários estudados.

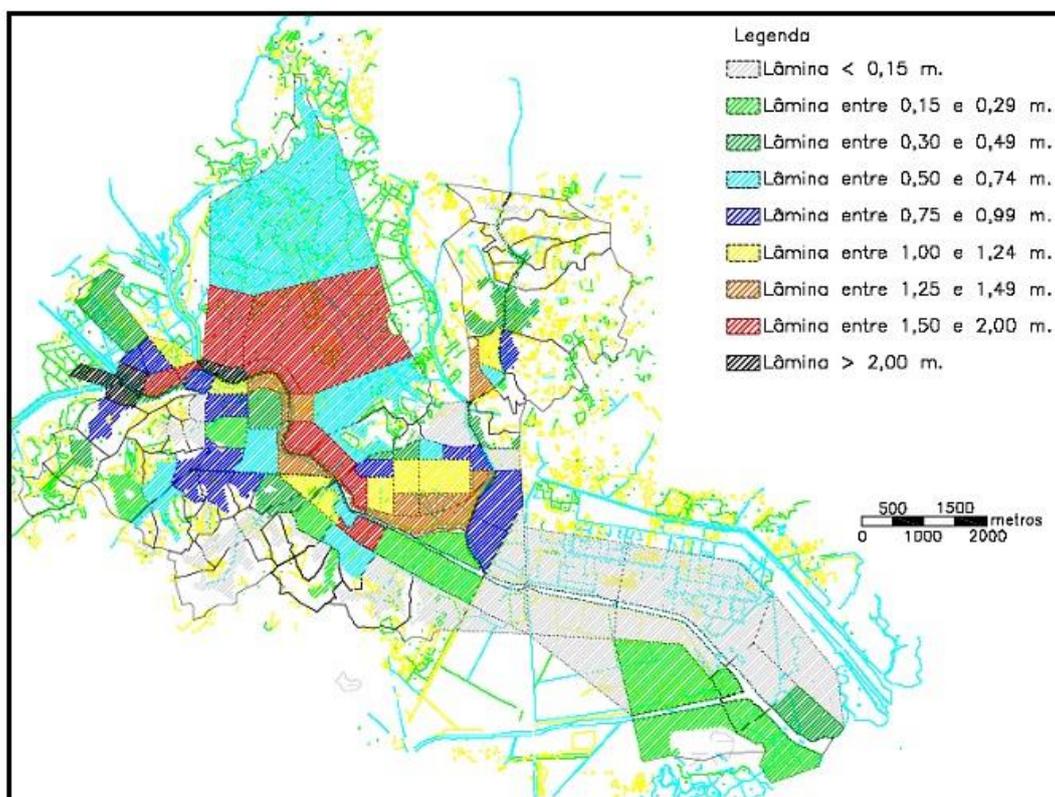


Figura 4.7 – Mancha obtida para as condições atuais de urbanização da bacia.

Fonte: Carneiro (2008).

Em seu estudo, Souza (2010) abordou diferentes formas de modelagem buscando identificar quando é necessário utilizar modelos mais complexos ou modelos mais simples, para obter respostas eficazes para o escoamento estudado, visando suas possíveis aplicações e limitações. Foram utilizados

para algumas seções da Bacia do Rio Iguaçu/Sarapuí os seguintes modelos: Modelo Hidrodinâmico IPH4 do rio Iguaçu; Modelo Hidrodinâmico Quasi-2D em células do rio Iguaçu; Modelo de Escoamento permanente, *Standard Step Method*, do rio Botas; Modelo Hidrodinâmico 1D em células do rio Botas, com o rio Iguaçu modelado Quasi-2D; e Modelo Hidrodinâmico Quasi-2D em células dos rios Botas e Iguaçu. A partir da comparação dos modelos apresentados concluiu-se que:

- Modelos 1D superestimam os níveis d'água em caso de transbordamento da calha do rio. Sendo assim, são recomendados para estudos do escoamento de rios canalizados sem previsão de escoamento em várzeas.
- Modelos Quasi-2D representam bem o extravasamento, possibilitando a identificação das planícies de inundação e viabilizando uma melhor compreensão do funcionamento do rio.
- Modelos de escoamento permanente são úteis em casos para os quais não há necessidade de grande precisão no cálculo do nível d'água, uma vez que estes superestimam o nível d'água.
- Modelos Hidrodinâmicos são indicados para substituir os modelos de escoamento permanente em casos para os quais haja necessidade de uma maior precisão.

O desenvolvimento dos modelos hidrológicos nas últimas décadas se direcionou para modelos para grandes bacias, que trata de forma empírica a distribuição dos parâmetros em áreas de grande extensão; e para modelos de pequenas bacias, que buscam representar com precisão, e de forma distribuída, os processos hidrológicos (RODRIGUEZ, 2011).

Collischonn (2007) desenvolveu, adaptou e testou um modelo hidrológico distribuído, denominado Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH), cujo principal objetivo é representar o comportamento hidrológico de grandes bacias hidrográficas, considerando a distribuição espacial das características físicas mais importantes no processo de transformação de chuva em vazão, no consumo de água por

evapotranspiração e no transporte horizontal da água através da rede de drenagem. Esta ferramenta pode ser utilizada para analisar alguns aspectos da hidrologia de macro-escala, tais como:

- Os efeitos de mudanças de usos da terra, como a substituição de florestas por pastagens, em áreas significativas de grandes bacias hidrográficas;
- As consequências da variabilidade climática sobre a disponibilidade de recursos hídricos em grandes bacias;
- A previsão hidrológica com base na chuva prevista por modelos de previsão de tempo e clima.

Em seu estudo, Rodriguez (2011) analisou o efeito da mudança dos usos e cobertura da terra na resposta hidrológica na bacia de Ji-Paraná/RO, utilizando o modelo hidrológico distribuído (MHD-INPE) e o modelo atmosférico regional ETA. Obteve, como resultado, que as alterações na paisagem afetam as distribuições do volume de chuva e a localização dos núcleos de precipitação máxima. As simulações hidrológicas também mostram que mudanças dos usos da terra afetam os processos de geração de escoamento.

No presente trabalho também será utilizado um modelo de grandes bacias, o MHD-INPE, descrito em detalhes no Capítulo 5.

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1. Área de Estudo

A Bacia do Iguaçu/Sarapuí (Figura 5.1) está localizada na Baixada Fluminense, região esta com alta densidade populacional (Tabela 5.1) e que faz parte da RMRJ. Engloba todo o município de Belford Roxo, parte dos municípios de Nova Iguaçu, Duque de Caxias, Nilópolis, Mesquita e São João de Meriti e alguns bairros da cidade do Rio de Janeiro. A área total de drenagem da bacia é de cerca de 1450 km<sup>2</sup> incluindo as sub-bacias Saracuruna e Acari.

O rio Sarapuí passou a pertencer à Bacia do Iguaçu no início deste século, por ocasião das primeiras grandes obras de saneamento na BF, quando seus cursos médios e inferiores foram retificados e sua foz desviada para o curso inferior do rio Iguaçu (COPPE, 1996).

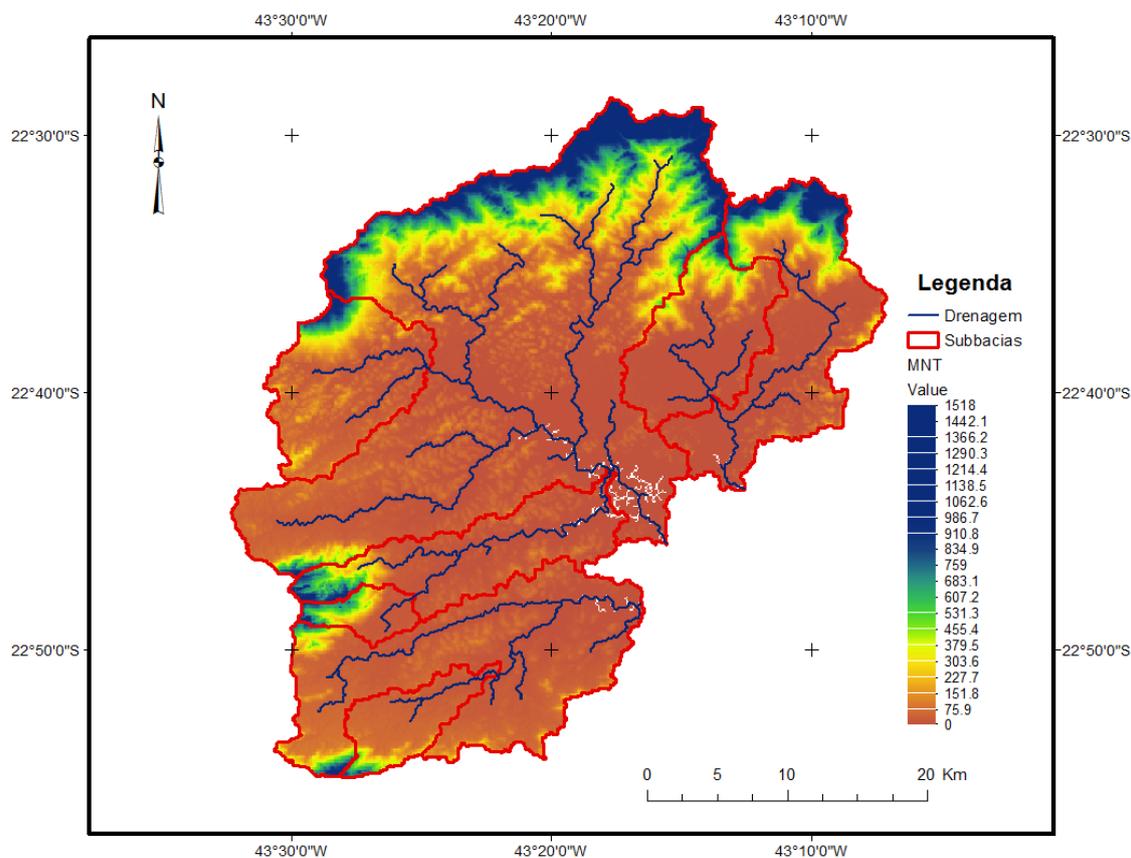


Figura 5.1 – Bacia do Rio Iguaçu/Sarapuí.

Tabela 5.1 – Densidade populacional dos municípios da Baixada Fluminense que integram a bacia do Rio Iguaçu/Sarapuí.

<b>Municípios</b>	<b>População 2010</b>	<b>Área da unidade territorial (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Densidade demográfica (hab/km<sup>2</sup>)</b>
<b>Belford Roxo</b>	469.332	77.815	6.031.38
<b>Duque de Caxias</b>	855.048	467.619	1.828.51
<b>Mesquita</b>	168.376	39.062	4.310.48
<b>Nilópolis</b>	157.425	19.393	8.117.62
<b>Nova Iguaçu</b>	796.257	521.247	1.527.60
<b>São João de Meriti</b>	458.673	35.216	13.024.56

A bacia é caracterizada por duas unidades de relevo: a Serra do Mar e a Baixada Fluminense (Figura 5.2). É limitada ao norte pela Bacia do Paraíba do Sul, ao sul pela Bacia Pavuna/Meriti, a leste pela Bacia do Rio Saracuruna e Inhomorim/Estrela e a oeste pela Bacia do Rio Guandu e outros afluentes da Bacia de Sepetiba. O rio Iguaçu nasce na Serra de Tinguá a uma altura de aproximadamente 1000 m e cerca de 40 km de extensão, desaguando na Baía de Guanabara, tendo como seus principais afluentes o Rio Botas e Sarapuí (a direita) e Capivari, Tinguá e Pati (à esquerda).

O clima da bacia, segundo o Plano Diretor de Recursos Hídricos da bacia dos rios Iguaçu/Sarapuí (1996), é quente e úmido com estação chuvosa no verão, com temperatura média anual em torno dos 22 °C e precipitação média anual em torno de 1700 mm.

## **5.2 Modelos Hidrológicos Distribuído do INPE**

O MHD-INPE utilizado no presente trabalho é uma nova versão, elaborada por Tomasella et al. (em fase de elaboração) a partir do MGB-IPH (COLLISCHONN, 2007), em que modificações nas rotinas de estimativa de evaporação e de separação de fluxos foram implementadas.

A parametrização do MGB-IPH original utiliza a formulação probabilística de distribuição de colunas de água nos pontos de grade, como no modelo Xinanjiang (ZHAO, 1992; ZHAO e LIU, 1995). Já o MHD-INPE combina a formulação probabilística com os princípios utilizados pelo TOPMODEL

(BEVEN e KIRKBY, 1979) para simular a resposta hidrológica. A resposta hidrológica é representada dentro de cada célula utilizando uma distribuição probabilística de três reservatórios de diferentes capacidades (RODRIGUEZ, 2011). A distribuição da capacidade de armazenamento do solo dentro da célula é definida em função das capacidades máximas ( $c_{max}$ ) e mínimas ( $c_{min}$ ), da fração de área e do parâmetro ( $b$ ) que define o comportamento da distribuição. Esses parâmetros estão diretamente relacionados ao tipo de solo e vegetação existente em cada célula, e capacidade de armazenamento da mesma. A capacidade máxima de armazenamento ( $S_{max}$ ) é equivalente ao valor médio da função de distribuição (Figura 5.2), ou seja, a área sob a curva da função de distribuição (RODRIGUEZ, 2011):

$$S_{max} = \int_0^1 c \, df = c_{max} - \frac{c_{max} - c_{min}}{1+b} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

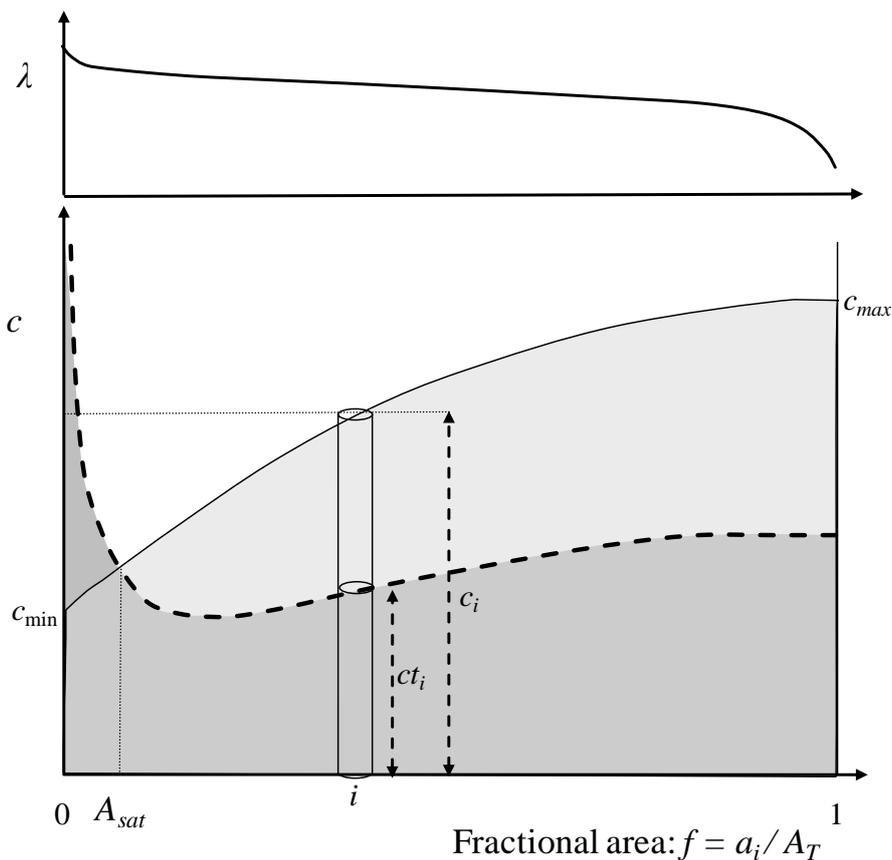


Figura 5.2 – Representação da variação do lençol freático dentro da célula.

Considerando a representação da profundidade da zona saturada e o fluxo d'água subterrâneo o MDH-INPE, assim como o modelo DHSVM (WIGMOSTA

et al, 2002), assume que a superfície do lençol freático acompanha a superfície topográfica local e é proporcional à quantidade d'água em excesso e a capacidade de campo de cada reservatório. Logo, pode-se calcular a percentagem de saturação da área da célula:

$$A_{sat} = f(\lambda_{x,i}) \quad (\text{Eq. 5.2})$$

$$\lambda_{x,i} = \lambda_{\mu}^{\mu} \left[ \frac{S_t - \xi S_{max}}{S_{max}(1-\xi)} \right]^{\mu} \quad (\text{Eq. 5.3})$$

em que,

$\lambda_{x,i}$  é o valor mínimo de área de contribuição, por unidade de contorno;

$\mu$  é um parâmetros de escala que define a forma da relação entre transmissividade e profundidade;

$S_t$  é o armazenamento da camada superior no tempo  $t$ ;

$\lambda_{\mu}$  é o valor médio da área de contribuição a montante por unidade de contorno;

$\xi$  é a porosidade livre espacialmente constante em toda a célula.

O escoamento superficial ( $D_{sup}$ ) corresponde à precipitação ( $P$ ) que incide sobre a área saturada:

$$D_{sup} = A_{sat} P \quad (\text{Eq. 5.4})$$

Na representação do escoamento sub-superficial ( $D_{ss}$ ) a formulação do modelo utiliza a camada de solo superior, responsável pelo atraso entre a percolação e a recarga do aquífero.

$$D_{ss} = \frac{\alpha_{D_1} K_{ss} \tan \beta}{\lambda_n^{\eta}} \left( \frac{SS_t}{SS_{max}} \right)^{\eta} \quad (\text{Eq. 5.5})$$

em que,

$K_{ss}$  é a condutividade hidráulica saturada da camada superior,

$D_1$  é a espessura da camada superior,

$SS_{max}$  é o armazenamento máximo da camada superior do solo;

$\eta$  é o parâmetro de Brooks-Corey;

$\alpha$  é o parâmetro que considera a anisotropia do solo;

$SS_t$  é o armazenamento médio na camada superior;

$\lambda_\eta$  é o valor médio da área de contribuição a montante por unidade de contorno à potência  $\eta$ .

A drenagem profunda ( $D_{sub}$ ) é estimada entre a diferença do fluxo total ( $Q_t$ ) e o fluxo sub-superficial (Eq. 5.4), sendo  $\lambda$  o valor da contribuição à montante, por unidade de contorno.

$$Q_t = \frac{K_{ss}\lambda}{\lambda_n^\eta} \left( \frac{SS_t}{SS_{max}} \right)^\eta \quad (\text{Eq. 5.6})$$

$$D_{sub} = \frac{K_{ss}\lambda}{\lambda_n^\eta} \left( \frac{SS_t}{SS_{max}} \right)^\eta \left( 1 - \frac{\alpha D_1}{\lambda} \right) \quad (\text{Eq. 5.7})$$

Para a resolução da evapotranspiração dos fluxos d'água na célula, o modelo considera duas camadas de solo. A primeira é uma camada superficial de pouca profundidade, responsável pela geração do fluxo superficial e da resposta imediata às demandas atmosféricas, calculada através da metodologia de Penman-Monteith (1981) (Eq 5.8); e a segunda é a camada inferior responsável pela geração dos fluxos sub-superficiais e subterrâneos, e que colabora na manutenção da taxa de transpiração (Eq 5.9) da vegetação (RODRIGUEZ, 2011). A transpiração é calculada em função do stress de cada camada do solo, onde o mesmo não se encontra saturado:

$$E_0 = \frac{1}{L_v} \frac{\delta(R_n - G) + \frac{\rho c_p (e_a - e_d)}{r_a}}{\delta + \gamma} \quad (\text{Eq. 5.8})$$

sendo que,

$L_v$  é o calor latente de vaporização;

$\delta$  é a inclinação da curva da pressão de vapor;

$\gamma$  é a constante psicrométrica;  
 $R_n$  é o saldo de radiação líquida;  
 $G$  é fluxo de calor no solo;  
 $\rho$  é a densidade atmosférica;  
 $c_p$  é o calor específico do ar úmido;  
 $e_a$  é a pressão de vapor de saturação;  
 $e_d$  é a pressão de vapor;  
 $r_a$  é a resistência aerodinâmica.

$$ETR_l = (1 - Asat) \frac{FR_l \tau_l}{\bar{\tau}} \quad (\text{Eq. 5.9})$$

em que,

$FR_l$  é a distribuição de raízes no perfil do solo;  
 $\tau_l$  é o nível de stress em cada camada de solo;  
 $\bar{\tau}$  é o stress médio do solo.

Em relação aos escoamentos superficial ( $Dsup$ ), sub-superficial ( $Dss$ ) e subterrâneo ( $Dsub$ ) os mesmos são retardados e amortecidos na célula, passando por reservatórios lineares antes de alcançar a rede de drenagem. O volume de água contido nos reservatórios sofre variações ao longo do tempo e estão diretamente ligadas as unidades de resposta hidrológica uniforme (URH) de usos da terra.

$$Vsup^t = Vsup^{t-1} + \Delta t \sum_{j=1}^{nb} Dsup_j^t \quad (\text{Eq. 5.10})$$

$$Vss^t = Vss^{t-1} + \Delta t \sum_{j=1}^{nb} Dss_j^t \quad (\text{Eq. 5.11})$$

$$Vsub^t = Vsub^{t-1} + \Delta t \sum_{j=1}^{nb} Dsub_j^t \quad (\text{Eq. 5.12})$$

sendo,

$Vsup$  é volume do reservatório superficial;  
 $Vss$  é o volume do reservatório sub-superficial;

$V_{sub}$  é o volume do reservatório subterrâneo;  
 $t$  é o intervalo de tempo;  
 $nb$  é o número de URH.

Logo, as vazões correspondentes a cada reservatório ( $Q_{sup}$ ,  $Q_{ss}$ , e  $Q_{sub}$ ) resultam da razão entre o volume de água e o tempo de retardo do mesmo. O tempo de retardo dos escoamentos superficial, intermediário e de base ( $T_{sup}$ ,  $T_{ss}$  e  $T_{sub}$ , respectivamente) é calculado em função das características físicas e tempo de concentração da célula.

A soma das vazões estimadas em cada um dos três reservatórios corresponde ao valor da vazão ( $Q_{cel}$ ) da célula que será encaminhada até o canal.

$$Q_{sup} = \frac{1}{T_{sup}} V_{sup} \quad (\text{Eq. 5.13})$$

$$Q_{ss} = \frac{1}{T_{ss}} V_{ss} \quad (\text{Eq. 5.14})$$

$$Q_{sub} = \frac{1}{T_{sub}} V_{sub} \quad (\text{Eq. 5.15})$$

$$Q_{cel} = Q_{sup} + Q_{ss} + Q_{sub} \quad (\text{Eq. 5.16})$$

O cálculo do balanço d'água no solo, da evaporação superficial, da transpiração vegetal, dos escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo, e o escoamento na rede de drenagem estão subdivididos em módulos dentro do modelo.

O modelo realiza a propagação nos trechos do rio utilizando a metodologia de Musking-Cunge (TUCCI, 1998), que relaciona a vazão de saída de um trecho do rio em um intervalo de tempo ( $t$ ) qualquer, as vazões de entrada e saída no intervalo de tempo ( $t-1$ ), e a vazão de entrada no tempo  $t$ . Os parâmetros do modelo Musking-Cunge são estimados com base em alguns dados físicos da

bacia, tais como: comprimento, declividade, rugosidade e largura dos trechos. Essas informações podem ser obtidas de mapas topográficos, observações locais, fotografias e bibliografias.

A representação da bacia no modelo é feita por células de grade de cerca de 1 km de dimensão, interligadas por canais de drenagem, em que cada uma das células pode conter características diferentes. O número de URH é escolhido de acordo com o número de grupos resultantes da combinação das características de usos e cobertura da terra e tipo de solo. Uma URH é caracterizada por uma série de parâmetros, como o armazenamento máximo no solo e o índice de área foliar (IAF) da vegetação (COLLISCHONN, 2001). O objetivo é simplificar essas informações para que cada célula tenha um  $n$  máximo de unidade de resposta hidrológica uniforme (Figura 5.3).

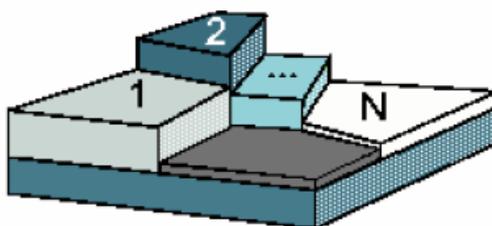


Figura 5.3 – Representação da célula do modelo particionada em “ $n$ ” unidades de resposta hidrológica uniforme.

### 5.3 Dados de Entrada do MHD-INPE

O modelo utiliza informações geomorfológicas, fluviométricas, meteorológicas e da configuração de sua rede de drenagem da bacia para executar suas simulações. A Figura 5.4 ilustra as etapas e os processos de aplicação do modelo.

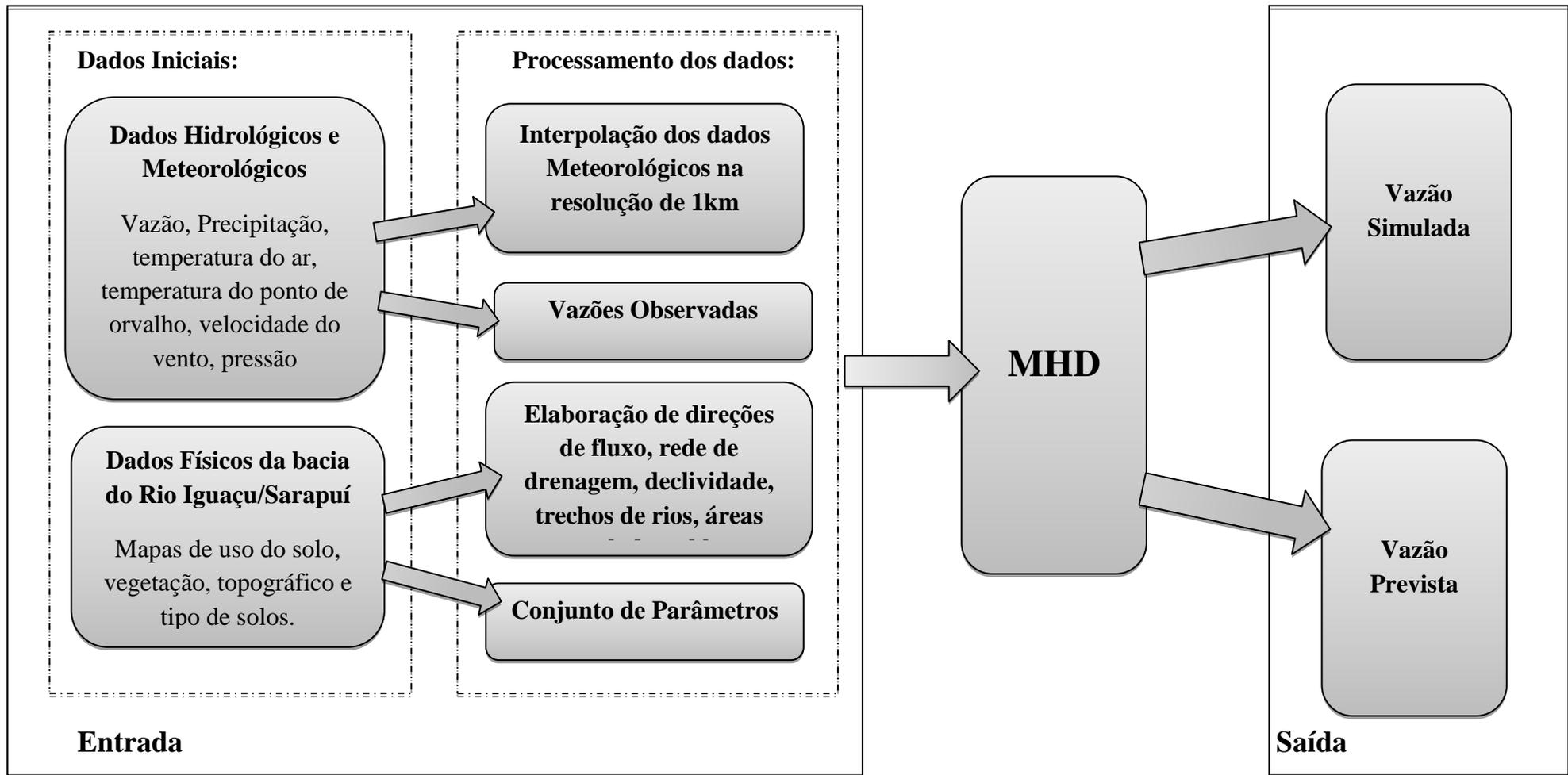


Figura 5.4 – Esquema de operação do MHD-INPE para a bacia do rio Iguazu/Sarapuí.

### 5.3.1 Dados Meteorológicos

Os dados hidrometeorológicos que compõem as series utilizadas neste trabalho são de diferentes origens, com a finalidade de estabelecer uma representatividade da região da bacia estudada.

Os dados pluviométricos são compostos da rede de monitoramento do alerta de cheias do INEA (Figura 5.5) e da rede de estações automáticas do INMET (Tabela 5.3). A rede de monitoramento do INEA possui dez postos pluviométricos e oito fluviométricos (Tabela 5.2), com frequência amostral de 15 minutos, enquanto os dados de precipitação disponibilizados pelo INMET têm frequência amostral de 1 hora. Os dados de precipitação obtidos correspondem ao período de 2008 a 2011.

Tabela 5.2 – Lista de postos da rede de monitoramento do INEA para a Baixada Fluminense.

<b>Estações</b>	<b>Medição</b>	<b>Rio</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
<b>Catavento</b>	Fluviométrica e Pluviométrica	Rio Iguaçu	-22.65061	-43.41943
<b>CET Meriti</b>	Fluviométrica e Pluviométrica	Rio Pavuna	-22.80625	-43.37128
<b>Clube XV</b>	Fluviométrica e Pluviométrica	Rio Sarapuí	-22.80874	-43.43677
<b>Guadalupe</b>	Fluviométrica e Pluviométrica	Rio Acari	-22.85012	-43.37003
<b>GBM Nova Iguaçu</b>	Fluviométrica e Pluviométrica	Rio Botas	-22.74888	-43.45719
<b>Ponte de Ferro Capivari</b>	Fluviométrica e Pluviométrica	Rio Capivari	-22.67231	-43.34106
<b>Ponte de Ferro Piabeta</b>	Fluviométrica e Pluviométrica	Rio Inhomirim	-22.62423	-43.15477
<b>Raiz da Serra</b>	Pluviométrica	-	-22.58010	-43.18983
<b>Santa Cruz da Serra</b>	Fluviométrica e Pluviométrica	Rio Saracuruna	-22.65457	-43.28339
<b>Xerem</b>	Pluviométrica	-	-22.55029	-43.30038

Fonte: INEA (2012).

Os dados meteorológicos (radiação, pressão atmosférica, velocidade do vento, temperatura do ar e temperatura do ponto de orvalho) são oriundos das



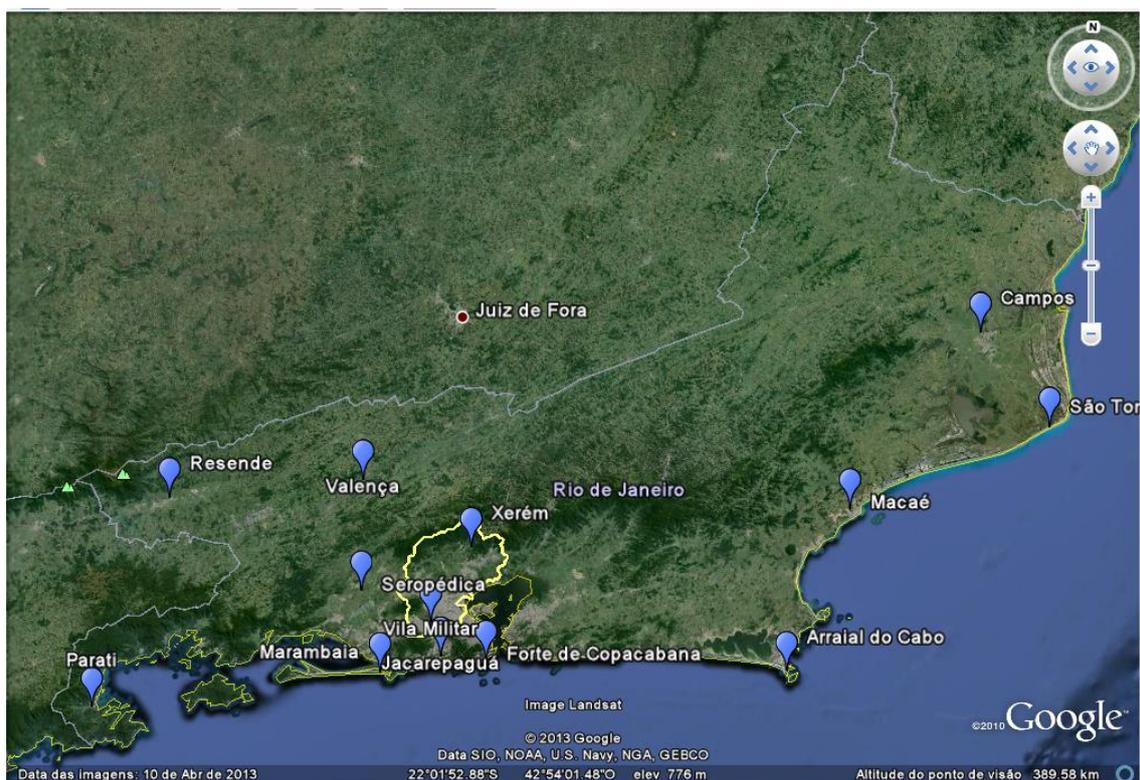


Figura 5.6 – Localização das estações automáticas do INMET utilizadas.

### 5.3.2 Dados do radar do Pico do Couto

Para examinar o desempenho do modelo quando alimentado por dados de radar foram utilizados dados de refletividade CAPPI 3100 (Figura 5.7) do radar Pico do Couto, com frequência de aproximadamente 15 minutos, para os eventos ocorridos nos dias 30 e 31 de dezembro de 2009 e 05, 06 e 07 de abril de 2010.

O radar meteorológico do Comando da Aeronáutica, localizado no Pico do Couto, Petrópolis/RJ, está a uma altitude de 1745 m. É um radar Doppler, banda S, comprimento de onda de 10 cm; resolução de imagem de 100 a 400 pixels, pixel de 1 km<sup>2</sup> cada (ALMEIDA, 2002).

A partir dos dados de refletividade do radar foram feitas as estimativas da taxa de precipitação utilizando uma relação Z-R, em que R é medido em mm/h, a e

b são coeficientes que dependem do tamanho e da distribuição do espectro de gotas na atmosfera.

$$Z = a R^b \quad (\text{Eq. 5.17})$$

As relações Z-R são determinadas experimentalmente para diferentes tipos de chuva. Foi aplicada a relação de Marshall-Palmer (1948) para chuvas estratiformes (Eq. 5.18) e a relação de Woodley (1975) para chuvas convectivas (Eq. 5.19).

$$Z = 200 R^{1,6} \quad (\text{Eq. 5.18})$$

$$Z = 300 R^{1,4} \quad (\text{Eq. 5.19})$$

Para que a precipitação estimada seja inserida como entrada do modelo, foi feita uma interpolação dos dados de radar (2 km x 2 km) a fim de se obter o mesmo tamanho da grade do modelo (1 km x 1 km). Essa interpolação se dá entre a média dos dados utilizados para compor o ponto de grade.

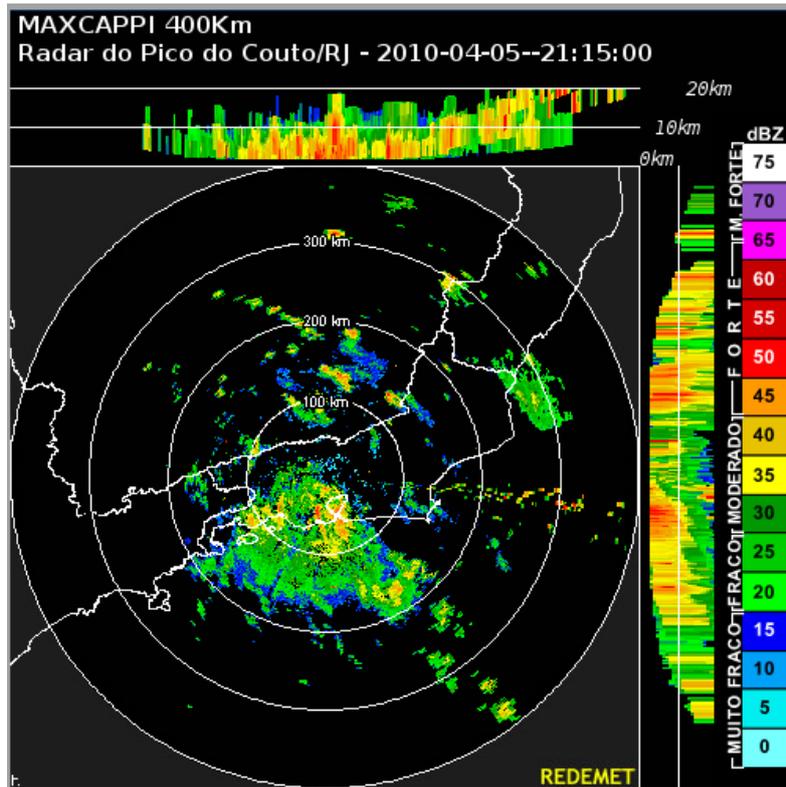


Figura 5.7 – Imagem do radar do Pico do Couto - RJ.  
 Fonte: (REDEMET,2012)

As simulações do modelo têm frequência temporal de uma hora, fazendo-se necessário processar os dados observados em intervalos de tempo inferiores. A chuva observada nas estações do INEA e a estimada pela refletividade do radar foram acumuladas em intervalos de 1 hora.

Dados de precipitação foram interpolados para a mesma grade do modelo (1kmx1km) utilizando o método do inverso do quadrado da distância como mostrado na equação abaixo:

$$x_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^2} * x_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^2} \right)} \quad (\text{Eq. 5.20})$$

em que:

$x_p$  é o valor da chuva interpolada no ponto da grade;

$x_i$  é o valor da chuva na  $i$ -ésima localidade vizinha;

$d_i$  é o valor da distância euclidiana entre o  $i$ -ésimo ponto de vizinhança e o ponto amostrado.

### 5.3.3 Dados Fluviométricos

Dados fluviométricos (cota) também foram disponibilizados pelo INEA para as 10 estações fluviométricas especificadas na Tabela 5.2, com intervalo de 15 minutos, para o período de janeiro de 2008 a dezembro de 2011, além de duas curvas-chaves correspondentes às estações Clube XV (Rio Sarapuí) e Catavento (Rio Iguaçu). Como as curva-chaves disponíveis na seção estavam desatualizadas, a alternativa encontrada para contornar essa falta de dados se deu pela estimativa da vazão ( $Q$ ) calculada pela equação de Manning (Eq. 5.21).

$$Q = \frac{A \cdot R^{2/3} \cdot S_0^{0,5}}{n} \quad (\text{Eq. 5.21})$$

em que:

$A$  é a área da seção;

$R$  é o raio hidráulico;

$S_0$  é a declividade, e;

$n$  é o coeficiente de Manning.

No primeiro momento, a declividade (Eq. 5.22), o raio hidráulico (Eq. 5.23), o perímetro molhado (Eq. 5.24) e a área da seção (Eq. 5.25) foram calculados com base na batimetria (Figura 5.8) obtida do Projeto Iguaçu (COPPE, 2006) para os rios Iguaçu e Sarapuí. Depois foi definido o  $n$  de Manning para os dois rios principais da bacia, Iguaçu e Sarapuí, com base na batimetria dos mesmos e, nas áreas das seções e vazões observadas, cedidas pelo INEA.

$$S_0 = \frac{dh}{dH} \quad (\text{Eq. 5.22})$$

$$R = \frac{A}{P} \quad (\text{Eq. 5.23})$$

$$P = b + (\sqrt{1 + \tan^2 \theta})2d \quad (\text{Eq. 5.24})$$

$$A = \frac{\{b + (b + 2d \tan \theta)\}d}{2} \quad (\text{Eq. 5.25})$$

em que:

dh é a diferença de altura entre dois pontos do terreno;

dH é a distancia horizontal entre dois pontos do terreno;

b é largura do fundo do rio;

d é a altura do nível d'agua;

$\Theta$  é o ângulo de inclinação da parede do rio.

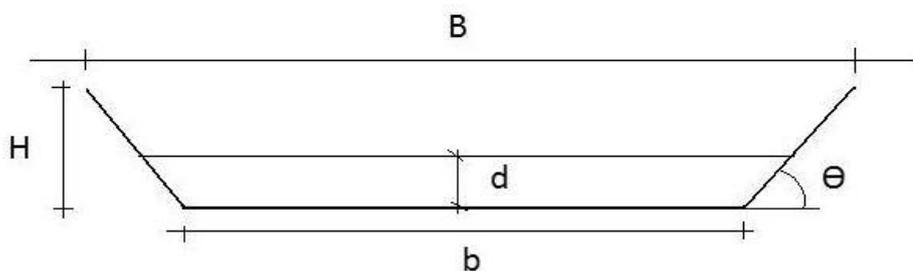


Figura 5.8 – Corte vertical da seção trapezoidal utilizada para o calculo de área das calhas dos rios.

O coeficiente  $n$  encontrado para os dois rios pode ser considerado constante,  $n(\text{Iguaçu}) = 0,07$  e  $n(\text{Sarapuí}) = 0,075$ , de modo que se torna válido utilizá-lo

para os rios Acari e Saracuruna, dos quais se extraiu a batimetria simplificada no local; porém, não há dados de vazões observadas para definir o coeficiente  $n$ .

#### 5.4. Calibração e Validação do Modelo

A calibração de modelos hidrológicos é um processo iterativo, em que os valores dos parâmetros são modificados e seu efeito nos resultados é avaliado repetidamente, até que o hidrograma calculado reproduza o hidrograma observado com boa precisão (COLLISCHONN, 2007).

O período de 2008 a 2011 foi selecionado para a calibração do modelo e eventos específicos ocorridos dentro deste período foram selecionados para a verificação do modelo (dez/2009 e abr/2010). Para a verificação, o período escolhido inclui um evento contido na calibração, pois a série de dados disponível para a bacia é pequena.

Durante a calibração, os valores dos parâmetros foram ajustados com a finalidade de melhorar o ajuste entre as vazões observadas ao longo da bacia e as calculadas pelo modelo. Utilizaram-se, para tal, as funções objetivo Coeficiente de eficiência de Nash Sutcliffe (NASH), Coeficiente de correlação ( $R^2$ ), Coeficiente de correlação dos logaritmos ( $R^2_{log}$ ) e o Erro de Volume (ERRV), explicitados abaixo:

$$NASH = 1 - \frac{\sum(Q_{obs}(it) - Q_{cal}(it))}{\sum(Q_{obs}(it) - XM_{Q_{obs}})} \quad (\text{Eq. 5.26})$$

(Eq. 5.11)

$$ERRV = \frac{\sum Q_{cal}(it) - \sum Q_{obs}(it)}{\sum Q_{obs}(it)} \quad (\text{Eq. 5.27})$$

$$R_2 = 1 - \frac{\sum((Q_{obs}(ib, it)) - (Q_{cal}(ib, it)))^2}{\sum(Q_{obs}(ib, it) - XM_{obs})^2}$$

(Eq. 5.28)

$$R_{2L} = 1 - \frac{\sum[\log(Q_{obs}(ib, it)) - \log(Q_{cal}(ib, it))]^2}{\sum[\log(Q_{obs}(ib, it)) - \log XMLQ_{obs}]^2}$$

em que:

Q<sub>obs</sub>= Vazão observada;

Q<sub>cal</sub>= Vazão calculada;

XM<sub>Qobs</sub> = Média da vazão observada;

XML<sub>Qobs</sub> = Média dos logaritmos da vazão observada;

ib= Índice da bacia;

it = tempo;

No presente trabalho, só foram calibradas as micro bacias encontradas para a cabeceira de cada sub-bacia. Essa limitação se deu devido à distribuição da rede fluviométrica do INEA. A localização das estações tem como propósito antecipar o alerta de cheia nas regiões mais a jusantes conforme a medição do nível do rio, segundo o INEA. A delimitação das sub-bacias Iguaçu, Saracuruna, Sarapuí e Acari foram feitas de acordo com os principais rios de cada trecho, considerando também os rios da qual se tem dados.

As micro-bacias estudadas estão representadas na Figura 5.10 e algumas das suas características estão especificadas na Tabela 5.4. O tempo de concentração apresentado na Tabela 5.4 foi calculado por Paiva (2011). Na Figura 5.9 a micro-bacia 1 corresponde a sub-bacia do rio Sarapuí, a micro-bacia 2 corresponde a sub bacia do rio Iguaçu, a micro-bacia 3 corresponde a sub bacia do rio Acari e a micro-bacia 4 corresponde a sub bacia do rio Saracuruna. Todas as quatro sub-bacias estudadas são de cabeceira, desta forma, foram calibradas individualmente.

Tabela 5.4 – Características físicas das bacias estudadas.

Bacia	Rio	Área (km <sup>2</sup> )	Declividade Média (m/m)	Coefficiente de Manning “n”	Tempo de concentração (h)
1	Sarapuí	13,7	0,00970	0,075	3
2	Acari	17,1	0,00435	0,075	2
3	Iguaçu	38,8	0,00220	0,070	3
4	Saracuruna	78,7	0,00998	0,075	4

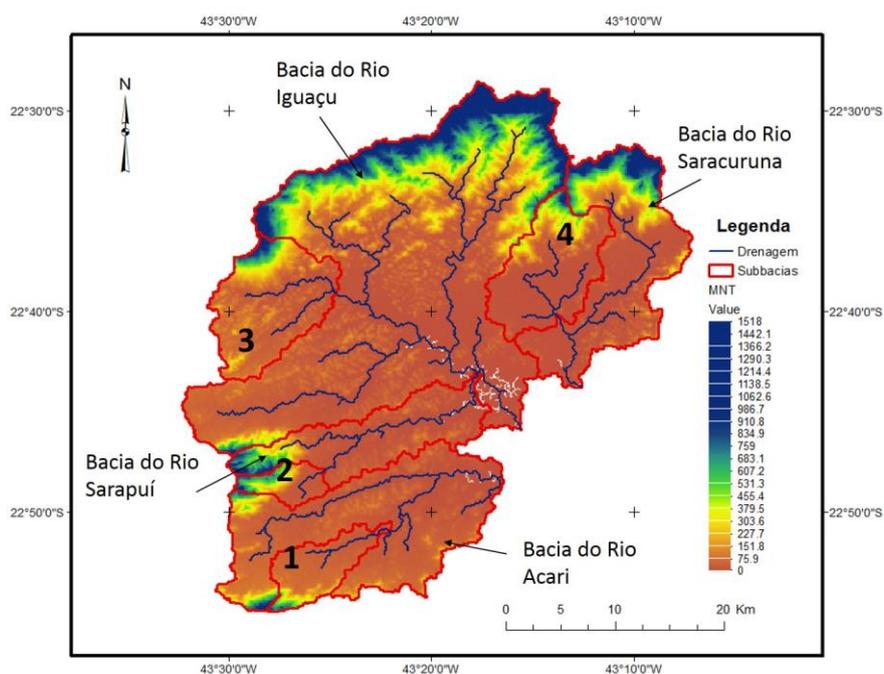


Figura 5.9 – Bacia do Rio Iguaçu/Sarapuí de acordo com a delimitação apresentada pelo INEA. Sub-bacias delimitada conforme os rios de maior contribuição e micro-bacias de acordo com o posicionamento das estações fluviométricas.

## 5.5 Dados do Meio Físico

Com a finalidade de entender os fenômenos da bacia, foram estimados parâmetros espacialmente distribuídos, que utilizam o sistema de informação

geográfica proporcionado pela plataforma TerraHidro (software gratuito disponibilizado pelo INPE), que é otimizada para delimitação e extração de drenagem da Bacia (ROSIM et al., 2008). O modelo digital de elevação empregado foi o SRTM (2012) com resolução de 90m. Dentre os parâmetros estimados citam-se: direções de fluxos, delimitação da bacia, áreas de drenagem acumulada e vetorial, além da declividade dos trechos dos rios.

Apesar das informações espaciais terem sido geradas pelo TerraHidro teve-se que convertê-los para a codificação MGB (Figura 5.10) correspondente a direções de fluxos empregadas pelo modelo.

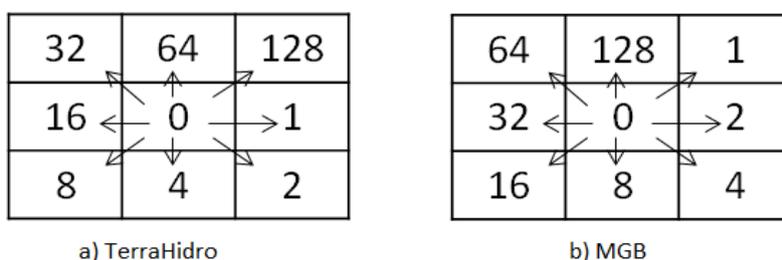


Figura 5.10 – Codificações de direções de fluxo.

Além dos parâmetros gerados descritos acima, utilizados na representação das características físicas da bacia, o modelo também usa, em suas simulações, informações sobre o tipo de solo, vegetação e usos da terra. Todos esses mapas foram empregados na composição das unidades de resposta hidrológica uniforme.

O mapa de classificação dos tipos de solos foi obtido da Base de Dados de Solo e Terreno para a América Latina e Caribe (SOTERLAC), do World Soil Information (ISRIC) com resolução de 1km. Na bacia do rio Iguaçu/Sarapuí encontram-se basicamente quatro tipos de solo (*Clay*, *Sand Clay*, *Sany Clay Loam* e *Clay Loam*) como mostra a Figura 5.11. As informações sobre os diferentes tipos de solos identificados na região estudada contribuirão para a compreensão das propriedades hidráulicas do solo. Para cada perfil de solo é

atribuído um pequeno grupo de parâmetros, descritos por Tomasella (2003), a fim de determinar o potencial de água no solo.

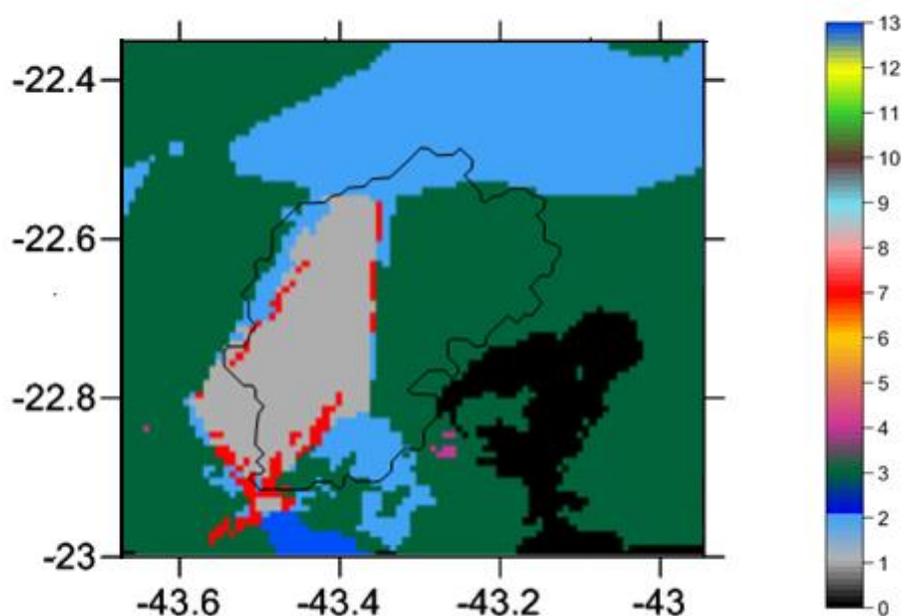


Figura 5.11 – Mapa de solos para a região da bacia.

Fonte: Soterlac (2005)

Tabela 5.5 – Classificação dos tipos de solo.

<b>Código</b>	<b>Tipo de solo</b>
1	<i>Clay</i>
2	<i>Sand Clay</i>
3	<i>Sandy Clay Loam</i>
4	<i>Sandy Loam</i>
5	<i>Loam Sand</i>
6	<i>Sand</i>
7	<i>Clay Loam</i>
8	<i>Loam</i>
9	<i>Silty Clay</i>
10	<i>Silty Clay Loam</i>
11	<i>Silt Loam</i>
12	<i>Silt</i>

O mapa de vegetação (Figura 5.12) utilizado para a construção das URH é originado a partir do mapa desenvolvido pelo projeto PROVEG do INPE (SESTINI et al., 2002; Vieira et al. 2013) com resolução de 1km. O projeto PROVEG visa atualizar a representação dos usos e cobertura da terra em modelos de superfície acoplados a modelos atmosféricos e climáticos, com base nas informações de vegetação do Projeto RADAMBRASIL, mais informações do Projeto Probio do MMA e mapeamentos de outras fontes. A Tabela 5.6 apresenta os tipos de vegetação classificados por esse projeto.

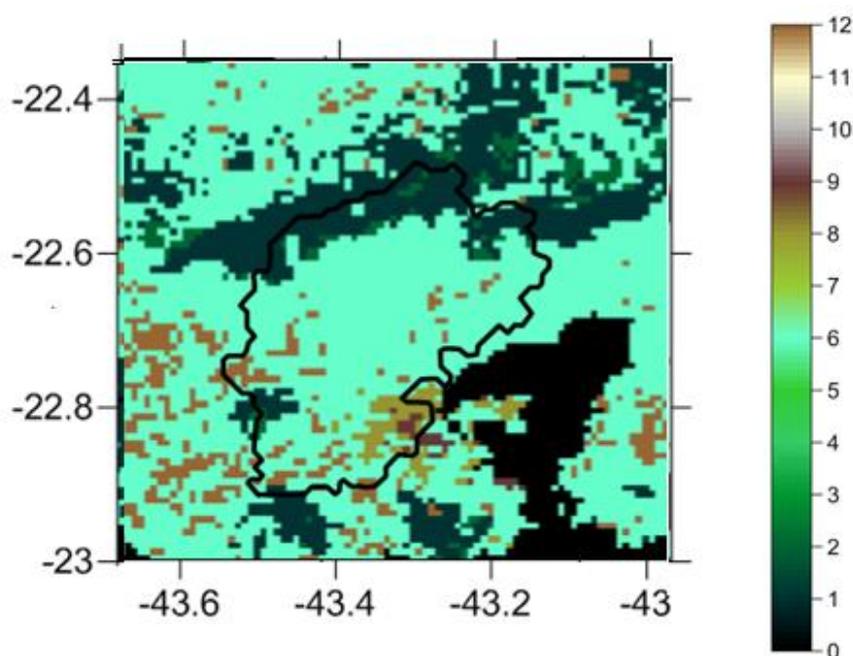


Figura 5.12 – Mapa de vegetação para a região da bacia.

Fonte: Radambrasil (2002)

O mapa de usos do solo (Figura 5.13) foi elaborado considerando também imagens do satélite Landsat (1km x 1km). A primeira etapa consiste em uma classificação automática e a segunda em uma edição gráfica que tem como finalidade corrigir erros de omissão e comissão da classificação. Uma única classe engloba vários tipos de uso/cobertura da terra, essa simplificação é adotada para representar a variabilidade real do uso do solo. Essa classificação é apresentada na Tabela 5.6. Dentre os aspectos de cobertura da

terra, destaca-se a área urbana, classificada como solo exposto no modelo, e a pastagem, dentro do limite da bacia.

Tabela 5.6 – Classificação dos tipos de vegetação.

<b>Código</b>	<b>Tipo de vegetação</b>
<b>1</b>	Árvores Latofoliadas Perenes (Florestas Tropicais) de culf et al.
<b>2</b>	Árvores Latofoliadas Decíduas do SIB
<b>3</b>	Árvores Latofoliadas /Aciculadas (Floresta Mista) do SIB
<b>4</b>	Árvores Aciculadas Decíduas do SIB
<b>5</b>	Árvores Aciculadas Perenes
<b>6</b>	Árvores Latofoliadas com cobertura Arbustiva/Herbácea (Savana) de Hofmann
<b>7</b>	Gramíneas Herbáceas de Wright
<b>8</b>	Arbustos Latofoliados com cobertura Herbáceas Perene do SIB
<b>9</b>	Arbustos Latofoliados com Solo Exposto do SIB
<b>10</b>	Árvores Anãs e Arbustos com cobertura Herbáceas (Tundra) do SIB
<b>11</b>	Solo Exposto
<b>12</b>	Cultivos (SIB usando parametros de sampaio)
<b>13/0</b>	Água e/ou gelo

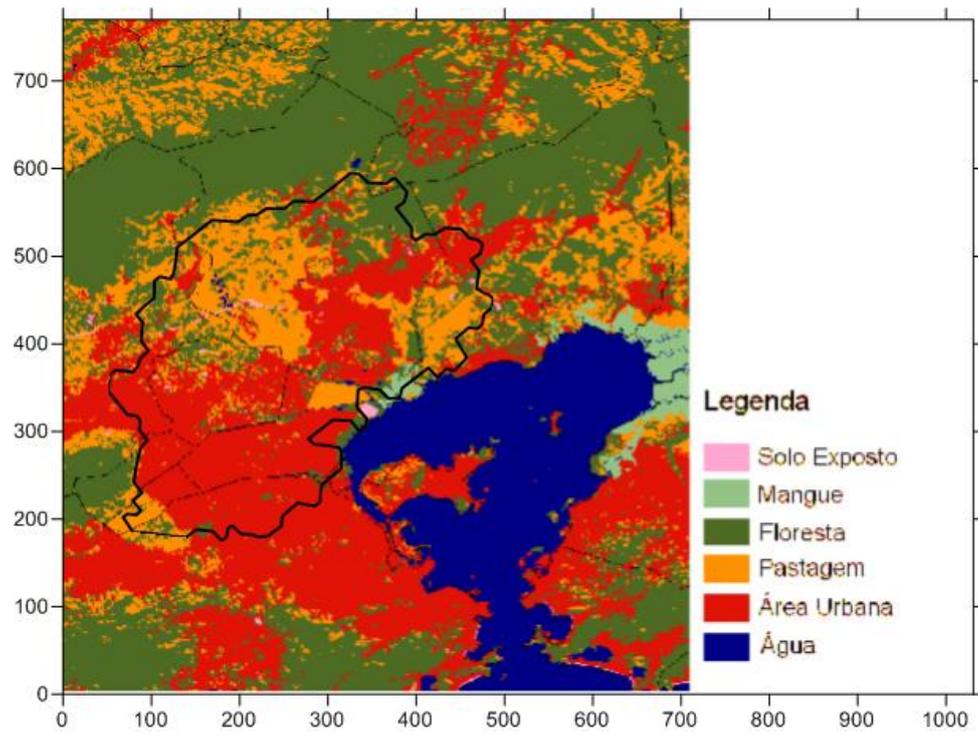


Figura 5.13 – Mapa de uso do solo para a região da bacia e seu entorno.

## **6. RESULTADOS**

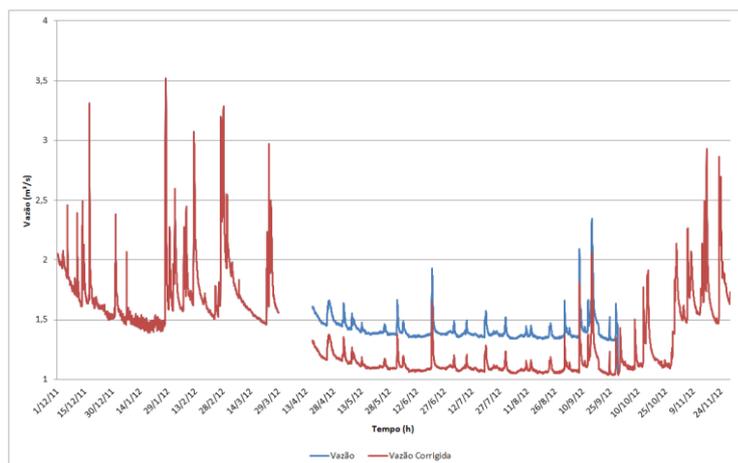
Neste capítulo descrevem-se os resultados de todas as etapas necessárias para a composição dos dados de entrada do MHD utilizadas na calibração e na simulação da bacia. Apresentam-se, também, os resultados da verificação do desempenho do mesmo modelo quando alimentado por dados de precipitação estimados a partir da refletividade do radar do Pico do Couto - RJ.

### **6.1 Controle de Qualidade dos Dados Observados**

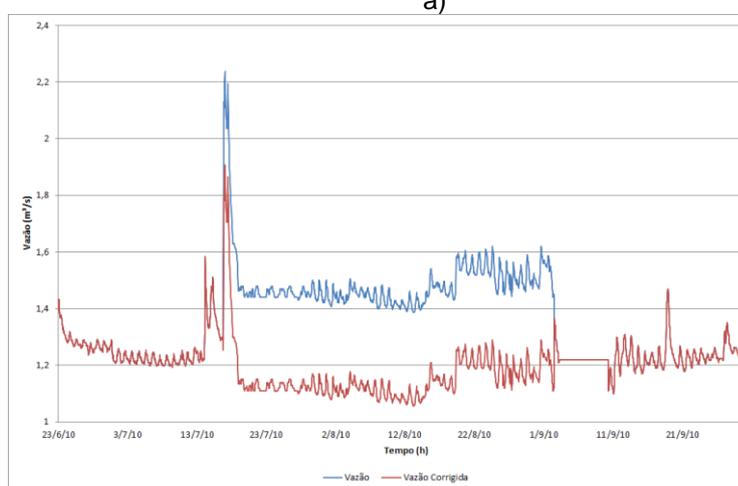
O processo de calibração é a etapa mais importante e a mais trabalhosa da modelagem. Necessita de bons dados de entrada e um ajuste acurado de seus parâmetros. Todos os dados inseridos no modelo podem apresentar certo grau de incerteza, seja da imprecisão dos instrumentos, seja da representação espacial das variáveis no sistema. No presente trabalho tem-se, além do erro esperado, o erro contido na estimativa da vazão que foi gerada a partir da aplicação da equação de Manning aos dados de cota dos principais trechos da bacia. Na aplicação da fórmula de Manning, a maior dificuldade está na determinação do coeficiente de rugosidade devido à irregularidade do canal, erosão e decomposição, obstruções do fluxo, tamanho e forma do canal e mudanças sazonais.

Em complemento, as séries de cotas também apresentam falhas de diversas naturezas. Por se uma bacia localizada em uma região urbana, as calhas dos rios estão sujeitas a frequentes intervenções, obras de engenharia, com intuito de minimizar as inundações e alagamento locais que alteram as seções dos rios dificultando a representação da vazão.

Falhas decorrentes dos instrumentos de medição são mais perceptíveis. Imperfeições identificadas nas séries de cota, e, logo, na vazão foram corrigidas manualmente, a fim de melhorar o ajuste do hidrograma modelado. As Figuras 6.1 a) e 6.1 b) exemplificam o comportamento do hidrograma antes e depois da correção da cota.



a)



b)

Figura 6.1 – Exemplos de correções de falhas identificadas na série de vazão.

## 6.2 Calibração

Para a calibração dos parâmetros do modelo MHD-INPE foi utilizada o método de calibração automática *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA) descrito por Duan et al.(1992). O algoritmo SCE-UA opera com uma população de pontos que “evolui” em direção ao ótimo global através de sucessivas iterações de tentativa e avaliações da função objetivo. Cada um destes pontos é definido pelos valores dos parâmetros e é um candidato ao ótimo.

Devido a deficiência nos dados de vazão apresentadas no item anterior, os valores das funções objetivo para as quatro bacias calibradas estão abaixo dos valores ideais. Além disso, a qualidade do ajuste tende a ser melhor em bacias maiores (COLLISCHONN, 2001).

Os resultados da aplicação do modelo hidrológico MHD-INPE são apresentados em gráficos de hidrogramas horários, curva de permanência, gráfico de dispersão da vazão observada *versus* vazão calculada e sua correlação correspondente, e valores alcançados das funções objetivo.

Na Tabela 6.1 são apresentados os valores dos parâmetros associados às unidades de resposta hidrológica uniforme e na Tabela 6.2 os valores das funções objetivo, ambas obtidas pelo processo de calibração das quatro sub-bacias estudadas. De acordo com os valores atingidos pelas funções objetivo, nota-se que as bacias 3 e 4 são as que apresentam os melhores resultados, em consequência da variação sazonal da vazão correspondente a sazonalidade do regime de chuvas da região. As demais bacias (1 e 2) não apresentam sazonalidade tão marcante em sua vazão.

Tabela 6.1 – Valores dos parâmetros após a calibração.

Parâmetros	Definição	Unidade	Bacia	Valores	
				Mínimo	Máximo
<b>SSMAX</b>	Armazenamento máximo da camada superior do solo	mm	1	935,284	1172,275
			2	1394,885	1748,333
			3	1291,802	1619,13
			4	1438,471	1802,964
<b>SRMAX</b>	Armazenamento máximo na segunda camada intermediária do solo	mm	1	0,633	0,793
			2	0	0
			3	846,039	1060,416
			4	1436,630	1800,656
<b>SMAX</b>	Armazenamento máximo na camada inferior do solo	mm	1	402,550	504,551
			2	1402,825	1758,286
			3	1435,134	1798,781
			4	1436,429	1800,404

Continua

Tabela 6.1 – Conclusão.

<b>KSS</b>	Condutividade hidráulica saturada da camada superior	m/dia	1	10,637	22,756
			2	0,055	0,117
			3	9,371	20,047
			4	9,371	20,047
<b>CSI</b>	Capacidade de Campo		1	10,064	24,218
			2	4,208	12,308
			3	8,611	21,585
			4	4,309	10,802
<b>ALPHA</b>	Coeficiente de anisotropia	Adimensional	1	1155,953	
			2	1,000	
			3	267,523	
			4	59,313	
<b>TSUB</b>	Transmissividade hidráulica em solo totalmente saturado	m <sup>2</sup> /dia	1	1,320	
			2	43,009	
			3	41,258	
			4	20,862	
<b>MU</b>	Parâmetro de decaimento da transmissividade com a profundidade	Adimensional	1	1,019	
			2	1,003	
			3	1,093	
			4	1,750	
<b>CS</b>	Parâmetro de propagação na célula	Horas	1	21,040	
			2	38,670	
			3	50,030	
			4	152,74	
<b>CB</b>	Parâmetro de propagação na célula	Horas	1	6,959	
			2	14,794	
			3	1,089	

Tabela 6.2 – Valores das funções objetivo.

	Bacia 1	Bacia 2	Bacia 3	Bacia 4
<b>NASH</b>	0.3492	0.1212	0.4781	0.5220
<b>R<sub>2</sub></b>	0.3817	0.1244	0.4838	0.5604
<b>R<sub>2L</sub></b>	0.3995	0.1286	0.6169	0.6441
<b>ERR<sub>v</sub></b>	-0.0915	0.0364	-0.0277	-0.0967

A Figura 6.2 apresenta o hidrograma horário observado e calculado da bacia 1 - rio Sarapuí, estação fluviométrica Clube XV, para o período de janeiro de 2008 a dezembro de 2011. A Figura 6.5 mostra o hidrograma horário observado e calculado da bacia 2 - rio Acari, estação fluviométrica Guadalupe, para o mesmo período. Entre as quatro bacias simuladas, a bacia 2 (Rio Acari) foi a que apresentou pior desempenho. Nota-se na bacia 1 uma representação razoável da vazão geral observada; porém, o modelo subestima máximos e muitas vezes os mínimos de vazão. O mesmo observa-se na bacia 2. Essa afirmação pode-se confirmar com a análise da curva de permanência (Figura 6.3 para a bacia 1 e Figura 6.6 para a bacia 2), e do gráfico correlação entre a vazão observada e a calibrada (Figura 6.4 para bacia 1 e Figura 6.7 para a bacia 2). Observa-se também nos gráficos das curvas de permanência (figuras 6.3 e 6.6, bacia 1 e 2, respectivamente) uma faixa de permanência de 25 a 55 % bem representada, ou seja, o modelo pode ser utilizado para representar a vazão média de longo período.

Nas Figuras 6.8 e 6.11 têm-se os hidrogramas horários observados e calculados da bacia 3 - rio Iguazu, estação fluviométrica Catavento, e da bacia 4 - rio Saracuruna, estação fluviométrica Santa Cruz da Serra, respectivamente. Observa-se nas bacias 3 e 4 uma boa representação da vazões observadas; porém, o modelo ainda subestima os picos. Na curva de permanência correspondente às bacias 3 (Figura 6.9) e 4 (Figura 6.12) nota-se subestimativas das maiores vazões e também uma pequena subestimação para a bacia 3. Nestas figuras, verifica-se também que as curvas de permanências são bem representadas para vazões abaixo de 3 % de permanência; assim, aplicações de vazão média de longo período e vazões

minimas pode gerarr resultados satisfários. A correlação das vazões observadas e calibradas para essas duas bacias foram as mais altas encontradas no estudo, isto é, a correlação da bacia 3 é de 0,67 e da bacia 4 é de 0,75.

Em todos as calibrações - figuras 6.2, 6.5, 6.8 e 6.11 - observam-se uma limitação na representação das vazões máximas de cada evento, pois em nenhum dos casos a vazão calculada atinge a linha da vazão de transbordamento. Essa linha representa a vazão correspondente à cota máxima de cada rio, também calculada pela equação de Manning. Assim, com o uso do modelo MDH-INPE para a bacia do Rio Iguaçu/Sarapuí encontrou-se bons resultados na recessão, mas a subida do hidrograma nem sempre está bem representada.

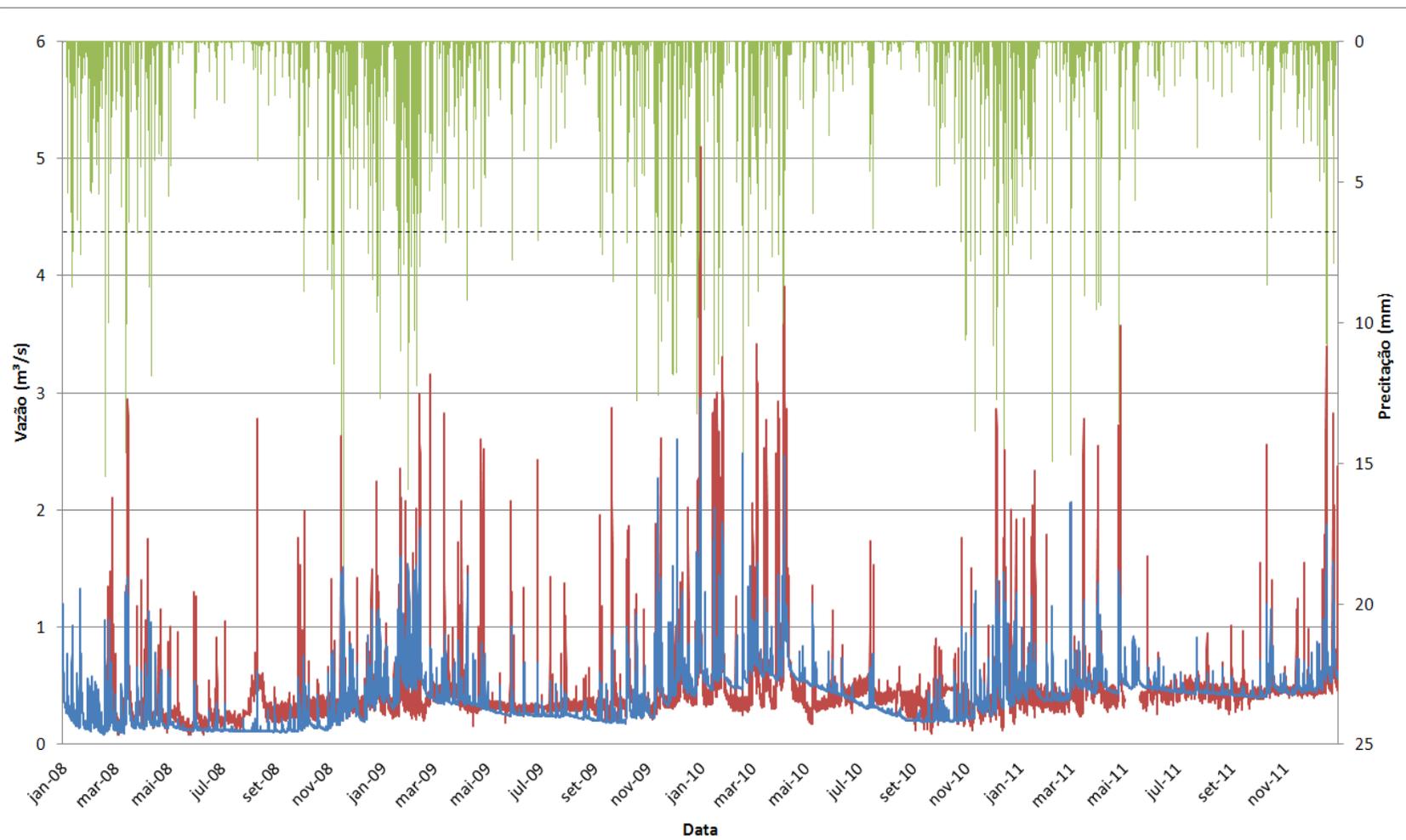


Figura 6.2 – Hidrograma de vazão observado e calculado para bacia 1 (Rio Sarapuí) de 2008 a 2011.

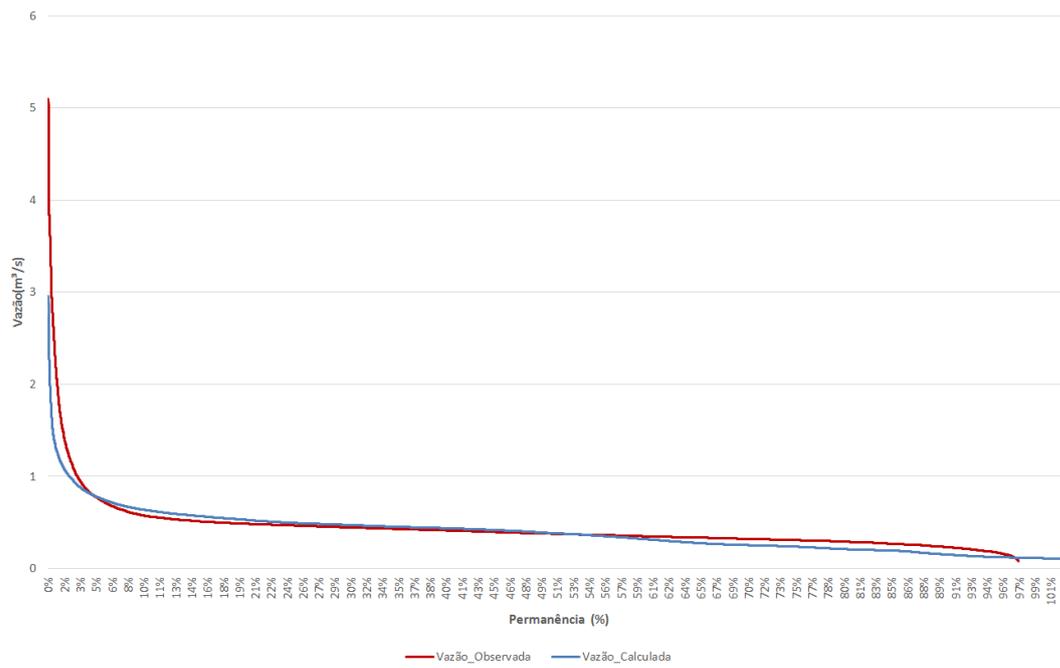


Figura 6.3 – Curva de Permanência da bacia 1.

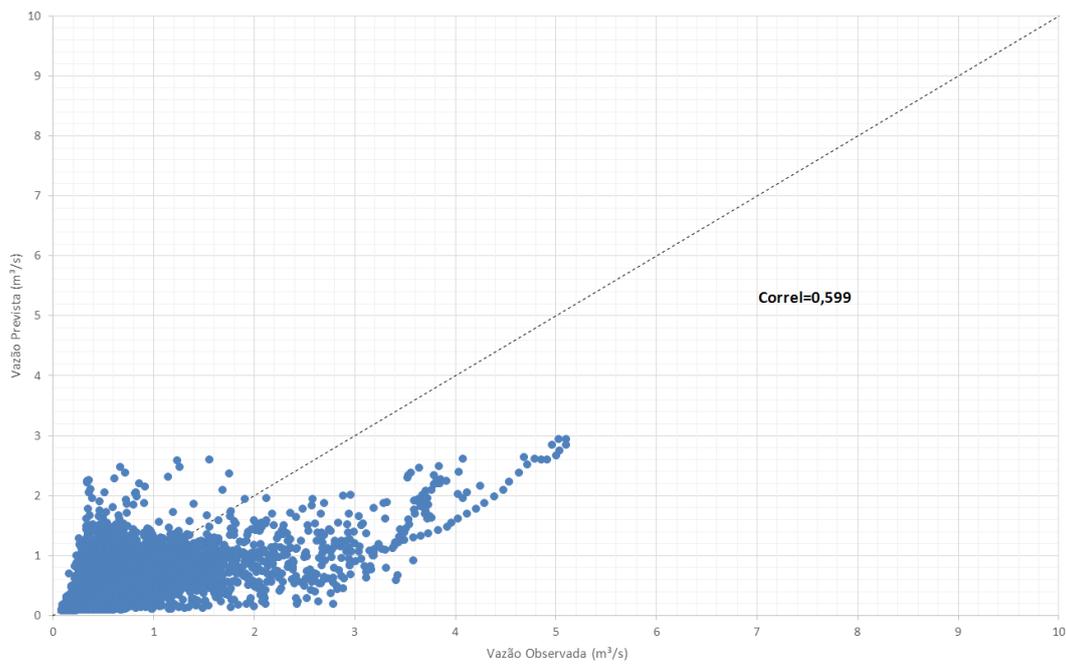


Figura 6.4 – Correlação entre os dados de vazão observados e os estimados pelo modelo

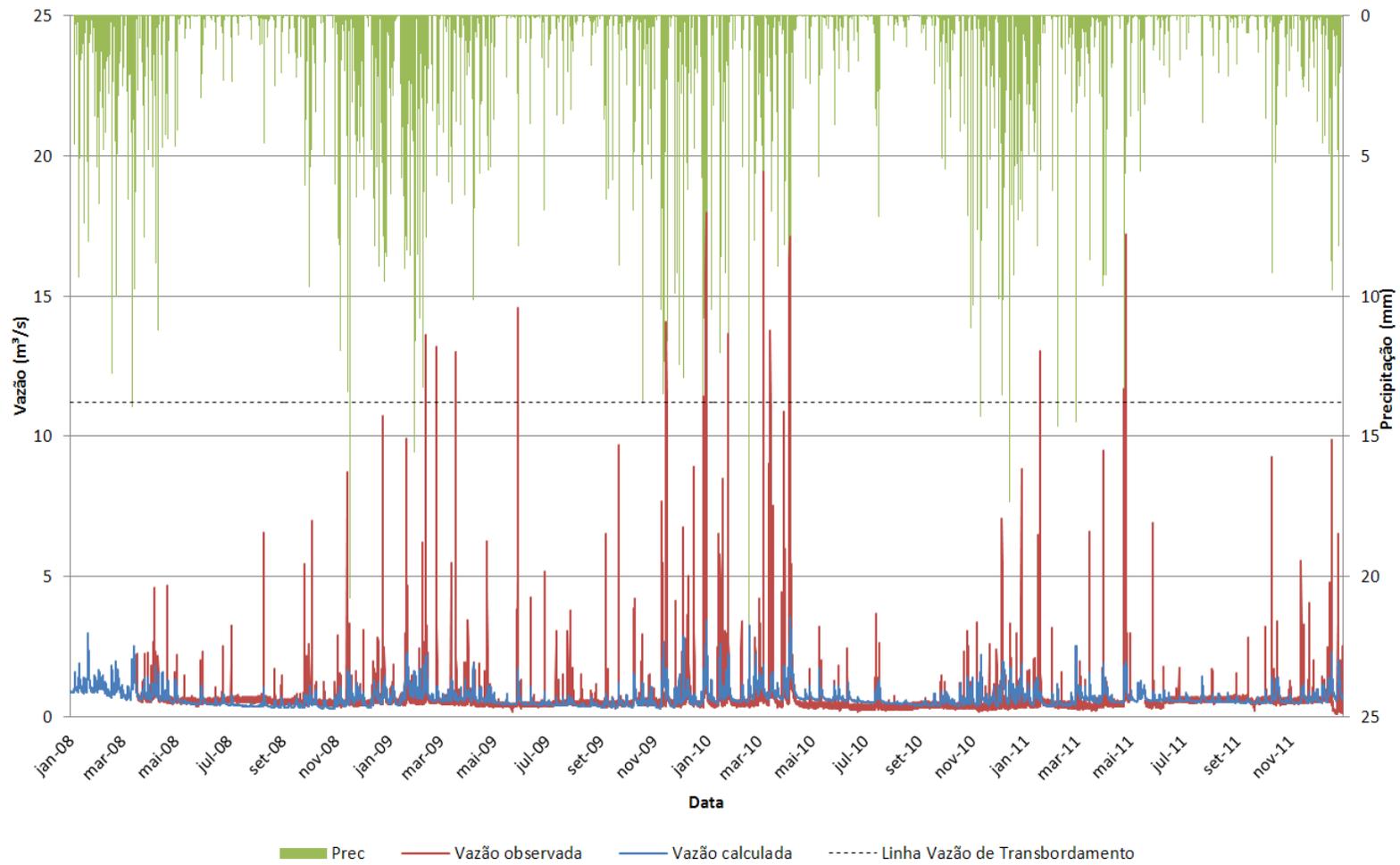


Figura 6.5 – Hidrograma de vazão observado e calculado para bacia 2 (Rio Acari) de 2008 a 2011.

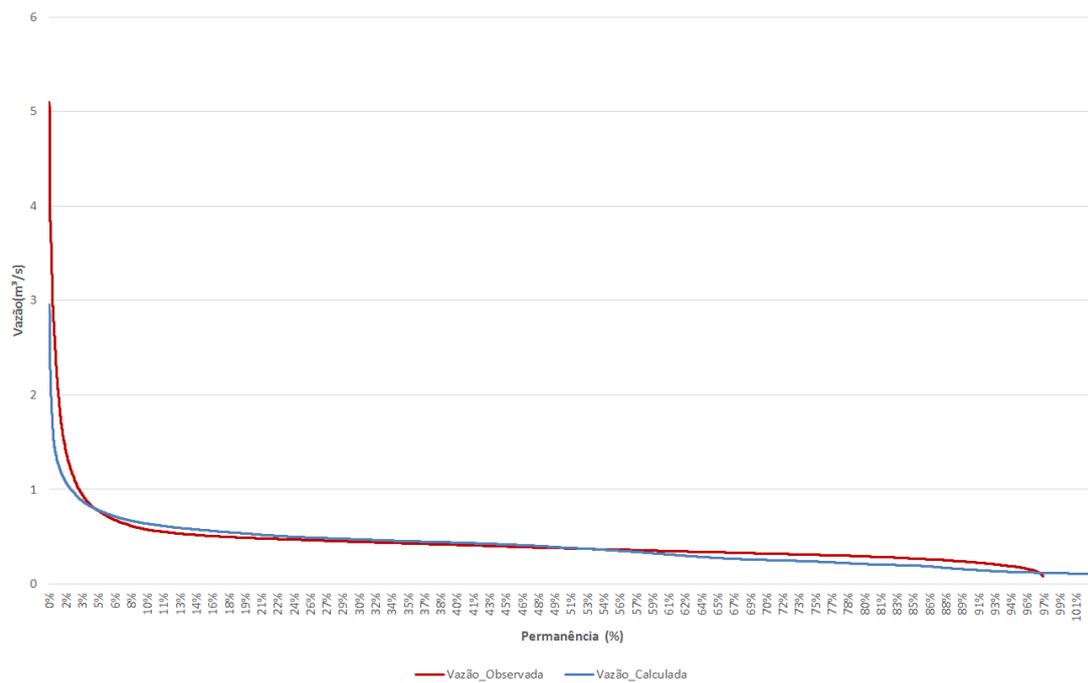


Figura 6.6 – Curva de Permanência da bacia 3.

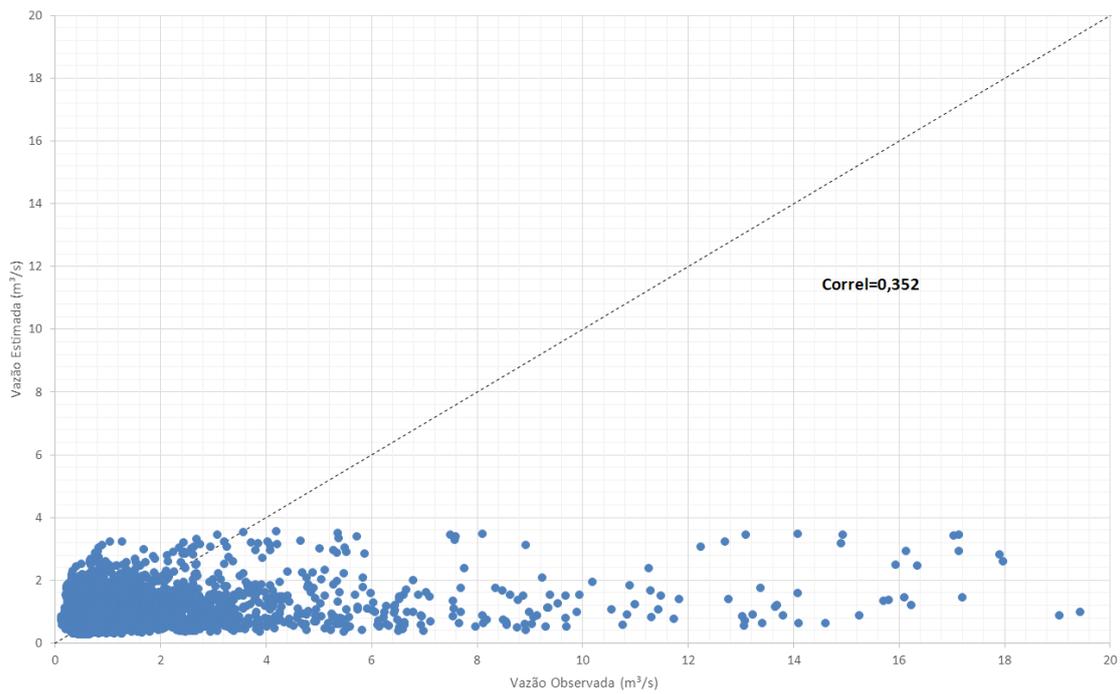


Figura 6.7 – Correlação entre os dados de vazão observados e os estimados pelo modelo.

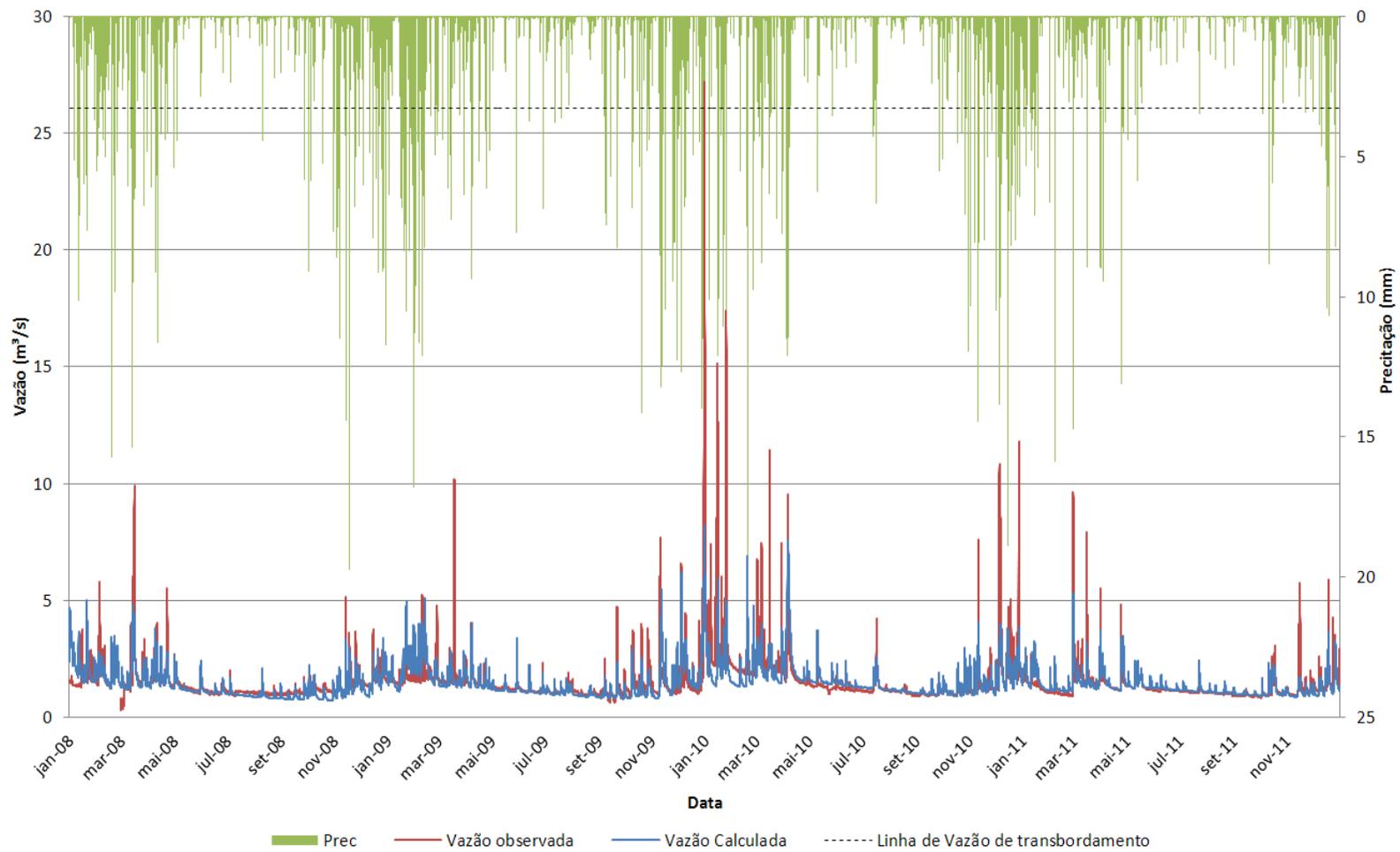


Figura 6.8 – Hidrograma de vazão observado e calculado para bacia 3 (Rio Iguaçu) de 2008 a 2011.

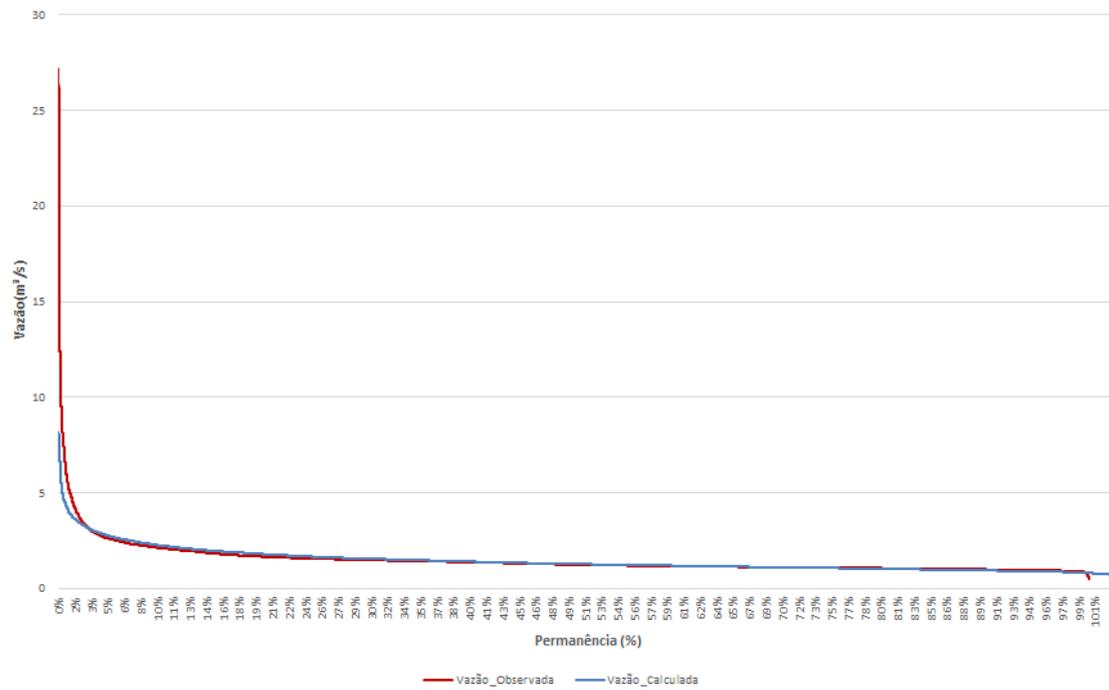


Figura 6.9 – Curva de Permanência da bacia 3.

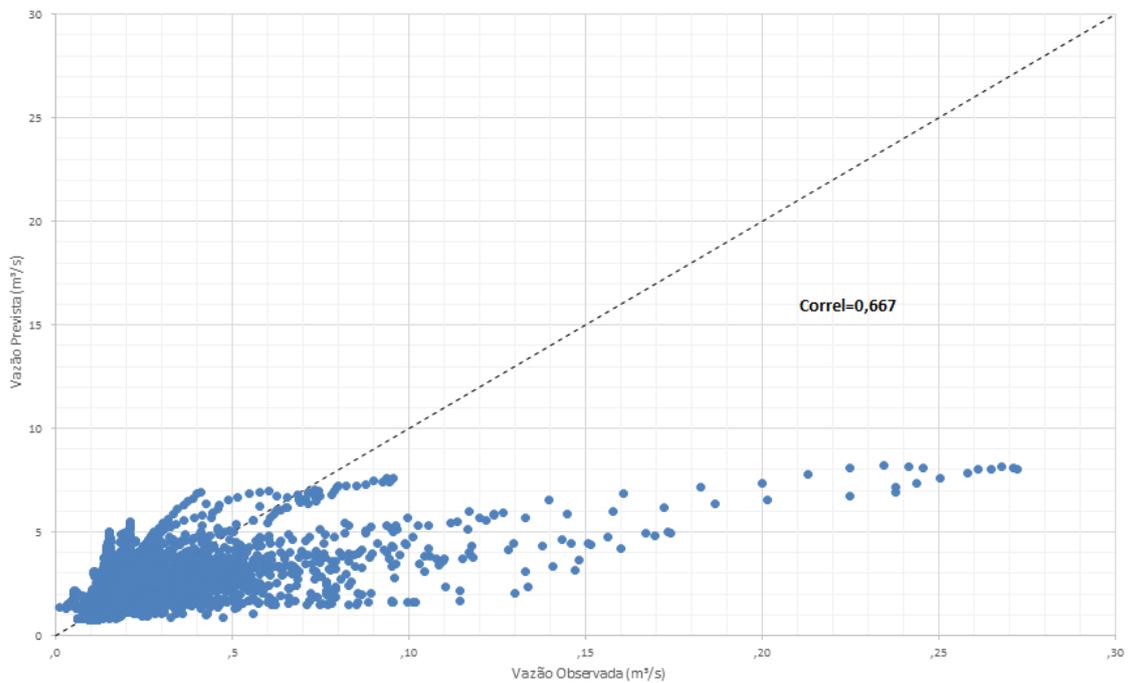


Figura 6.10 – Correlação entre os dados de vazão observados e os estimados pelo modelo.

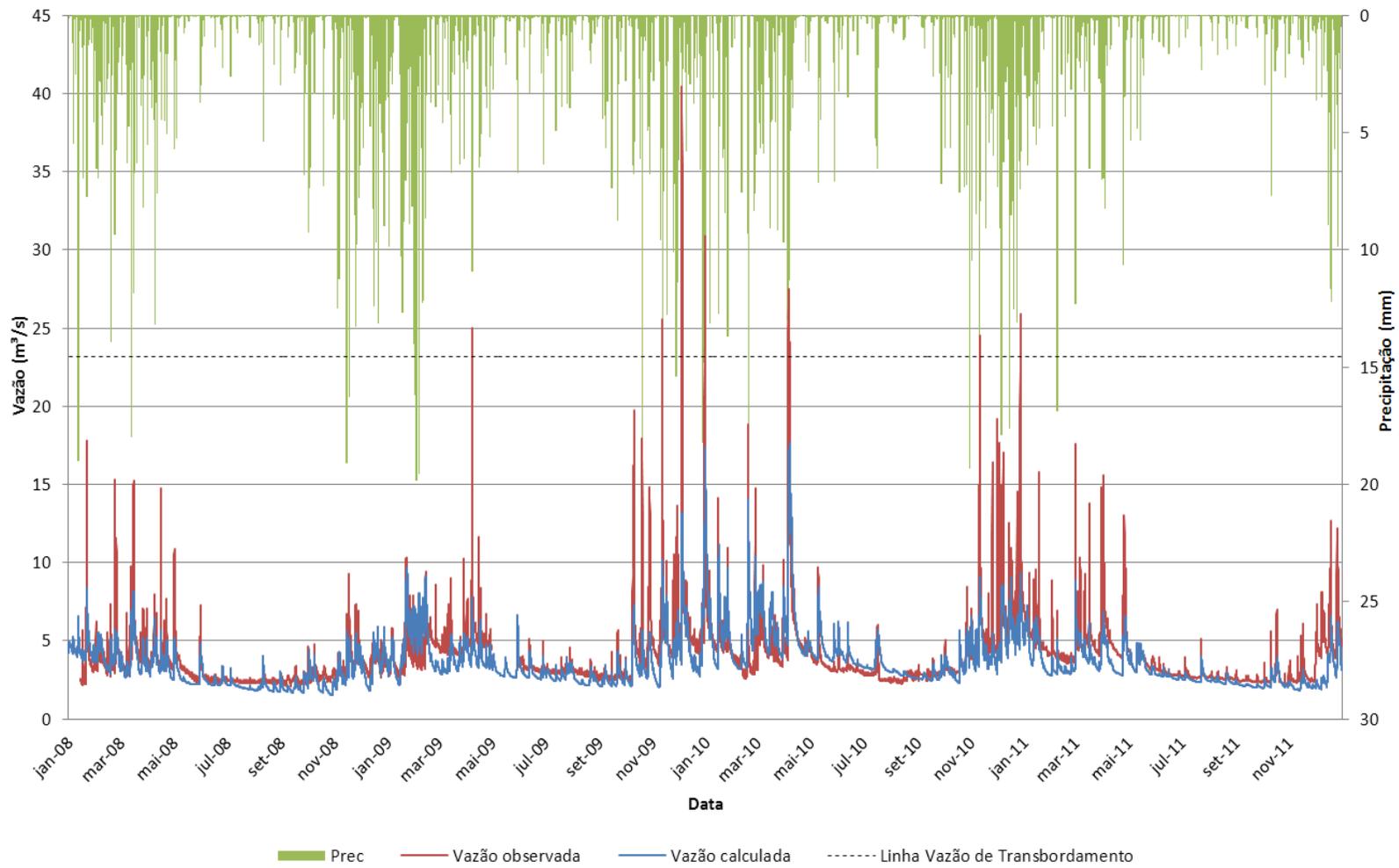


Figura 6.11 – Hidrograma de vazão observado e calculado para bacia 4 (Rio Saracuruna) de 2008 a 2011.

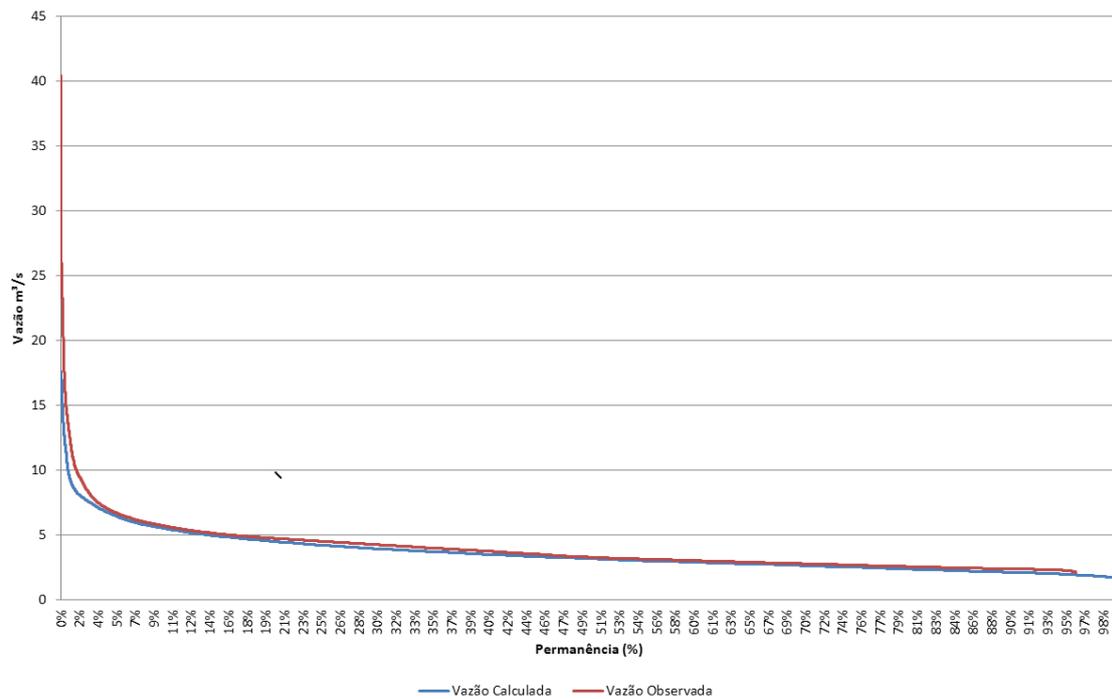


Figura 6.12 – Curva de Permanência da bacia 4.

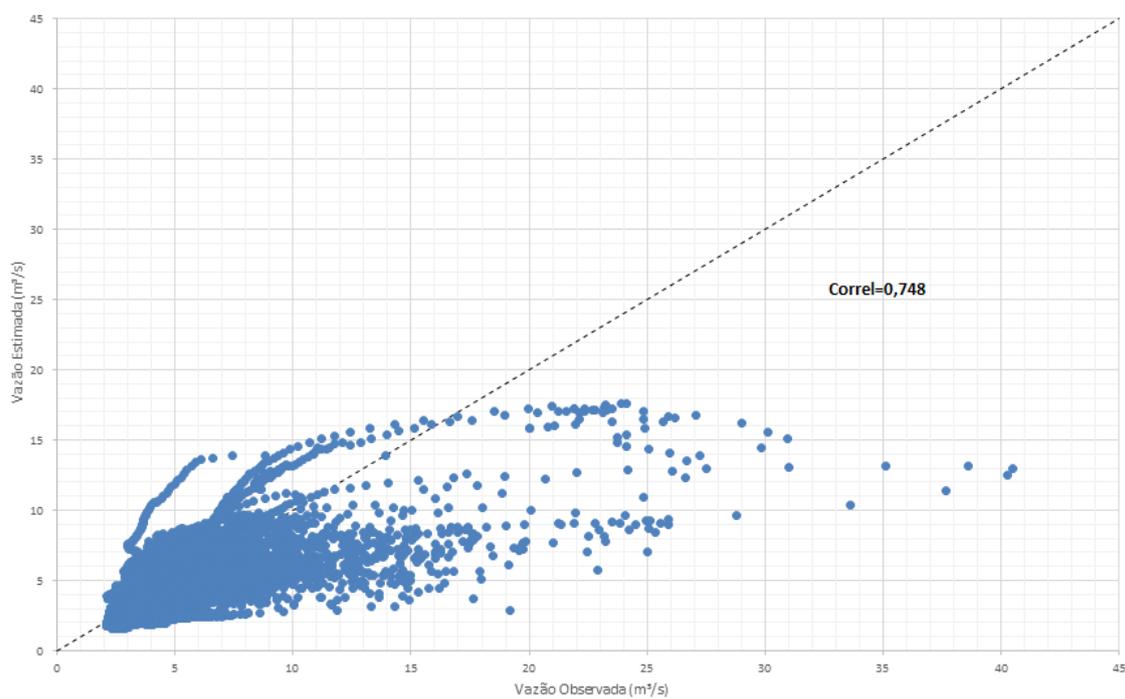


Figura 6.13 – Correlação entre os dados de vazão observados e os estimados pelo modelo.

### **6.3 Condições Meteorológicas e Hidrológicas Associadas as Grande Cheias na Bacia e Comparação do Desempenho do Modelo Hidrológico Quando Alimentado por Dados de Pluviômetros e de Radar**

Com a finalidade de avaliar o desempenho do MHD-INPE utilizando dados de radar, faz-se necessário identificar eventos extremos na região da bacia. Os parâmetros resultantes da calibração, descrita no item 6.3, foram utilizados para as simulações com dados de radar.

Neste item é feita uma breve descrição das condições meteorológicas e hidrológicas associadas aos eventos de cheias na bacia do rio Iguaçu/Sarapuí para as cheias selecionadas para a verificação do modelo.

A partir de uma análise das imagens do satélite GOES 12, disponibilizados em <http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>, dos 26 casos de transbordamento registrados pelo INEA para o período estudado indicaram que 38% correspondem à atuação da ZCAS, 54% à passagem de SF e 8% a outros fenômenos, tais como convecção local e linhas de instabilidade. A partir dos altos índices pluviométricos e do número de estações que apresentaram transbordamento foram selecionados dois casos a serem analisados separadamente.

Foram escolhidos dois eventos de passagem de SF, uma vez que esses sistemas apresentam um maior índice pluviométrico na região da bacia do que eventos de ZCAS. Como ressaltado na climatologia de ZCAS elaborada por Carvalho (2003), representada na Figura 4.3, os maiores índices pluviométricos estão localizados no noroeste e na região central do país.

A Tabela 6.3 apresenta o número de alertas de transbordamento, extraído dos dados do INEA para o período estudado (janeiro de 2008 a dezembro de 2011).

Tabela 6.3 – Número de alertas de transbordamento para a bacia do Rio Iguaçu/Sarapuí para o período de janeiro de 2008 a dezembro de 2011.

Estações	Jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	agos	set	out	nov	dez
P. F. Capivari	3	2	1	2	-	-	-	-	-	-	3	6
CET Meriti	3	2	3	1	-	-	-	-	-	-	2	6
Clube XV	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Catavento	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
GBM - Nova Iguaçu	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
Guadalupe	1	2	1	2	1	-	-	-	1	-	1	3
P. F. Piabetá	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	1	-
S. Cruz da Serra	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	1	3

### 6.3.1 Caso 1 – 30 e 31 de dezembro de 2009

No primeiro caso tem-se uma alta instabilidade sobre o continente, associada a um sistema frontal sobre o Atlântico, causando forte precipitação sobre o Estado do Rio de Janeiro.

A Figura 6.14 apresenta uma imagem do Satélite GOES 12 no canal do infravermelho realçada do dia 30 de dezembro de 2009 às 18Z, em que se observa o SF atuando sobre o Brasil, em destaque no trecho Rio de Janeiro e São Paulo. Nas estações distribuídas ao longo da bacia foram registrados um total pluviométrico de 1400 mm durante o evento, gerando transbordamento registrado em 5 das 10 estações fluviométricas.

Com os resultados das simulações para o evento 1 (29 a 31 de dezembro de 2009) observa-se nos hidrogramas os horários das vazão observadas, vazões calibradas (pluviometro) e vazões simuladas (radar) das Figuras 6.15, 6.16, 6.17 e 6.18, (bacias 1, 2, 3 e 4, respectivamente), um desempenho ruim para as simulações feitas com chuva estimada pelo radar. Nota-se que a representação temporal da precipitação do hidrograma gerada pelos dados de radar é bem inferior em relação a chuva coleta pela rede pluviométrica. A vazão\_radar tende a ser quase que constante, com excessão de pequenos

picos encontrados próximos aos máximos de precipitação registrados pelo radar.

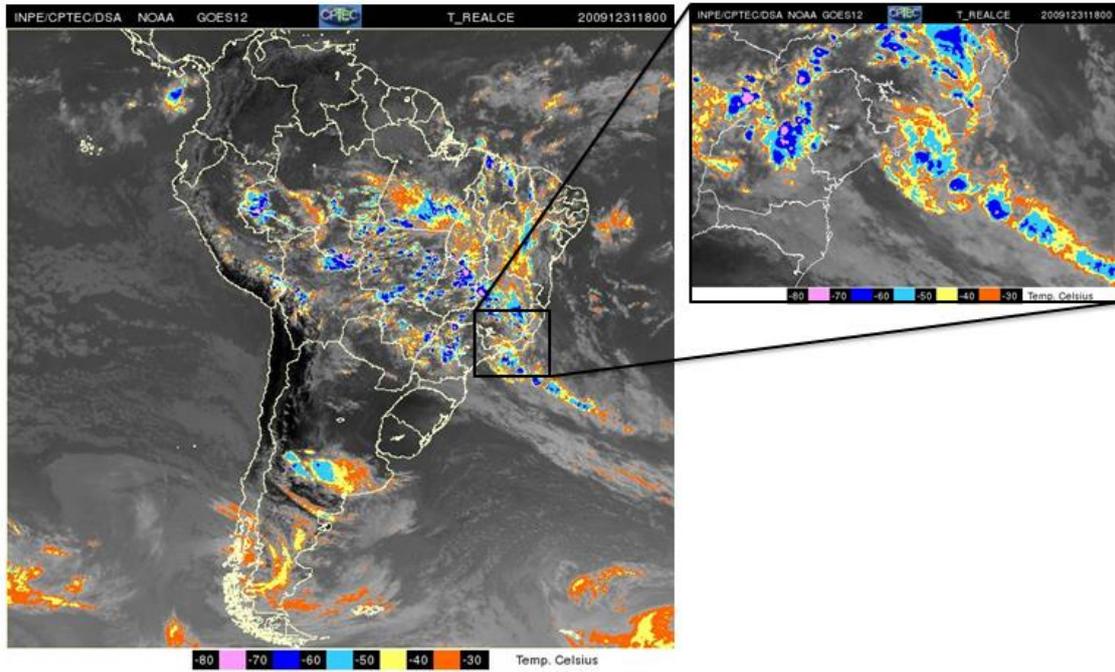


Figura 6.14 – Passagem de um Sistema Frontal sobre o oceano atuando sobre o sudeste brasileiro, em destaque o Setor São Paulo+ Rio de Janeiro.

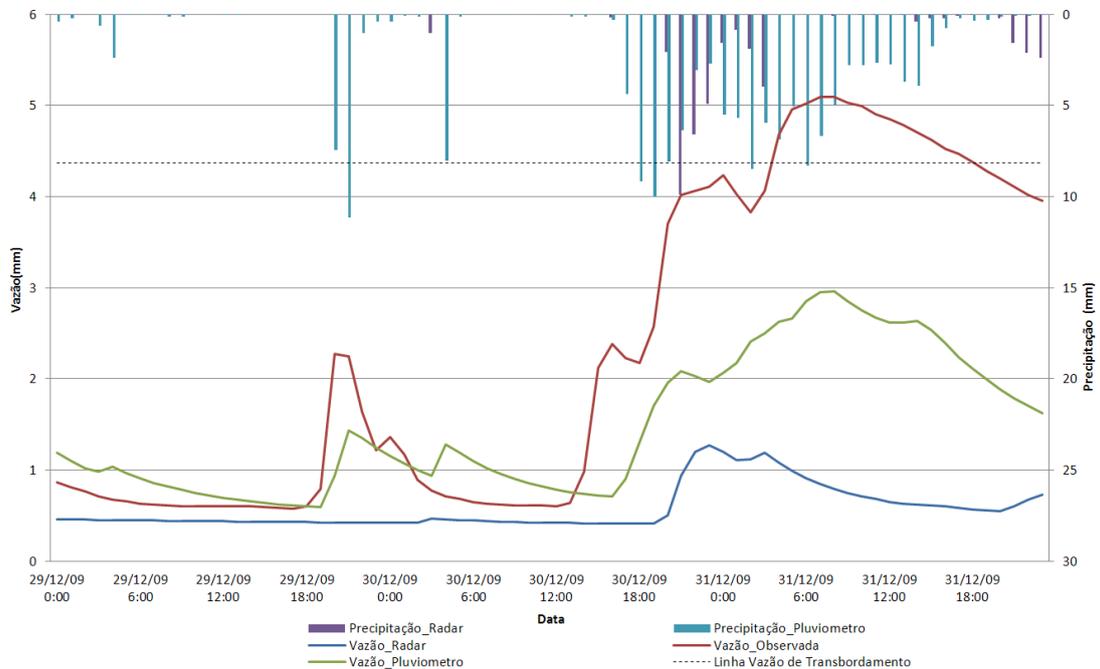


Figura 6.15 – Hidrograma horário da vazão observada (vermelho), vazão calibradas usando dados de pluviometro (verde) e vazão simulada utilizando dados de radar (azul); para a bacia 1 – rio Sarapuí – das 0h de 29 de dezembro de 2009 as 23h de 31 de dezembro de 2009.

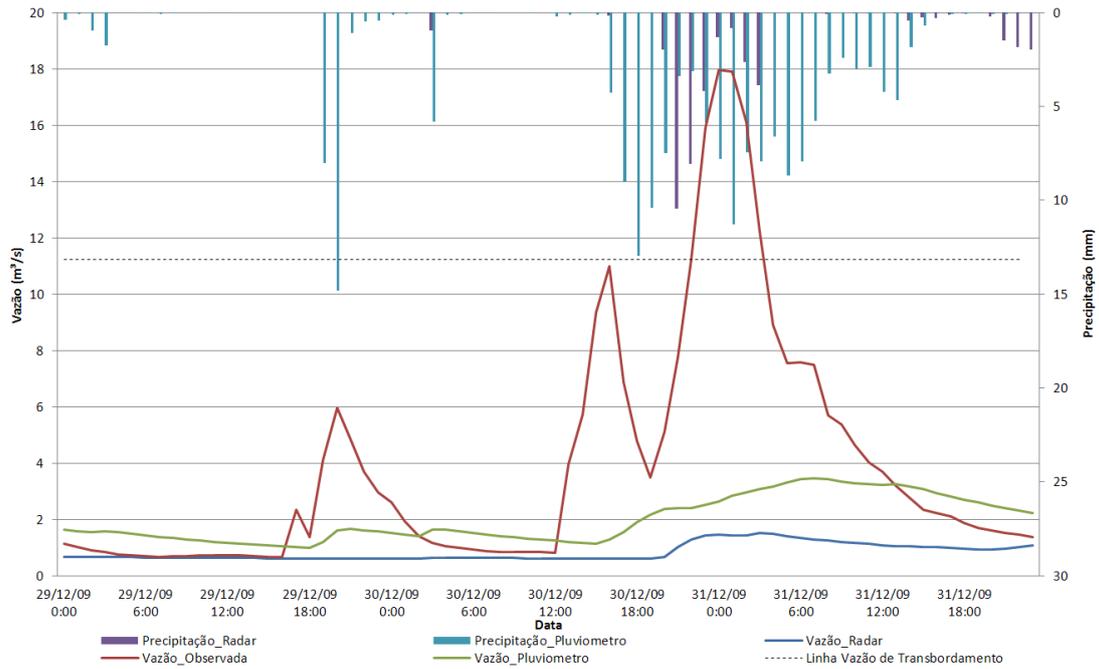


Figura 6.16 – Hidrograma horário da vazão observada (vermelho), vazão calibradas usando dados de pluviometro (verde) e vazão simulada utilizando dados de radar (azul); para a bacia 2 – rio Acari – das 0h de 29 de dezembro de 2009 as 23h de 31 de dezembro de 2009.

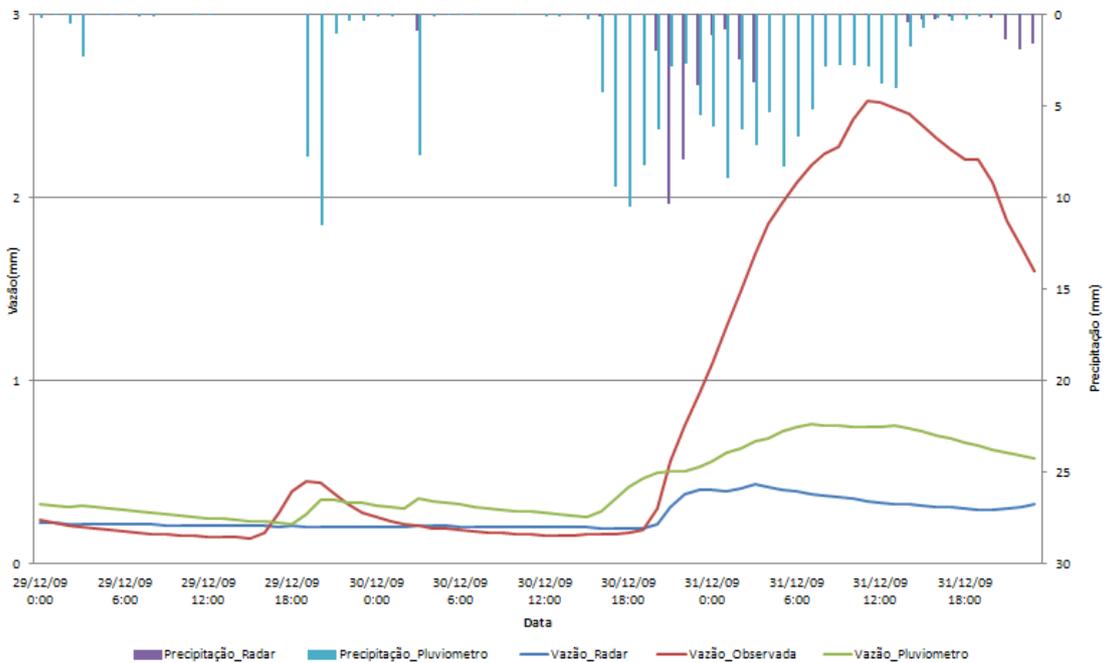


Figura 6.17 - Hidrograma horário da vazão observada (vermelho), vazão calibradas usando dados de pluviometro (verde) e vazão simulada utilizando dados de radar (azul); para a bacia 3 – rio Iguau – das 0h de 29 de dezembro de 2009 as 23h de 31 de dezembro de 2009.

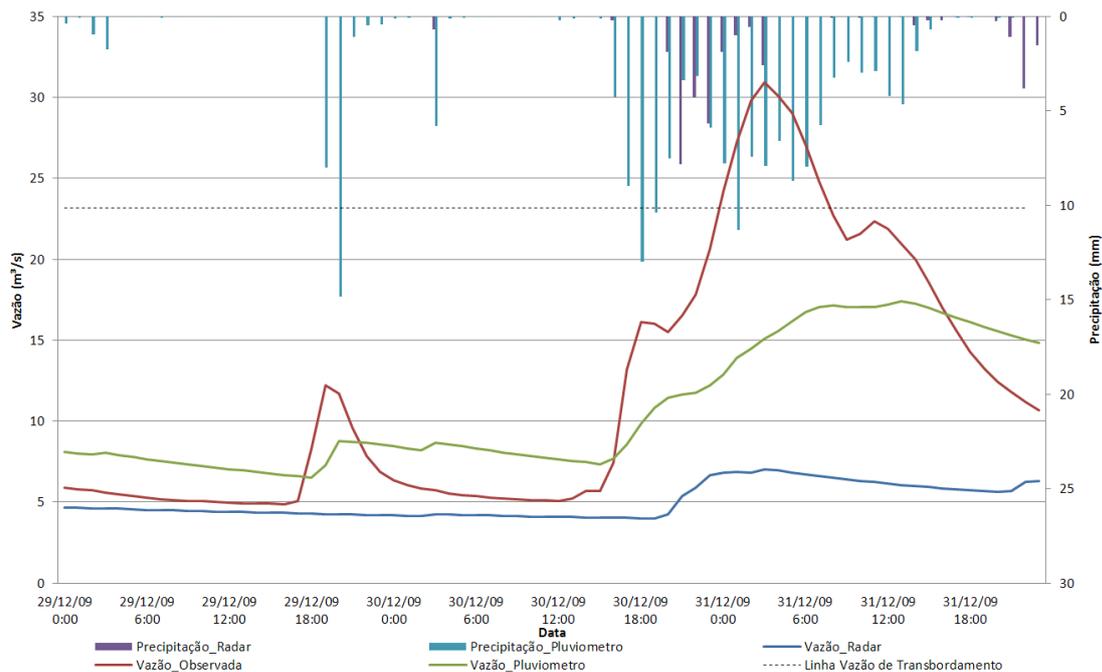


Figura 6.18 - Hidrograma horário da vazão observada (vermelho), vazão calibradas usando dados de pluviometro (verde) e vazão simulada utilizando dados de radar (azul); para a bacia 3 – rio Saracuruna – das 0h de 29 de dezembro de 2009 as 23h de 31 de dezembro de 2009

### 6.3.2 Caso 2 – 5, 6, 7 de abril de 2010

O segundo caso trata-se de um sistema frontal semi-estacionário que ocasionou fortes tempestades sobre as regiões Centro-Oeste e Sudeste do país.

A Figura 6.23 é uma imagem do canal infravermelho realçada do satélite GOES 12 do dia 05 de abril de 2010 às 21Z. Nesta pode-se notar grandes regiões de alta atividade convectiva sobre o Estado do Rio de Janeiro e seu entorno. Ao fim do evento foi registrado índice pluviométrico de 118 mm, totalizando as 10 estações pluviométricas distribuídas ao longo da bacia e transbordamento de 4 estações fluviométricas.

Para as simulações para o evento 2 (04 a 07 de abril de 2010) observa-se nos hidrogramas (Figuras 6.24 a 6.27) o mesmo padrão do caso 1. A precipitação estimada pelo radar é bem inferior à observada (pluviômetro), gerando uma

vazão insatisfatória para a utilização desse método como dado de entrada dessa modelagem.

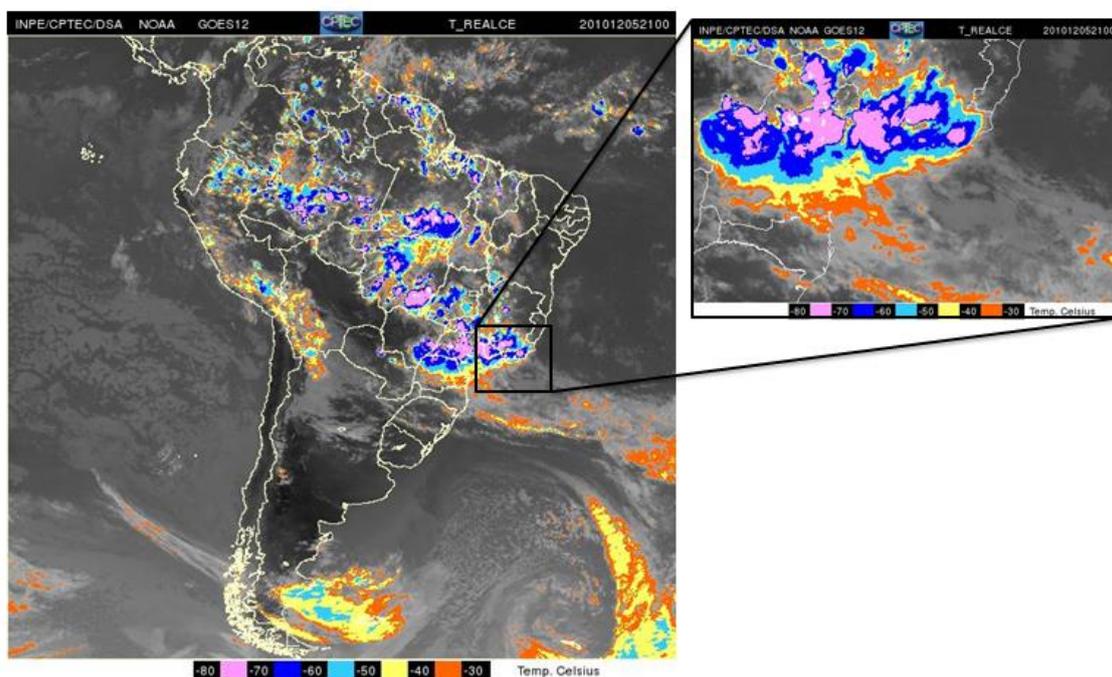


Figura 6.19 – Sistema Frontal atuando sobre sudeste brasileiro, em destaque o Setor São Paulo+ Rio de Janeiro.

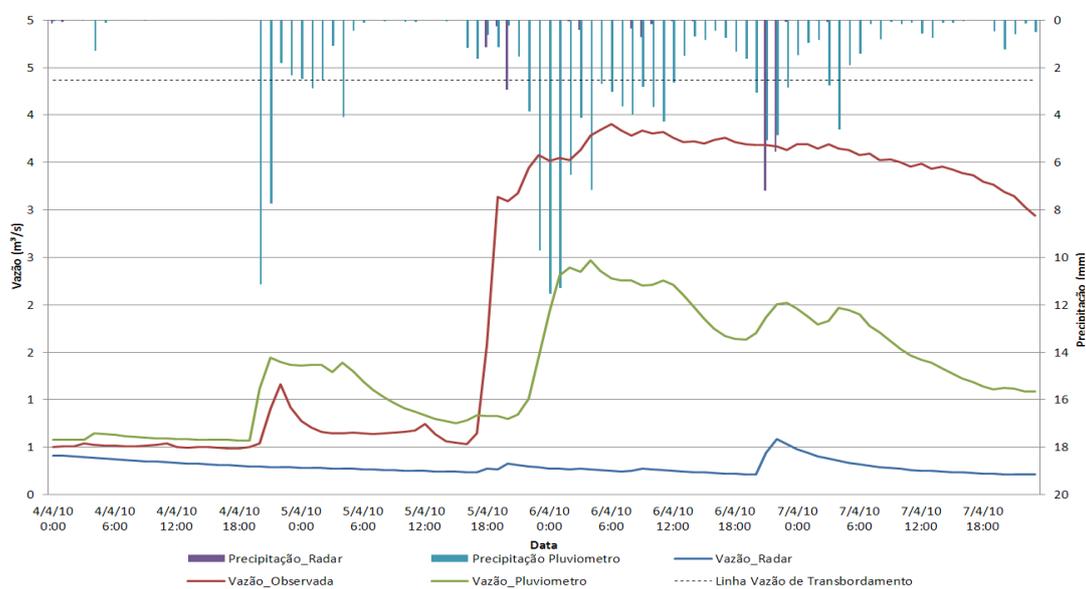


Figura 6.20 - Hidrograma horário da vazão observada (vermelho), vazão calibradas usando dados de pluviometro (verde) e vazão simulada utilizando dados de radar (azul); para a bacia 1 – rio Sarapuí – das 0h 04 de abril de 2010 a 23h 07 de abril de 2010.

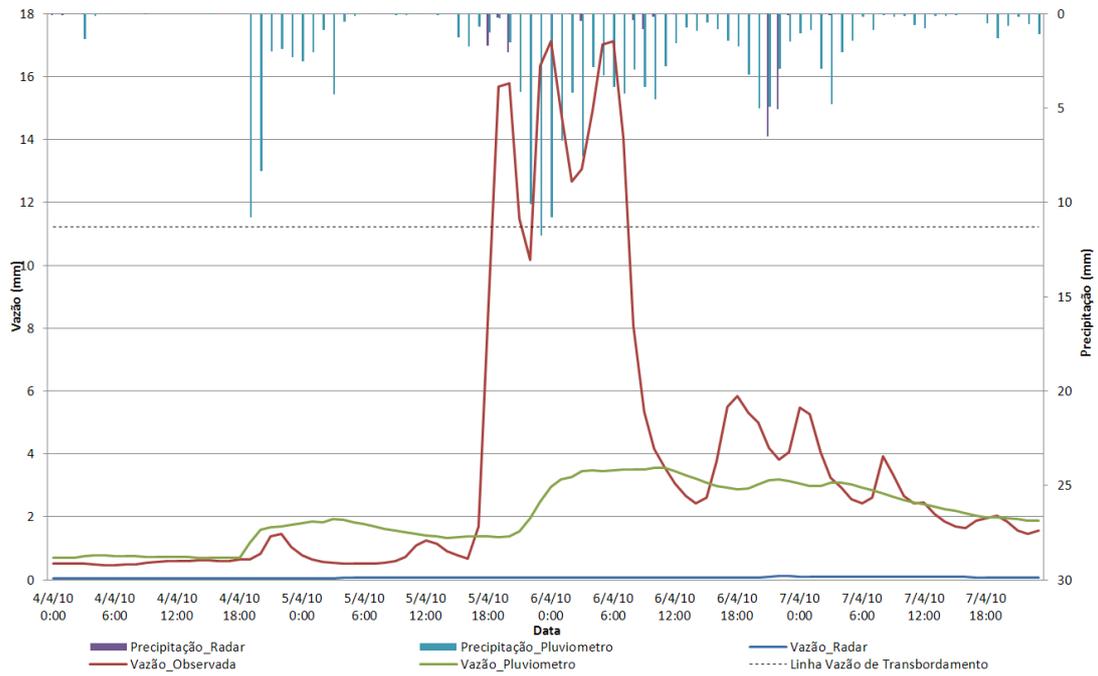


Figura 6.21 - Hidrograma horário da vazão observada (vermelho), vazão calibradas usando dados de pluviometro (verde) e vazão simulada utilizando dados de radar (azul); para a bacia 2 – rio Acari – das 0h 04 de abril de 2010 a 23h 07 de abril de 2010

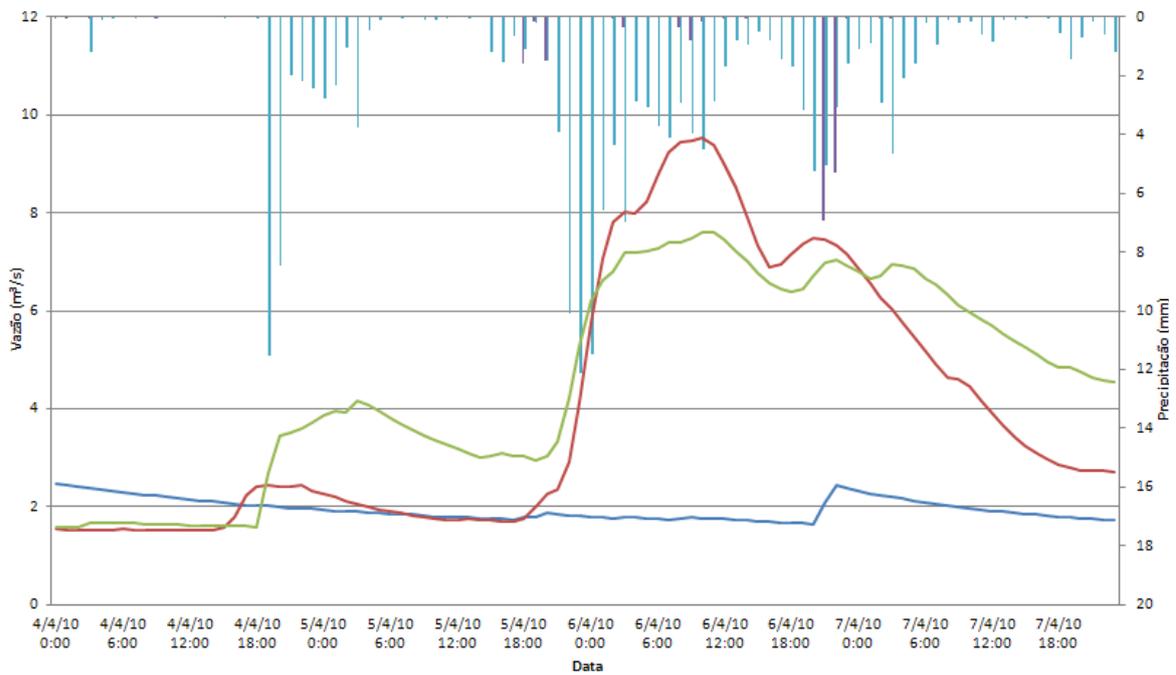


Figura 6.22 - Hidrograma horário da vazão observada (vermelho), vazão calibradas usando dados de pluviometro (verde) e vazão simulada utilizando dados de radar (azul); para a bacia 3– riolguauçu – das 0h 04 de abril de 2010 a 23h 07 de abril de 2010

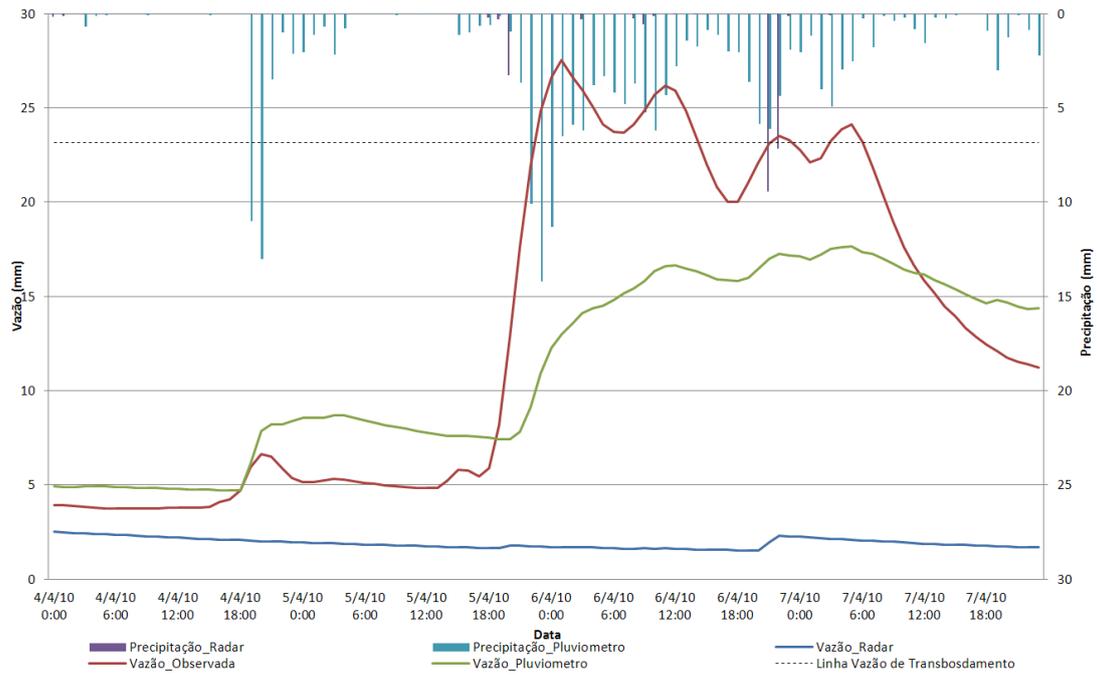


Figura 6.23 - Hidrograma horário da vazão observada (vermelho), vazão calibradas usando dados de pluviometro (verde) e vazão simulada utilizando dados de radar (azul); para a bacia 4 – rio Saracuruna – das 0h 04 de abril de 2010 a 23h 07 de abril de 2010

## 7 CONCLUSÕES

A bacia do rio Iguaçu/Sarapuí é caracterizada por ser uma bacia de resposta rápida, motivo pelo qual o modelo foi rodado com intervalos de tempo de uma hora. A região caracteriza-se por apresentar cheias graduais e/ou bruscas. Essas cheias estão associadas em sua maioria com eventos de entradas de frentes frias e ZCAS. Existem outros sistemas que regem o padrão de chuvas da região, tais como: linhas de instabilidade e convecção local; porém, são menos significativos do ponto de vista das inundações observadas.

O modelo MHD-INPE mostrou uma razoável representação no processo chuva – vazão, pois representa bem as vazões médias e mínimas, entretanto as vazões máximas são subestimadas. Os resultados obtidos são bons considerando que a vazão estimada tem um grande grau de incerteza em função dos poucos postos pluviométricos e fluviométricos distribuídos ao longo da bacia, e série de dados pequena e com falhas. Uma das dificuldades é que os postos pluviométricos disponíveis localizam-se nas áreas intermediárias da bacia, havendo uma pobre representação das chuvas nas cabeceiras, que apresentam totais pluviométricos maiores e determinantes nas magnitudes das cheias. O problema da localização das estações da qual se tem dados também é notado em relação às estações fluviométricas. Na atual configuração só é possível modelar as regiões de cabeceiras dos rios principais da bacia, não levando em conta as contribuições de seus afluentes e defluentes em direção à foz.

Faz-se necessário a determinação de curvas-chave que represente de forma satisfatória a vazão, e uma melhor rede de estações pluviométricas, distribuídas de forma a se dispor dados de diversos pontos da bacia. Por ser uma bacia urbana, a bacia do rio Iguaçu/Sarapuí frequentemente sofre modificações em sua calha, como alargamento, estreitamento, limpeza e impermeabilização, tanto das margens quanto das calhas, e obras que visam uma resposta imediata, porém insatisfatórias ao problema das cheias e que geram ainda mais incertezas na modelagem desse sistema.

Ao contrário das simulações feitas com dados de precipitação, aquelas obtidas com dados de radar (transformação refletividade – precipitação) não foram satisfatórias. O radar do Pico do Couto tende a subestimar significativamente a chuva. Isto é consequência da localização do radar, fazendo com que seu feixe deixe de atingir os alvos por conta de barreiras topográficas, e por não ser um radar utilizado totalmente para fins meteorológicos deixa a desejar em suas parametrizações.

Como vimos anteriormente à vazão calculada não consegue representar nenhuma das vazões acima da linha da vazão de transbordamento em nenhuma das quatro bacias. Dado o desenho da rede observacional atual (radar, pluviômetros e fluviômetros), a modelagem não se mostrou adequada para previsões de curto prazo e, portanto a alerta de cheias para a Bacia do rio Iguaçu/Sarapuí na RMRJ.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENS, A. D. **Essentials of meteorology**: an Invitation to the Atmosphere. New York: West Publishing Company, 1993. Cap. 7, p 157-185.

ALMEIDA, M. V. **Estimativa da precipitação via radar para região metropolitana da cidade do Rio de Janeiro**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2002.

BARBIERI, P. R. B., **Caracterização da estação chuvosa nas regiões sul e sudeste do Brasil associado com a circulação atmosférica**. 2005. 116p. (INPE-14220-TDI/1121). Dissertação(Mestrado em meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos,2005. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2005/06.01.19.48>. Acesso em 30 de março de 2011.

BEVEN, K.J.; KIRKBY, M.J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, p. 43-69, 1979.

CALHEIROS, R. V.; ZAWADZKI, I. 1987. Reflectivity-rain rate relationships for radar hydrology in Brazil. **Journal of Climate and applied Meteorology**, v.26 p. 118-132.

CAMPOS, J. N. 2009. **Lições em modelos e simulação hidrológica**. Fortaleza: Expressão Gráfica, 2009. 166p.

CARVALHO, L. M. V.; JONE, C.; LIEBMANN, B. The South atlantic convergence zone: intensity, form, persistense, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme raintfall. **Jounal Climate**, 2003. Vol. 17, pages 88 – 108.

CASTRO, A. L. C.; CALHEIROS, L. B.; CUNHA, M. I. R.; BRINGEL, M. L. N. C. 2003. **Manual de desastres naturais**. v.1, Desastres Naturais. Brasília, 2003.

CASTRO, A. L. C. 1999. **Manual do planejamento em defesa civil**: Volume I. Ministério da Integração Nacional, Secretaria de Defesa Civil. Brasília, 1999.

CAVALCANTI, I.F.DE .A.; KOUSKY, V. E. 2009. Frentes Frias sobre o Brasil. In: CAVALCANTI, I.F. de A; FERREIRA, N.J; JUSTI DA Silva, M.G.A; SILVA DIAS, M.A.F.( Orgs). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo. Oficina de Textos. 2009 p.135-147.

CHAN, C. S. Desastres naturais e meteorologia: monitoramento, previsão e alerta. In: Simpósio Brasileiro de Desastres, 2., 2007, Santos-SP. **Anais...** São Paulo: ABGE,2007.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.G.; SILVA, B.C.; TUCCI, C.E.M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v.52, p. 878-895, 2007.

COPPE/UFRJ – PNUD. **Plano diretor de recursos hídricos da bacia do rio Iguaçu/Sarapuí, com ênfase no controle de inundações**. Relatório Final IG-RE-029-RO – SERLA, Rio de Janeiro, 1996.

COSTA, I. C. **Avaliação dos dados produzidos pela rede de radares meteorológicos de banda “S” localizados no centro sul do Brasil**. São José dos Campos: INPE, 2007.136 p.

DERECZYNSKI, C. P.; OLIVEIRA, J. S.; MACHADO, C. O. 2008. Climatologia da precipitação no município do Rio de Janeiro. **Revista brasileira de meteorologia**, v.24, n.1, 24-38, 2009.

DUAN, Q.; Sorooshian, S.; Gupta, V. Effective and eficiente global optimiization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research** Vol.28 No.4. pp.1015-1031.

EM-DAT – Emergency Events Database. **The OFDA/CRED International Disaster Database**. Disponível em: < [HTTP://www.em-dat.net/](http://www.em-dat.net/)>. Acessado em: 21 mar de 2012 as 15h.

ESTEVEES, A. A.; SANTOS, A. S.; ALMEIDA, A. V.; et al. Estudo da precipitação na cidade do Rio de Janeiro entre 1997 e 2005. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis-SC. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2006.

GONÇALVES, F. M.; BARROS, M. T. L.; PALOS, J. C. 2010. Utilização de radar meteorológico em hidrologia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16., 2010, Belém-PA. **Anais...** Rio de Janeiro, 2010.

HOUZE JR, R. A. Mesoscale convective systems. In: HOUZE Jr, R. A. (ed.) **Cloud dynamics**. Academic Press, Inc., 1998. v. 53, p. 334-404.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Sítio do instituto brasileiro de geografia e estatística**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>> Acessado em: 06 de fevereiro de 2012 as 12h30.

INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (INEA). **Sistema de alerta de cheias da Baixada Fluminense**. Rio de Janeiro: Instituto Estadual do Ambiente (INEA) do Governo do Estado do Rio de Janeiro, Brasil, 2012. Disponível em: <<http://infoper.dyndns.org/Serla/ultimo.aspx>>. Acessado em: 31 de janeiro de 2012 as 10h.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **BDMEP – dados históricos**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 25/03/2012 às 13h.

IPCC, 2007. **Climate change 2007: the physical science basis**. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996pp.

JUSTI DA SILVA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. A. Frequência de fenômenos meteorológicos na América do Sul: Uma climatologia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz de Iguaçu-PR. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet, 2002.

KODAMA; Y. Larger-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ) part 1: Characteristics of subtropical frontal zones" **Journal Meteorological society of Japan**. v. 70, n.4, p. 813-836, 1992.

LEAL, N. A.; CRUZ, D. S.; LEITE, A. F. 2010. Caracterização do comportamento sazonal das chuvas em bairros das zonas norte e oeste do município do Rio de Janeiro. In: ENCONTRO NACIONAL DE GEÓGRAFOS,

16., 2010, Porto Alegre-RS. **Anais...** Porto Alegre: Associação de Geógrafos Brasileiros, 2010.

MADDOX, R. A. Mesoscale convective complexes. **Bull. Am. Meteorol. Soc.** v. 61,p. 1374-1387, 1980.

MARCELINO, E. V. **Desastres naturais e geotecnologias:** conceitos básicos. Santa Maria-RS: CRS/INPE, , 2007. (INPE-15208-PUD/193).

MARSHALL, J. S.; PALMER, W.; The distribution of raindrops with size. **J. Meteor.**, v. 5, p. 165-166, 1948. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1948\)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1948)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2)

MENEZES, W. F.; JUSTI DA SILVA, M. G. A.; PAIVA, L. M.S. Estudo do ambiente favorável à propagação de sistemas convectivos de mesoescala sobre o município do Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMet,2000. v. 1. p. 1635 - 1645.

MOREIRA, I. A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidrológica) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, 2005.

MONTEITH, J.L. Evaporation and surface temperature. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 107, p. 1–27, 1981.

NAGEN, F. R. M. **Avaliação econômica dos prejuízos causados pelas cheias urbanas.** 2008. 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008. PAIVA, A. C. E. **Distribuição radiativa e hidrológica na bacia do Rio Iguaçu/Sarapuí da Baixada Fluminense.** xiv, 66p. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. Rio de Janeiro, 2011.

RODRIGUEZ, D. A. **Impactos dos padrões espaciais da vegetação nas variáveis atmosférica e terrestre do ciclo hidrológico, em bacia de floresta amazônica.** 2011. 244 p. (sid.inpe.br/mtc-m18/2011/02.23.18.55-TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/398C778>>. Acesso em: 24 jun. 2014.

ROSIM, S.; MONTEIRO, A. M. V.; RENNÓ, C. D.; OLIVEIRA, J. R. F. Uma ferramenta open source que unifica representações de fluxo local para apoio à gestão de recursos hídricos no Brasil. **IP. Informática Pública**, v. 10, p. 29-49, 2008.

SANCHES, M. B. **Análise sinótica da zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) utilizando – se a técnica de composição**. 2011. 244 p. (sid.inpe.br/mtc-m18/2011/02.23.18.55-TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/398C778>>. Acesso em: 24 jun. 2014.

SEABRA, M. S. **Estudo sobre a influência da zona de convergência do Atlântico Sul em bacias hidrográficas nas regiões sudeste e centro-oeste do Brasil**. 2004. 110p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2004.

SILVA DIAS, M. A. F. Sistemas de mesoescala e previsão de tempo a curto prazo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 2, p. 133-150, 1978.

SOUZA, M. M. **Comparação entre ferramentas de modelagem unidimensional e quase-bidimensional, permanente e não-permanente, em planejamento e projetos de engenharia hidráulica**. 2010. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2010.

SRTM **Shuttle radar topography mission**. USA: NASA. 2012 Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>. E acessado em: 25 de março de 2012.

TOMASELLA, J.; PACHEPSKY, Ya.; CRESTANA, S.; RAMLS, W.J. 2003. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. **Soil Science Society Journal**, 200367.1085-1092. DOI: 10.2136/sssaj 2003.1085.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998.

TUCCI, C. E. M; BERTONI, J. C. **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003. ISBN: 85-88686-07-4.

TROVATI, L. R.; ANTONIO, M. A. A Influencia da variabilidade e a incerteza na medida da chuva por radar e pluviômetro na água disponível no solo. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. Anais... São José dos Campos: INPE, 2007. p. 5035-5042. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.10.18.04>>. Acesso em: 24 jun. 2014.

VELASCO, I.; FRISTSCH, J. M. Meso-scale convective complexes in the Americas. **Journal of Geophysical Research**, v. 92, n. D8, p. 9591-9613, 1987.

VEYREY, Y. **Géographie des risques naturels em France – De l'aléa à la gestion**. Paris:Hatier. Initial. ISBN: 2-218-74994-7. 251 pp.

WIGMOSTA, M.S.; NIJSSEN, B.; STORCK, P.; LETTENMAIER, D.P. The distributed hydrology soil vegetation model, In: SINGH, V.P.; FREVERT, D.K. (Ed.) **Mathematical models of small watershed hydrology and applications**. Littleton, CO: Water Resource Publications, 2002, p. 7-42.

WOODLEY, W. L.; OLSEN, A. R.; HERNDON, A., WIGGERT, V. (1975). Comparison of gauge and radar methods of convective rain measurement, **Journal of Applied Meteorology**, v.14, n.5, p. 909-928,1975.

ZHAO, R.J. The Xinanjiang model applied in China. **Journal of Hydrology**, v.135, p.371–381, 1992.

ZHAO, R.J. AND LIU, X.R. The Xinanjiang model. In: Singh, V.P. (Ed.) **Computer models of watershed Hydrology**. Highlands Ranch: Water Resources Publication, 1995. p. 215–232.