

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**PRECIPITAÇÃO ESTIMADA POR SATÉLITE PARA
USO EM MODELO CONCENTRADO CHUVA-VAZÃO
APLICADO EM DIFERENTES ESCALAS DE BACIAS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Stefany Correia de Paula

Santa Maria, RS, Brasil

2015

**PRECIPITAÇÃO ESTIMADA POR SATÉLITE PARA USO EM
MODELO CONCENTRADO CHUVA-VAZÃO APLICADO EM
DIFERENTES ESCALAS DE BACIAS**

Stefany Correia de Paula

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil.**

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Rutinéia Tassi

Santa Maria, RS, Brasil

2015

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com dados fornecidos pelo(a) autor(a).

de Paula, Stefany Correia
PRECIPITAÇÃO ESTIMADA POR SATÉLITE PARA USO EM MODELO
CONCENTRADO CHUVA-VAZÃO APLICADO EM DIFERENTES ESCALAS
DE BACIAS / Stefany Correia de Paula.-2015.
168 p.; 30cm

Orientadora: Rutinéia Tassi
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2015

1. IPH II 2. TRMM 3. Efeito de escala I. Tassi,
Rutinéia II. Título.

© 2015

Todos os direitos autorais reservados a Stefany Correia de Paula. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.
E-mail: stefanycorreia07@gmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a
Dissertação de Mestrado**

**PRECIPITAÇÃO ESTIMADA POR SATÉLITE PARA USO EM
MODELO CONCENTRADO CHUVA-VAZÃO APLICADO EM
DIFERENTES ESCALAS DE BACIAS**

elaborada por
Stefany Correia de Paula

como requisito parcial para obtenção de grau de
Mestre em Engenharia Civil

COMISSÃO EXAMINADORA:

Rutinéia Tassi, Dr.^a
(Presidente/Orientadora)

Debora Missio Bayer, Dr.^a (UFSM)

Bruno Collischonn, Dr. (ANA)

Santa Maria, 06 de novembro de 2015.

Para minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, pelo apoio, incentivo e por tudo que sempre fizeram por mim. Obrigada pelo exemplo, amizade e carinho, fundamentais na construção do meu caráter.

Ao Francisco, pelo carinho e compreensão, sem os quais essa caminhada teria sido difícil.

Aos colegas do mestrado, pelos conhecimentos compartilhados, e aos amigos que fiz durante esse período, em especial ao Ewerton, pelo auxílio no GrADS e a disponibilidade com a qual sempre me ajudou.

À minha orientadora, Dr. Rutinéia Tassi, pelo exemplo profissional, pela amizade e, acima de tudo, pela confiança na execução deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Maria e aos Professores que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a minha formação, aos quais sem nominar terão o meu eterno agradecimento pela bagagem fornecida de um conhecimento que é inesgotável...

À CAPES pela bolsa concedida.

Muito obrigada a todos!

ACKNOWLEDGEMENT*

The data used in this study were acquired as part of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). The algorithms were developed by the TRMM Science Team. The data were processed by the TRMM Science Data and Information System (TSDIS) and the TRMM Office; they are archived and distributed by the Goddard Distributed Active Archive Center. TRMM is an international project jointly sponsored by the Japan National Space Development Agency (NASDA) and the U.S. National Aeronautics and Space Administration (NASA) Office of Earth Sciences.

* Este reconhecimento é solicitado pela NASA's Science Enterprise (ESE) quando do uso de dados do TRMM.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Maria

PRECIPITAÇÃO ESTIMADA POR SATÉLITE PARA USO EM MODELO CONCENTRADO CHUVA-VAZÃO APLICADO EM DIFERENTES ESCALAS DE BACIAS

AUTORA: STEFANY CORREIA DE PAULA

ORIENTADORA: RUTINÉIA TASSI

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 06 de novembro de 2015.

Nos modelos hidrológicos chuva-vazão, a precipitação é uma das principais variáveis analisadas antes de ser utilizada como informação de entrada. Entretanto, suas características peculiares de ocorrência a tornam de mensuração desafiadora, principalmente para países em desenvolvimento, já que requer redes de monitoramento com elevadas resoluções espaciais e temporais. Para contornar tais problemas, o uso do sensoriamento remoto para estimar precipitações está sendo aos poucos difundido, com resultados considerados de boa confiabilidade. Neste sentido, objetivou-se avaliar os resultados gerados por uma modelagem chuva-vazão, utilizando-se de informações de precipitação estimadas pelo satélite TRMM, aplicada a quatro bacias hidrográficas de diferentes escalas. Para isso foi utilizado o modelo concentrado IPH II, na versão para *Windows*® (WIN_IPH2 versão 2, denominado neste trabalho como WIPH2). Em uma primeira análise, realizada para as bacias hidrográficas dos rios Turvo (1.540 km²), Ijuí (9.450 km²), Jacuí (38.700 km²) e Alto Uruguai (61.900 km²), localizadas na região sul do Brasil, observou-se que as estimativas de precipitação fornecidas pelo satélite TRMM geraram chuvas médias espacializadas consistentes em relação às geradas pelas redes de pluviômetros, apresentando erros de volume na ordem de 7,5% (bacia do Rio Ijuí) a 15% (bacias dos rios Turvo, Jacuí e Alto Uruguai). Em geral, as chuvas médias diárias, geradas pelas estimativas do TRMM, aumentaram suas correlações com as informações de pluviômetros, conforme houve um aumento da área de drenagem da bacia hidrográfica. Na modelagem, notou-se que o WIPH2 mostrou bom ajuste para a simulação das vazões nas bacias selecionadas, com ressalvas à aplicação na bacia do Alto Uruguai. Em alguns casos, mesmo que a precipitação média estimada pelo TRMM possuísse maior incerteza com relação aos dados gerados pelas diferentes redes de pluviômetros, o modelo conseguiu compensar a deficiência desta informação, por meio da alteração de parâmetros, dentro de limites considerados aceitáveis para as características das bacias hidrográficas. Verificou-se que, em geral, as precipitações estimadas pelo TRMM produziram melhoras no coeficiente de avaliação das vazões (coeficientes de Nash-Sutcliffe – NS, e de correlação - R), à medida em que houve um aumento da área de drenagem da bacia hidrográfica até a bacia do Rio Jacuí, com decréscimo dos coeficientes para a bacia do Alto Uruguai, que provavelmente foi causado pela falta de adequação do modelo concentrado WIPH2 às características heterogêneas da última bacia. Em locais com boa cobertura de monitoramento pluviométrico, as estimativas de satélite produziram resultados inferiores aqueles gerados por informações mensuradas em solo; já em locais onde a escassez de equipamentos é acentuada e/ou sua distribuição é não-uniforme, a utilização de estimativas de satélite se mostrou mais confiável, chegando a resultados visivelmente superiores. Neste sentido, concluiu-se que as estimativas do satélite TRMM podem se apresentar como boas alternativas para bacias com escassez de informações de precipitação medidas em solo, tendo grandes chances de apresentarem melhores resultados quando comparadas com informações pontuais escassas e mal distribuídas.

Palavras-chave: IPH II, TRMM, Efeito de escala.

ABSTRACT

Master's Dissertation
Post-Graduation Program in Civil Engineering
Universidade Federal de Santa Maria

SATELLITE ESTIMATED RAINFALL FOR USE IN RAINFALL-RUNOFF CONCENTRATED MODEL APPLIED IN DIFFERENT SCALES OF WATERSHED

AUTHOR: STEFANY CORREIA DE PAULA

ADVISOR: RUTINÉIA TASSI

Defense Date and Place: Santa Maria, November 06th, 2015.

In Hydrological rainfall-runoff models, rainfall is one of the main variables analyzed before being used as input data. However, its peculiar characteristics of occurrence make it challenging to measure, especially for developing countries, since it requires monitoring networks with high spatial and temporal resolutions. To overcome such problems, the use of remote sensing to estimate rainfall is being gradually diffused, with results considered of good reliability. In this sense, the objective was to evaluate the results generated by a rainfall-runoff modeling, using precipitation information estimated by the TRMM satellite, applied to four watersheds of different scales. To achieve this objective was used the concentrated model IPH II in the version for *Windows*® (WIN_IPH2 version 2, denominated in this work as WIPH2). In a first analysis, conducted for the watersheds of the rivers Turvo (1,540 km²), Ijuí (9,450 km²), Jacuí (38,700 km²) and Alto Uruguai (61,900 km²), which are located in southern Brazil, it was observed that the precipitation estimates provided by the TRMM satellite generated consistent spatialized mean rainfall in relation to the generated by rain gauges networks. Were found errors about 7.5% (Ijuí River watershed) to 15% (Turvo River, Jacuí River and Alto Uruguai watersheds). In overall, the daily mean rainfall, generated by the TRMM estimates, increased their correlation with the rain gauges information, as there was an increase in the watershed drainage area. In the modeling, it was noted that the WIPH2 showed good fit for the simulation of flows in the selected watersheds, with exception to the application in the Alto Uruguai watershed. In some cases, even though the mean rainfall estimated by the TRMM had generated greater uncertainty regarding the data generated by the different rain gauge networks, the model was able to compensate the deficiency of this information, by changing parameters within limits considered acceptable for the characteristics watershed. It was found that, in overall, precipitation estimated by the TRMM produced improvements in the flow evaluation coefficient (Nash-Sutcliffe – NS, and correlation – R coefficients), as there was an increase in the watershed drainage area until the Jacuí River watershed, with a decrease of the coefficients for the Alto Uruguai watershed, which was probably caused by the inadequacy of the WIPH2 concentrated model to the heterogeneous characteristics of the last watershed. In places with good rainfall monitoring coverage, the satellite estimates produced lower results than those generated by information measured by rain gauges. In places where the lack of equipment is accentuated and/or their distribution is non-uniform, the use of satellite estimates proved to be more reliable, reaching clearly superior results. In this sense, it was concluded that the TRMM satellite estimates may present as good alternatives to watersheds with scarce rainfall information measures on the ground, having great chances to show better results when compared to information of rain gauges scarce and poorly distributed.

Key-words: IPH II, TRMM, Scale effect.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figura 1 – | Tipos de órbitas de satélite. | 42 |
| Figura 2 – | Esboço dos instrumentos a bordo do satélite TRMM. | 48 |
| Figura 3 – | Representação esquemática dos instrumentos a bordo do satélite TRMM, após 2001 para altitude de 402 km. | 49 |
| Figura 4 – | Fluxograma de dados para geração das estimativas de precipitação. | 50 |
| Figura 5 – | Reservatório de interceptação. | 57 |
| Figura 6 – | Condições existentes na definição do algoritmo de infiltração. | 62 |
| Figura 7 – | Método de Clark. | 63 |
| Figura 8 – | Representação esquemática do processo de integração dos dados do satélite para obtenção de dados diários. | 79 |
| Figura 9 – | Localização das bacias hidrográficas selecionadas para aplicação da metodologia proposta. | 85 |
| Figura 10 – | Bacia hidrográfica do Rio Turvo com a localização das estações de monitoramento e pixels do TRMM. | 86 |
| Figura 11 – | Precipitação média mensal obtida pelos 7 pluviômetros na bacia do Rio Turvo e vazão média mensal da estação fluviométrica Três Passos. | 87 |
| Figura 12 – | Bacia hidrográfica do Rio Ijuí com a localização das estações de monitoramento e pixels do TRMM. | 89 |
| Figura 13 – | Precipitação média mensal obtida pelos 19 pluviômetros na bacia do Rio Ijuí e vazão média mensal da estação fluviométrica Ponte Mística. | 90 |
| Figura 14 – | Bacia hidrográfica do Rio Jacuí com a localização das estações de monitoramento e pixels do TRMM. | 92 |
| Figura 15 – | Precipitação média mensal obtida pelos 41 pluviômetros na bacia do Rio Jacuí e vazão média mensal da estação fluviométrica Rio Pardo. | 93 |
| Figura 16 – | Bacia hidrográfica do Alto Uruguai com a localização das estações de monitoramento e pixels do TRMM. | 95 |
| Figura 17 – | Precipitação média mensal obtida pelos 70 pluviômetros na bacia do Alto Uruguai e vazão média mensal da estação fluviométrica Iraí. | 96 |
| Figura 18 – | Diferentes conjuntos de informações pluviométricas utilizados para cálculo da chuva média espacializada. | 98 |
| Figura 19 – | Resultado da espacialização da precipitação dos diferentes cenários com distintas redes de pluviômetros, para o dia 25 de fevereiro de 2007. | 99 |
| Figura 20 – | Dispersão entre as chuvas médias obtidas com todas as estações pluviométricas e os cenários com 75%, 50%, 25% dos pluviômetros e para o TRMM, do rio Turvo (A, B, C e D), Ijuí (E, F, G e H), Jacuí (I, J, K e L), Alto Uruguai (M, N, O e P), respectivamente. | 104 |
| Figura 21 – | Comportamento do coeficiente de correlação entre os cenários hipotéticos (Cen %) e o Cen Real, nas diferentes escalas de bacias hidrográficas. | 107 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Figura 22 – | Série histórica de vazão da estação fluviométrica Três Passos, utilizada como exutório da bacia hidrográfica do rio Turvo. | 109 |
| Figura 23 – | Hidrogramas das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Turvo, para o período da calibração, referentes (A) à condição real de pluviômetros, (B) ao cenário com 75%, (C) cenário com 50%, (D) cenário com 25% e (E) aos dados do TRMM. | 112 |
| Figura 24 – | Curvas de permanência das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Turvo, para o período da calibração, referentes (A) à condição real de pluviômetros, (B) ao cenário com 75%, (C) cenário com 50%, (D) cenário com 25% e (E) aos dados do TRMM. | 113 |
| Figura 25 – | Série histórica de vazão da estação fluviométrica Ponte Mística, utilizada como exutório da bacia hidrográfica do rio Ijuí. | 116 |
| Figura 26 – | Hidrogramas das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Ijuí, para o período da calibração, referentes (A) à condição real de pluviômetros, (B) ao cenário com 75%, (C) cenário com 50%, (D) cenário com 25% e (E) aos dados do TRMM. | 118 |
| Figura 27 – | Curvas de permanência das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Ijuí, para o período da calibração, referentes (A) à condição real de pluviômetros, (B) ao cenário com 75%, (C) cenário com 50%, (D) cenário com 25% e (E) aos dados do TRMM. | 119 |
| Figura 28 – | Série histórica de vazão da estação fluviométrica Rio Pardo, utilizada como exutório da bacia hidrográfica do rio Jacuí. | 122 |
| Figura 29 – | Hidrogramas das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Jacuí, para o período da calibração, referentes (A) à condição real de pluviômetros, (B) ao cenário com 75%, (C) cenário com 50%, (D) cenário com 25% e (E) aos dados do TRMM. | 124 |
| Figura 30 – | Curvas de permanência das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Jacuí, para o período da calibração, referentes (A) à condição real de pluviômetros, (B) ao cenário com 75%, (C) cenário com 50%, (D) cenário com 25% e (E) aos dados do TRMM. | 125 |
| Figura 31 – | Série histórica de vazão da estação fluviométrica Iraí, utilizada como exutório da bacia hidrográfica do Alto Uruguai. | 127 |
| Figura 32 – | Hidrogramas das vazões calculadas e observadas na bacia do Alto Uruguai, para o período da calibração, referentes (A) à condição real de pluviômetros, (B) ao cenário com 75%, (C) cenário com 50%, (D) cenário com 25% e (E) aos dados do TRMM. | 129 |
| Figura 33 – | Hidrogramas das vazões calculadas e observadas na bacia do Alto Uruguai, para o período da calibração, referentes (A) à condição real de pluviômetros, (B) ao cenário com 75%, (C) cenário com 50%, (D) cenário com 25% e (E) aos dados do TRMM. | 130 |
| Figura 34 – | Comportamento do coeficiente de Nash-Sutcliffe em relação à escala de drenagem das bacias hidrográficas, para o período de calibração e validação do WIPH2. | 133 |
| Figura 35 – | Comportamento do coeficiente de correlação em relação à escala de drenagem das bacias hidrográficas, para o período de calibração e validação do WIPH2. | 134 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figura 36 – | Relação entre a área de drenagem da bacia e o coeficiente de Nash-Sutcliffe obtido da calibração com dados estimados pelo satélite TRMM. | 136 |
| Figura 37 – | Relação entre a área de drenagem da bacia e o coeficiente de correlação obtido da calibração com dados estimados pelo satélite TRMM. | 137 |
| Figura 38 – | Hidrogramas das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Turvo, para o período da validação, referentes (A) à condição real de pluviômetros, (B) ao cenário com 75%, (C) cenário com 50%, (D) cenário com 25% e (E) aos dados do TRMM..... | 161 |
| Figura 39 – | Curvas de permanência das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Turvo, para o período da validação, referentes (A) à condição real de pluviômetros, (B) ao cenário com 75%, (C) cenário com 50%, (D) cenário com 25% e (E) aos dados do TRMM. | 162 |
| Figura 40 – | Hidrogramas das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Ijuí, para o período da validação, referentes (A) à condição real de pluviômetros, (B) ao cenário com 75%, (C) cenário com 50%, (D) cenário com 25% e (E) aos dados do TRMM..... | 163 |
| Figura 41 – | Curvas de permanência das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Ijuí, para o período da validação, referentes (A) à condição real de pluviômetros, (B) ao cenário com 75%, (C) cenário com 50%, (D) cenário com 25% e (E) aos dados do TRMM. | 164 |
| Figura 42 – | Hidrogramas das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Jacuí, para o período da validação, referentes (A) à condição real de pluviômetros, (B) ao cenário com 75%, (C) cenário com 50%, (D) cenário com 25% e (E) aos dados do TRMM..... | 165 |
| Figura 43 – | Curvas de permanência das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Jacuí, para o período da validação, referentes (A) à condição real de pluviômetros, (B) ao cenário com 75%, (C) cenário com 50%, (D) cenário com 25% e (E) aos dados do TRMM. | 166 |
| Figura 44 – | Hidrogramas das vazões calculadas e observadas na bacia do Alto Uruguai, para o período da validação, referente (A) à condição real de pluviômetros, (B) ao cenário com 75%, (C) cenário com 50%, (D) cenário com 25% e (E) aos dados do TRMM..... | 167 |
| Figura 45 – | Curvas de permanência das vazões calculadas e observadas na bacia do Alto Uruguai, para o período da validação, referente (A) à condição real de pluviômetros, (B) ao cenário com 75%, (C) cenário com 50%, (D) cenário com 25% e (E) aos dados do TRMM. | 168 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|-------------|---|
| Tabela 1 – | Produtos do satélite TRMM derivados de múltiplas fontes TMPA. 51 |
| Tabela 2 – | Funções objetivo disponíveis no WIPH2. 55 |
| Tabela 3 – | Cobertura de monitoramento pluviométrico utilizada em cada cenário. 97 |
| Tabela 4 – | Resultados das correlações entre as chuvas médias geradas pelo Cen Real e as integrações diárias do TRMM, com diferentes horários de início. 100 |
| Tabela 5 – | Evapotranspiração média diária obtida a partir da correção da evaporação do tanque classe A, para a bacia do Rio Turvo. 101 |
| Tabela 6 – | Evapotranspiração média diária obtida a partir da correção da evaporação do tanque classe A, para a bacia do Rio Ijuí. 102 |
| Tabela 7 – | Evapotranspiração média diária obtida a partir da correção da evaporação do tanque classe A, para a bacia do Rio Jacuí. 103 |
| Tabela 8 – | Evapotranspiração média diária obtida a partir da correção da evaporação do tanque classe A, para a bacia do Alto Uruguai. ... 103 |
| Tabela 9 – | Coefficientes de avaliação gerado pela análise das chuvas médias, para os diferentes cenários de monitoramento. 105 |
| Tabela 10 – | Redução dos coeficientes de correlação entre as chuvas médias do Cen Real e os Cen (%) hipotéticos, para a bacia dos rios Turvo, Ijuí, Jacuí e Alto Uruguai. 106 |
| Tabela 11 – | Coefficientes de avaliação resultantes das calibrações e validações do modelo WIPH2, para a bacia do Rio Turvo. 110 |
| Tabela 12 – | Parâmetros do modelo WIPH2 otimizados para os diferentes cenários de precipitação média, na bacia do rio Turvo. 114 |
| Tabela 13 – | Coefficientes de avaliação resultantes das calibrações e validações do modelo WIPH2, para a bacia do Rio Ijuí. 116 |
| Tabela 14 – | Parâmetros do modelo WIPH2 otimizados para os diferentes cenários de precipitação média, para bacia do Rio Ijuí. 120 |
| Tabela 15 – | Coefficientes de avaliação resultantes das calibrações e validações do modelo WIPH2, para a bacia do Rio Jacuí. 122 |
| Tabela 16 – | Parâmetros do modelo WIPH2 otimizados para os diferentes cenários de monitoramento pluviométrico, para bacia do Rio Jacuí. 126 |
| Tabela 17 – | Coefficientes de avaliação resultantes das calibrações e validações do modelo WIPH2, para a bacia do Alto Uruguai. 128 |
| Tabela 18 – | Parâmetros do modelo WIPH2 otimizados para os diferentes cenários de monitoramento pluviométrico, para bacia do Alto Uruguai. 131 |
| Tabela 19 – | Coefficiente de avaliação do modelo WIPH2, para as diferentes escalas de bacias, utilizando-se das estimativas do satélite TRMM. 136 |
| Tabela 20 – | Estações pluviométricas, climatológicas e fluviométrica, utilizadas para a obtenção das informações hidrológicas, na bacia do Rio Turvo. 155 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Tabela 21 – | Estações pluviométricas, climatológicas e fluviométrica, utilizadas para a obtenção das informações hidrológicas, na bacia do Rio Ijuí. | 155 |
| Tabela 22 – | Estações pluviométricas, climatológicas e fluviométrica, utilizadas para a obtenção das informações hidrológicas, na bacia do Rio Jacuí..... | 156 |
| Tabela 23 – | Estações pluviométricas, climatológicas e fluviométrica, utilizadas para a obtenção das informações hidrológicas, na bacia do Alto Uruguai..... | 158 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|----------|---|
| ANA | Agência Nacional de Águas |
| ASCII | <i>American Standard Code for Information Interchange</i> |
| BDMEP | Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa |
| CERES | <i>Clouds and Earth's Radiant Energy System</i> |
| CMORPH | <i>Center Morphing Method</i> |
| GeoSFM | <i>Geospatial Stream Flow Model</i> |
| GPM | <i>Global Precipitation Mission</i> |
| GOES | <i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i> |
| GrADS | <i>Grid Analysis and Display System</i> |
| GSMaP | <i>Global Satellite Mapping of Precipitation</i> |
| GV | <i>Ground Validation</i> |
| HTA | Histograma Tempo-Área |
| ICEA | Instituto de Controle de Espaço Aéreo |
| IDP | Inverso da Distância Ponderada |
| IDW | <i>Inverse Distance Weight</i> |
| INMET | Instituto Nacional de Meteorologia |
| IR | Banda do Infravermelho |
| IQD | Inverso do Quadrado da Distância |
| IVP | Índice de Vegetação Padronizado |
| JAXA | <i>Japan Aerospace and Exploration Agency</i> |
| LIS | <i>Lightning Imaging Sensor</i> |
| METEOSAT | <i>Meteorological Satellite</i> |
| MGB-IPH | Modelo de Grandes Bacias |
| MOCOM-UA | <i>Multi-Objective Complex Evolution Method – University of Arizona</i> |
| MW | Banda de Micro-ondas |
| NASA | <i>National Aeronautic and Space Administration</i> |
| NASDA | <i>National Space Development Agency of Japan</i> |
| NOAA | <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> |
| OMM | Organização Mundial de Meteorologia |
| PERSIANN | <i>Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks</i> |
| POM | <i>Pattern Oriented Memory</i> |
| PR | <i>Precipitation Radar</i> |
| REM | Radiação eletromagnética |
| RLS | Reservatório Linear Simples |
| SCE-UA | <i>Shuffled Complex Evolution – University of Arizona</i> |
| SLURP | <i>Semi-distributed Land Use-based Runoff Processes</i> |
| SWAT | <i>Soil and Water Assessment Tool</i> |
| TMPA | <i>TRMM's Multi-satellite Precipitation Analysis</i> |
| TMI | <i>TRMM Microwave Imager</i> |
| TOVAS | <i>TRMM Online Visualization and Analysis System</i> |
| TRMM | <i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i> |
| UV | Banda da radiação Ultravioleta |
| VIRS | <i>Visible and Infrared Radiometer System</i> |
| VIS | Banda do Visível |

LISTA DE APÊNCIDES

| | | |
|--------------|--|-----|
| Apêndice A – | Estações pluviométricas, climatológicas e fluviométricas das bacias dos rios Turvo, Ijuí, Jacuí e Alto Uruguai, com suas coordenadas de localização e altitudes nas quais se encontram | 155 |
| Apêndice B – | Hidrogramas e curvas de permanência das vazões calculadas e observadas gerados para o período de validação do modelo WIPH2..... | 161 |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 27 |
| 1.1 | Justificativa..... | 29 |
| 2 | OBJETIVOS | 31 |
| 2.1 | Objetivo geral | 31 |
| 2.2 | Objetivos específicos | 31 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 33 |
| 3.1 | Fenômeno da precipitação..... | 33 |
| 3.1.1 | Formação e classificação das nuvens..... | 33 |
| 3.1.2 | Classificação das precipitações | 35 |
| 3.2 | Mensuração convencional da precipitação | 36 |
| 3.2.1 | Espacialização da precipitação e obtenção de chuva média | 38 |
| 3.3 | Estimativas de precipitação através de sensoriamento remoto por satélites | 40 |
| 3.3.1 | Formação de imagens de satélite meteorológicos | 40 |
| 3.3.2 | Técnicas baseadas no visível e infravermelho (VIS/IR) | 43 |
| 3.3.3 | Técnicas baseadas em micro-ondas (MW) e canais multiespectrais | 45 |
| 3.4 | O satélite meteorológico TRMM..... | 46 |
| 3.4.1 | Histórico do Projeto TRMM | 46 |
| 3.4.2 | Instrumentos a bordo do satélite TRMM e seus produtos | 47 |
| 3.5 | Modelos hidrológicos..... | 52 |
| 3.5.1 | Aspectos gerais..... | 52 |
| 3.5.2 | Calibração e validação de modelos chuva-vazão | 53 |
| 3.6 | Modelo hidrológico IPH II | 54 |
| 3.6.1 | Descrição do modelo..... | 54 |
| 3.6.2 | Algoritmo de perdas por evaporação e interceptação | 57 |
| 3.6.3 | Algoritmo de separação dos escoamentos | 58 |
| 3.6.4 | Propagação superficial e subterrânea..... | 62 |
| 3.7 | Qualidade das estimativas de precipitação obtidas por satélite e uso em modelos hidrológicos..... | 64 |
| 4 | METODOLOGIA | 71 |
| 4.1 | Critérios utilizados para a escolha das bacias | 71 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.2 | Cenários pluviométricos | 71 |
| 4.3 | Fontes de dados | 72 |
| 4.3.1 | Precipitação estimada por satélite | 73 |
| 4.3.2 | Precipitação mensurada em solo e dados de vazão | 73 |
| 4.3.3 | Evapotranspiração real | 74 |
| 4.4 | Precipitação média espacializada..... | 76 |
| 4.4.1 | Interpolação dos dados de pluviômetros | 76 |
| 4.4.2 | Integração dos dados do satélite para acumulado diário..... | 77 |
| 4.5 | Testes estatísticos comparativos..... | 79 |
| 4.6 | Simulações com o modelo WIPH2 | 81 |
| 4.6.1 | Calibração e validação do modelo..... | 81 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 85 |
| 5.1 | Caracterização das bacias selecionadas..... | 85 |
| 5.1.1 | Bacia do Rio Turvo | 86 |
| 5.1.2 | Bacia do Rio Ijuí..... | 89 |
| 5.1.3 | Bacia do Rio Jacuí..... | 91 |
| 5.1.4 | Bacia do Alto Uruguai | 94 |
| 5.2 | Processamento dos dados espacializados para uso no modelo | 96 |
| 5.2.1 | Cenários de redes pluviométricas..... | 96 |
| 5.2.2 | Integração dos dados do TRMM..... | 100 |
| 5.2.3 | Estimativa da evapotranspiração..... | 101 |
| 5.3 | Comparação entre as chuvas médias | 103 |
| 5.4 | Modelagem com o WIPH2..... | 109 |
| 5.4.1 | Aplicação do WIPH2 na bacia do Rio Turvo | 109 |
| 5.4.2 | Aplicação do WIPH2 na bacia do Rio Ijuí | 115 |
| 5.4.3 | Aplicação do WIPH2 na bacia do Rio Jacuí | 121 |
| 5.4.4 | Aplicação do WIPH2 na bacia do rio Alto Uruguai..... | 127 |
| 5.5 | Efeito de escala na modelagem com dados do TRMM | 132 |
| 6 | CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES | 139 |
| | REFERÊNCIAS | 143 |
| | APÊNDICES | 155 |

1 INTRODUÇÃO

A hidrologia é dita como a ciência que trata da ocorrência, distribuição e movimentação da água na Terra. Está voltada para os diferentes problemas que envolvem a utilização dos recursos hídricos, a preservação do meio ambiente e a ocupação de bacia hidrográfica (TUCCI, 2013), sendo de fundamental importância no que tange ao conhecimento dos dados relacionados a observação, mensuração, processamento ou previsão de variáveis hidrológicas, como precipitação, vazão e evapotranspiração.

Muitas vezes, estas variáveis hidrológicas são escassas em algumas bacias hidrográficas, principalmente em países em desenvolvimento na América do Sul, como é o caso do Brasil. Esse fato deve-se especialmente ao custo de manutenção das redes de monitoramento e à dificuldade de acesso a algumas áreas acaba por agravar esse problema (SALIO et al., 2015). Por exemplo, a densidade de estações fluviométricas registradas na Agência Nacional Águas (ANA) em 2007, para a região Sudeste, era de uma estação a cada 484 km², em contraste com a região Norte, com uma estação a cada 8.557 km² (OLIVEIRA, 2008).

Os modelos hidrológicos são ferramentas importantes nestes casos de insuficiência de dados, pois além de serem utilizados para análise de consistência e preenchimento de falhas, permitem, após o seu ajuste, realizar a extensão de uma série de dados, com base na série de outra variável (TUCCI, 2005). Como exemplo, cita-se o caso das séries de precipitação, que geralmente são mais extensas e utilizadas para prolongar séries de vazões por meio de modelos conhecidos por simularem a transformação da precipitação em vazão.

O IPH II é um modelo hidrológico chuva-vazão, do tipo concentrado, desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (TUCCI et al., 1981). De acordo com Germano et al. (1998), este modelo foi desenvolvido para ser utilizado em bacias de diferentes tamanhos e características, buscando estimar a vazão a partir de informações históricas de precipitação e do ajuste dos parâmetros que compõem as estruturas da bacia.

Estes modelos que simulam a transformação da chuva em vazão, têm a precipitação como uma das principais informações de entrada, pois como parte

fundamental do ciclo hidrológico, esta variável tem características próprias de ocorrência como localização, intensidade e persistência.

É importante o conhecimento acerca da intensidade da precipitação, pois é a partir desta variável que se tem a informação sobre o escoamento superficial gerado pelo evento, uma vez que quantidades maiores de chuva em menores intervalos de tempo, geram uma grande quantidade de água a ser escoada pela superfície mesmo em solos não saturados.

Outro aspecto importante sobre a precipitação é a irregularidade da sua distribuição espaço-temporal, o que a torna uma variável hidrológica de mensuração desafiadora, já que requer redes densas de monitoramento (SALIO et al., 2015). A maneira tradicional para sua estimativa consiste na medição pontual por pluviômetros ou pluviógrafos, sendo sua espacialização obtida a partir da interpolação para toda área de interesse. Outra maneira de estimar a precipitação é a partir de técnicas de sensoriamento remoto, como o uso de radares e satélites meteorológicos. Embora estes últimos não apresentem exatidão em termos quantitativos, os pluviômetros são precisos apenas para uma pequena área no entorno da qual está localizado o dispositivo (OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2014).

A importância de uma boa cobertura de medição de chuva se dá devido às consequências geradas pela falta da representatividade espacial da precipitação que, de acordo com Collischonn (2001), acarreta mais ineficiência nas simulações de vazões geradas pelos modelos do que a própria heterogeneidade das características físicas das bacias.

Como alternativa para melhorar a qualidade da espacialização dos dados de precipitação, vêm sendo utilizadas estimativas obtidas por sensoriamento remoto, por meio de radares e satélites meteorológicos (COLLISCHONN, 2006). Os radares meteorológicos, no entanto, são restritos apenas aos grandes centros urbanos. Já as estimativas dadas por satélites meteorológicos vêm se destacando, principalmente em estudos hidrológicos, por disponibilidade a outras regiões, e por apresentarem resultados considerados de boa qualidade.

Dentre os satélites meteorológicos capazes de estimar precipitação, destacam-se no Brasil os dados obtidos pelos equipamentos europeus do grupo METEOSAT (*Meteorological Satellite*), dos norte-americanos da série GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) e do TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*).

Especificamente, o TRMM foi projetado para monitorar e estudar precipitações em regiões tropicais e subtropicais da Terra (KUMMEROW et al., 2000), onde se concentram dois terços do total precipitado em escala global. Segundo os mesmos autores, o principal objetivo deste satélite meteorológico é o levantamento de dados que representem a variação espacial e temporal da precipitação entre as latitudes 35° N-S e longitudes 180° W-E; no entanto, há informações disponíveis para latitudes de até 50° N-S. Os dados são fornecidos, em sua melhor resolução, em grades de 0,25°, aproximadamente 25 km, com dados coletados a cada 3 horas, disponíveis desde Janeiro de 1998 (NASA, 2014a).

Embora o emprego das estimativas de precipitação com satélites meteorológicos ainda não seja muito difundido, nota-se que aos poucos elas vêm sendo utilizadas, geralmente em pesquisas de cunho científico. Em geral, estas pesquisas buscam aferi-las com dados pluviométricos mensurados convencionalmente, apresentando o nível de aceitabilidade e viabilidade do uso de tais estimativas, visando diminuir as incertezas e obter robustez nos resultados dos projetos.

1.1 Justificativa

Nos modelos hidrológicos chuva-vazão, a precipitação é uma das principais variáveis analisadas antes de ser utilizada como dado de entrada. Erros na estimativa deste dado inevitavelmente conduzem a erros na geração da vazão, o que torna esta componente hidrológica determinante na qualidade dos resultados simulados. Porém, no Brasil, é notória a insuficiência e má distribuição de estações de monitoramento, sendo a maioria das bacias hidrográficas brasileiras consideradas escassas de dados hidrológicos, principalmente pluviométricos.

Geralmente, bacias maiores tendem a apresentar informações escassas por possuírem dimensões maiores de área aliadas às baixas quantidades de pluviômetros. Algumas bacias ainda possuem o agravante de conterem locais de difícil acesso, o que dificulta a implantação de equipamentos.

Alguns estudos, dentre eles os desenvolvidos por Collischonn et al. (2008), Viana et al. (2010), Leivas et al. (2012), Bajracharya et al. (2014a), apontam que

uma alternativa viável é a utilização de dados pluviométricos estimados por satélites, visto que estes vêm gerando resultados confiáveis, destacando sua importância para bacias caracterizadas por escassez de informações de precipitação.

Os resultados encontrados na literatura advindos de estudos com dados de precipitação obtidos com o satélite TRMM são muitos similares. De forma geral, as estimativas são consideradas adequadas, principalmente quando se objetiva a distribuição espacial e a real ocorrência do evento, que são características importantes quando se trata de informações de entrada em modelos hidrológicos, embora apresentem menores precisões quando comparados quantitativamente com dados medidos por pluviômetros.

Por conseguirem caracterizar a variabilidade da precipitação, as estimativas de satélites tendem a se adequar bem aos modelos distribuídos, justamente por estes considerarem que as variáveis hidrológicas não ocorrem de maneira uniforme ao longo de toda a bacia. No entanto, a modelagem distribuída demanda uma grande quantidade de dados de entrada, nem sempre disponíveis.

Por esta razão, os modelos hidrológicos do tipo concentrado são amplamente utilizados nos mais diversos estudos. Os modelos concentrados, por necessitarem de menos parâmetros, proporcionam um tempo relativamente menor no processamento de informações necessárias à calibração e validação do modelo, e por isso, de forma geral, estes modelos são considerados mais simples. No entanto, o resultado de modelos concentrados também é fortemente influenciado pela qualidade de informações de entrada, a exemplo da precipitação, que deve ser fornecida por meio de valores médios, e precisa representar toda a variabilidade da área em estudo.

Partindo do exposto, a hipótese formulada é de que a precipitação estimada por satélite pode ser considerada uma fonte de informação relevante em um modelo chuva-vazão concentrado, podendo ser utilizada para determinação da precipitação média, principalmente em bacias maiores e com escassez de dados hidrológicos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa foi avaliar, para bacias subtropicais com diferentes áreas de drenagem e densidade pluviométrica, a qualidade da vazão gerada por meio de modelagem concentrada chuva-vazão, quando a estimativa da precipitação por satélite é utilizada como variável de entrada em substituição a dados de pluviômetros.

2.2 Objetivos específicos

Especificamente, objetivou-se:

- a) selecionar as bacias hidrográficas de diferentes escalas de áreas de drenagem, que atendam aos critérios definidos no estudo;
- b) obter a chuva média, para cada bacia, advinda das estimativas já espacializadas do satélite e por meio da interpolação das informações pontuais dos pluviômetros;
- c) realizar análise estatística comparativa entre as chuvas médias obtidas de informações de pluviômetros e estimadas pelo satélite;
- d) calibrar e validar o modelo IPH II, do tipo concentrado, para cada bacia em estudo utilizando, separadamente, os conjuntos de chuvas médias como dado de entrada do modelo hidrológico utilizado;
- e) Avaliar para quais condições (escalas das bacias hidrográficas e cobertura de monitoramento pluviométrico) a chuva estimada por meio do satélite TRMM produz melhores/piiores resultados na qualidade da simulação da vazão, quando comparada com aquelas mensuradas a partir do monitoramento convencional com pluviômetros.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Buscou-se apresentar nos primeiros tópicos deste capítulo uma síntese de conceitos básicos, porém importantes, que possibilitam o melhor embasamento das etapas do trabalho, assim como fornecem subsídios para a interpretação dos resultados.

3.1 Fenômeno da precipitação

A precipitação é amplamente reconhecida pelos pesquisadores como a variável climatológica mais importante na região tropical (MORAES et al., 2005), determinante em cálculos de balanço hídrico, que pode ser entendida, segundo Fekete et al. (2004), como toda água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre.

Há diferentes formas de precipitação na natureza, que variam de acordo com o estado em que água se encontra, podendo ser neblina, chuva, granizo, orvalho, geada e neve. No Brasil, de acordo com Santos et al. (2001), cerca de 99% da precipitação ocorre sob a forma de chuva, e menos de 1% nas demais formas.

A possibilidade de ocorrência de precipitação está ligada ao vapor de água contido na atmosfera, proveniente da evaporação da água contida no solo e da transpiração vegetal, sendo ambos os processos simultâneos e comumente chamado de evapotranspiração.

3.1.1 Formação e classificação das nuvens

A mistura de ar, vapor de água e gotículas líquidas ou sólidas, cujos diâmetros variam de 0,001 a 0,03 mm, formam as nuvens, que possibilitam a ocorrência da precipitação em determinadas condições (BERTONI; TUCCI, 2013).

A formação das precipitações está associada ao movimento de ascensão de massas de ar úmido, que provoca um resfriamento dinâmico, ou adiabático, fazendo com que o vapor atinja o seu ponto de saturação. A partir do nível de condensação, em condições favoráveis e com a existência de núcleos higroscópios, o vapor d'água condensa, formando minúsculas gotas em torno desses núcleos (BERTONI; TUCCI, 2013).

Enquanto as gotas não possuírem peso suficiente para vencer a resistência do ar, elas ficam mantidas em suspensão, na forma de nuvens e nevoeiros. Somente quando atingem volume suficiente para que seu peso supere as forças que as mantêm em suspensão, elas se deslocam em direção ao solo.

As nuvens foram classificadas pelo Atlas Internacional de Nuvens da OMM (Organização Mundial de Meteorologia), em 1956, em dez gêneros (POTIER, 2010). De acordo com Lutgens e Tarbuck (1989) apud Collischonn (2006), há três gêneros básicos a partir dos quais todas as outras nuvens são formadas, variando ou combinando essas formas básicas:

- *Cirrus*: que são nuvens de grande altitude, de pequena espessura e cor branca. São desagregadas, formando uma espécie de fibra alongada de aspecto frágil;
- *Cumulus*: massas globulares individuais, com a base plana e o aspecto de torres ou cúpulas;
- *Stratus*: são camadas extensas que cobrem todo o céu e, embora possa haver interrupções, não se distinguem unidades individuais.

Há outra classificação, citada por Lutgens e Tarbuck (1989) apud Collischonn (2006), que leva em consideração a altitude em que as nuvens se encontram, podendo ser classificadas, então, em três tipos principais:

- nuvens altas: acima de 6.000 m. Devido à baixa temperatura e baixo teor de vapor d'água, são nuvens brancas e finas, formadas principalmente por cristais de gelo;
- nuvens médias: entre 2.000 e 6.000 m;
- nuvens baixas: altitude inferior a 2.000 m. Pelo fato de haver mais vapor em baixas altitudes, as nuvens baixas e médias são mais densas e escuras.

Partindo da classificação apresentada, nota-se que as nuvens do gênero *Cirrus* são encontradas geralmente acima de 6.000 m e possuem um baixo ter de

vapor d'água, o que diminui sua importância diante a formação de precipitações. Potier (2010) cita que as nuvens realmente capazes de causar chuva, por conterem mais vapor d'água, são as de altitude baixa, inferior a 2.000 m, do gênero *Stratus* e *Cumulus*. As *Stratus* de camada uniforme, são formadoras dos nevoeiros e garoas e as *Cumulus* apresentam pancada rápida de chuva.

Ainda há um gênero importante de formação de chuva, que são as *Nimbostratus*, caracterizadas por serem escuras e provocarem chuvas de grande intensidade, que geralmente causam inundações em regiões suscetíveis, devido à grande quantidade de água precipitada em curto intervalo de tempo (POTIER, 2010).

3.1.2 Classificação das precipitações

De acordo com Bertoni e Tucci (2013), o mecanismo fundamental pelo qual se produz a ascensão do ar úmido permite classificar as precipitações em convectivas, orográficas e frontais.

As chuvas frontais, também ditas ciclônicas ou estratiformes, ocorrem quando se encontram duas grandes massas de ar, de diferentes temperatura e umidade. A massa de ar mais quente, que é mais leve e, normalmente, mais úmida, se sobrepõe ao ar denso e frio, formando frentes caracterizadas por altos gradientes de temperatura, pressão e umidade (MAIDMENT, 1993). Quando impulsionada para cima, a massa de ar quente se resfria e condensa o vapor de água, de forma a produzir chuvas. Essas massas de ar têm centenas de quilômetros de extensão e movimentam-se de forma relativamente lenta, caracterizando o evento como de longa duração, que abrange grandes extensões, e de média intensidade (BERTONI; TUCCI, 2013).

As chuvas frontais são mais frequentes na região Sul do Brasil, ocorrendo menos em direção à região Norte. São responsáveis por importantes eventos para grandes bacias, já que em alguns casos as frentes podem ficar estacionárias, atingindo o mesmo local por vários dias seguidos, o que possibilita a ocorrência de enchentes nessas áreas.

As chuvas orográficas ocorrem quando a elevação do ar úmido é causada inteiramente, ou principalmente, por um terreno elevado, como uma cordilheira ou serra muito alta, dando início a um processo de convecção forçada, ou efeito orográfico, induzindo a subida da massa de ar, que em maiores altitudes se resfriam de forma adiabática, havendo condensação do vapor, formação de nuvens e ocorrência de chuvas (KOBAYAMA et al., 2006). Geralmente essas chuvas são de pequena intensidade e grande duração, cobrindo porções pequenas de áreas.

Chuvas convectivas ocorrem devido ao aquecimento de massas de ar úmido que estão em contato direto com a superfície quente dos continentes e oceanos, resultando em brusca ascensão para níveis mais altos da atmosfera, onde as baixas temperaturas propiciam a condensação do vapor d'água, formando as nuvens e, muitas vezes, precipitações, caracterizadas pela alta intensidade e pela curta duração (BERTONI; TUCCI, 2013). Normalmente, elas ocorrem de forma concentrada sobre áreas relativamente pequenas, estando, muitas vezes, associadas a problemas de inundação em áreas urbanas.

Nas regiões tropicais há uma predominância das chuvas convectivas, pois os ventos são fracos e os movimentos de ar são essencialmente verticais. Nas regiões temperadas elas também podem ocorrer, porém apenas em ocasiões de verão.

3.2 Mensuração convencional da precipitação

Para a obtenção de dados de precipitação, medidos convencionalmente, Santos et al. (2001) citam a necessidade de construção de redes de monitoramento localizadas em posições geográficas que sigam as recomendações de implantação. Estas redes de monitoramento devem ser compostas por estações pluviométricas que contenham equipamentos de medição, dentre os quais se destacam pluviômetros e pluviógrafos, utilizados de acordo com a finalidade das informações, que podem ser mais ou menos detalhadas.

O pluviômetro fornece o total precipitado ao final de um intervalo de tempo definido para a frequência de observações, geralmente 24 horas como cita Chevallier (2013). São equipamentos precisos quantitativamente, mas pontuais, requerendo ampla distribuição na área em estudo para assegurar um correto valor

encontrado para regiões localizadas entre os pluviômetros. Quando se deseja a informação de chuvas em intervalos de tempo menores que as 24 horas, instalam-se os pluviógrafos, que são equipamentos capazes de medir continuamente, de forma analógica ou digital, a precipitação em um local (SANTOS et al., 2001).

Em relação à precisão das medições pluviométricas, Chevallier (2013) relata que esta é dependente do valor precipitado, uma vez que eventos maiores geram volumes maiores e, conseqüentemente, informações mais precisas. Os erros nas medições são geralmente pequenos, ocasionados, dentre outros fatores, devido a danos no equipamento (WANIELISTA, 1997), à interferência antrópica na leitura e à manipulação das informações obtidas.

Além de eventuais erros na medição, ainda deve-se levar em conta a densidade de equipamentos na área, necessários para uma boa cobertura de monitoramento. Em muitos casos essa cobertura é baixa devido ao custo de implantação da estação ou à dificuldade de acesso à área.

Para contrapor tais problemas, Nóbrega et al. (2008a) mencionam a utilização de sensores remotos para aumentar a quantidade de informações disponíveis, incluindo as estimativas de precipitação, já que nas três últimas décadas estes apresentaram avanços consideráveis. Das técnicas de sensoriamento remoto, podem-se citar os radares meteorológicos e os satélites meteorológicos (abordados no tópico 3.3), que são, por vezes, utilizados em estudo hidrológico.

Inicialmente, as estimativas eram obtidas por radares, que são equipamentos que têm como alvo o que estiver presente na sua área de varredura, e são capazes de fazer retornar ao receptor uma energia radioelétrica de nível detectável, como, por exemplo, as gotas de chuva. No entanto, Silva et al. (2009) apontam que vários fatores físicos podem resultar em estimativas errôneas por parte deste sistema, assim como também podem ser influenciados pelo tipo de precipitação, convectivas ou estratiformes.

Conti (2002) ressalta que o radar é um aparelho dispendioso que deve, ainda, ser calibrado periodicamente com dados conhecidos de precipitação, necessitando ser acompanhado por estações pluviométricas convencionais. Sendo assim, nota-se que em casos de escassez de dados de pluviômetro ou pluviógrafo, o uso desta técnica também se torna inviável.

O uso de satélite meteorológico é mais recente e vem se sobressaindo devido à alta confiabilidade dos resultados, como cita Nóbrega et al. (2008a). Conti (2002)

salienta que a qualidade das estimativas de precipitação, obtidas com auxílio de satélite, proporciona vantagens em diversas áreas da hidrologia, dentre elas: (i) a melhora no direcionamento de uso e ocupação do solo, uma vez que evidencia com precisão áreas potencialmente inundáveis; (ii) a otimização dos sistemas de geração de energia elétrica e de abastecimento de água, devido ao melhor conhecimento da precipitação em áreas a montante, e; (iii) o aumento da qualidade dos resultados simulados por modelos climáticos globais e hidrológicos em regiões de pouca informação pluviométrica.

Estas vantagens, aliadas ao baixo custo de obtenção de dados estimados de precipitação a partir de satélites já em órbita, tornam esta técnica interessante e alvo de estudos em diversas áreas relacionadas aos recursos hídricos.

3.2.1 Espacialização da precipitação e obtenção de chuva média

Em estudos onde a variável de precipitação é tratada como uma informação média, as informações pontuais de pluviômetro, precisam ser espacializadas por toda a extensão da bacia, com o intuito de se conhecer a lâmina precipitada em cada porção ou, ainda, a chuva média, que é referente à lâmina de água de altura uniforme que ocorreu sobre toda a área.

Existem diversos métodos que levam em consideração critérios matemáticos e geográficos, que interpolam/extrapolam as informações pontuais de forma satisfatória. Bertoni e Tucci (2013) citam que as técnicas mais usuais de obtenção da chuva média são o método da média aritmética, o método das isoietas e o método de Thiessen.

O método da média aritmética só apresenta bons resultados quando a área apresenta uma densa cobertura pluviométrica, ou em bacias pequenas com poucas variações pluviométricas, como áreas planas com suave gradiente pluviométrico, pois admite-se que todos os pluviômetros têm o mesmo peso, ignorando as variações geográficas da precipitação (CONTI, 2002).

As isoietas, ou linhas de igual precipitação, podem ser traçadas para um evento ou para uma duração específica, e são consideradas como um método gráfico (BERTONI; TUCCI, 2013), embora considere a ideia de variação gradual da

precipitação, que é a base de vários outros métodos mais adequados de interpolação e obtenção da chuva média, usados atualmente (COLLISCHONN, 2006).

O método de Thiessen é relativamente simples, capaz de considerar a não-uniformidade das informações pontuais, que é uma característica importante para locais com informações pontuais escassas, porém não leva em conta o relevo da bacia. Bertoni e Tucci (2013) descrevem brevemente a metodologia em ligar as estações por trechos retilíneos, traçar linhas perpendiculares aos trechos retilíneos passando pelo meio da linha que liga as duas estações e prolongar as linhas perpendiculares até encontrar outra. Formam-se então os polígonos, que são relativos à área de influência de cada estação na bacia.

Com a evolução dos computadores e desenvolvimento de diferentes softwares e pesquisas novos métodos de interpolação, como o Inverso da Distância Ponderado (IDP) e a krigagem, têm ganhado espaço. Estes métodos, diferentemente dos polígonos gerados pelo método de Thiessen, consideram a gradual distribuição da precipitação.

O IDP, também conhecido como IDW (*Inverse Distance Weight*), é bastante utilizado para espacialização da precipitação em bacias hidrográficas, e se baseia na ideia de que cada posto pluviométrico tem uma influência local que diminui com a distância. Este método pondera os pontos mais próximos das células em processamento em detrimento aos que estão mais afastados, baseando-se na linearidade ponderada da combinação do conjunto de dados de precipitação em cada posto, no qual o fator de ponderação é o inverso da distância (AMORIM, 2009).

Comumente, o IDW é utilizado com o expoente dois, apresentando resultados satisfatórios em estudos hidrológicos, recebendo, então, a denominação de “inverso do quadrado da distância” (IQD). Potências maiores enfatizam pontos mais próximos, tornando os resultados menos suaves, enquanto as potências menores suavizam mais os resultados, devido à ênfase nos pontos mais distantes (MARCUSO et al., 2011).

As técnicas de *kriging* têm apresentado eficiência na interpolação de dados pluviométricos e, por isso, o método de krigagem tem sido largamente utilizado (VIOLA et al., 2010; CARVALHO et al., 2012). O método se baseia na evidência de que a variação espacial de qualquer propriedade hidrológica é por demais irregular para ser representada por uma função matemática contínua, sendo melhor descrita

por uma superfície estocástica (COLLISCHONN, 2006). O mesmo autor ainda afirma que inicialmente se exploram os aspectos estocásticos da variável considerada, e só posteriormente a modela, utilizando a informação resultante para estimar os ponderadores da interpolação.

Mesmo que essas técnicas apresentem resultados satisfatórios, a interpolação só permite que os valores máximos precipitados ocorram nos pontos com pluviômetros, suavizando o evento em direção aos locais sem informações monitoradas. Pode-se notar, então, a limitação dessas técnicas na geração de resultado quando o maior volume da precipitação se dá em pontos onde não há pluviômetros, tornando impossível representar corretamente a variável hidrológica no espaço.

Para contornar a limitação dos métodos de interpolação de informações de precipitação, Collischonn (2006) cita o uso das estimativas obtidas por sensoriamento remoto, que são capazes de representar a variação espacial sem se limitar às lacunas da medição pontual.

3.3 Estimativas de precipitação através de sensoriamento remoto por satélites

3.3.1 Formação de imagens de satélite meteorológicos

Dentre as diversas definições de sensoriamento remoto, Jensen (2007) apud Shimabukuro et al. (2009) cita, de forma abrangente, que sensoriamento remoto é a ciência que se refere à coleta de informações sobre um objeto ou fenômeno, sem que ocorra contato físico com o objeto em análise. Estas informações são adquiridas a partir das interações entre radiação eletromagnética (REM) e matéria, que são obtidas por sensores a bordo de satélites ou aeronaves (SCADUTO, 2009).

Há quatro elementos fundamentais às técnicas de sensoriamento remoto, citadas por Scaduto (2009): a REM, a fonte de emissão, o sensor e o alvo. A REM é o elemento que permite a obtenção da informação. O alvo é o objeto de análise de onde se busca a informação. O sensor é o equipamento que capta a REM e a fonte

é o que emite essa radiação. No caso do sensoriamento remoto, a principal fonte de REM que atinge a Terra é o sol, pois a maioria dos sensores são passivos, ou seja, não possuem capacidade de emitir radiação eletromagnética. Ao contrário dos sensores passivos, os ativos são aqueles que possuem sua própria fonte de radiação eletromagnética, e independem dos raios solares.

As ondas eletromagnéticas oriundas do sol contêm comprimentos de ondas que podem variar de 10^{-12} a 10^4 m, porém as técnicas de sensoriamento remoto utilizam o intervalo de 0,2 μm a 1 m, conhecidas como bandas espectrais, pois a camada atmosférica bloqueia as demais áreas espectrais devido à presença de vapor d'água e outros gases (CONTI, 2002).

Para as técnicas de sensoriamento remoto, as principais parcelas do espectro são as seguintes, com seus intervalos de comprimentos de ondas e frequência:

- Ultravioleta (UV): de 0,2 μm a 0,4 μm e de 10^{15} a 10^{16} Hz;
- Visível (VIS): de 0,4 μm a 0,7 μm e de 10^{14} a 10^{15} Hz;
- Infravermelho (IR): de 0,7 μm a 1 mm e de 10^{12} a 10^{14} Hz;
- Micro-ondas (MW): de 1 mm a 1 m e de 10^8 a 10^{11} Hz.

A radiação do infravermelho ainda pode ser ainda subdividida em infravermelho próximo (0,7 μm a 1,3 μm), infravermelho médio (1,3 μm a 6,0 μm) e infravermelho distante ou termal (6,0 μm a 1 mm), conforme cita Florenzano (2011).

Essa radiação eletromagnética pode sofrer três processos quando incide sobre um alvo na superfície terrestre, denominados transmissão, absorção e reflexão. A transmitância é a razão entre a radiação transmitida e a radiação incidente. A absorptância é a razão entre a radiação absorvida e a incidente. A reflectância é a razão entre a radiação refletida e a incidente.

A reflectância é a base da determinação da natureza dos alvos dos sensores, pois cada material reflete distintamente em cada banda do espectro. Quando as respostas espectrais de vários alvos são conhecidas, é possível determinar a natureza de um alvo desconhecido a partir da comparação entre a resposta espectral deste com os dados de referência (ENVI, 2005 apud COLLISCHONN, 2006).

Segundo Conti (2002), as imagens de satélite são organizadas em matrizes de números correspondentes à resposta espectral de cada elemento na superfície,

armazenadas em arquivos computacionais de extensão *raster*, sendo o elemento de área conhecido como *pixel*, que é uma média das respostas dos diferentes alvos contidos nele. A dimensão de um *pixel* pode variar de alguns metros, quando a resolução espacial é maior, para vários quilômetros, conforme a resolução é diminuída, ocorrendo, por consequência, maior perda de detalhamento.

Os sensores passivos podem ficar a bordo de satélites geoestacionários, polares ou oblíquos, que são assim classificados em função da órbita que descrevem em torno do planeta, conforme figura 1.

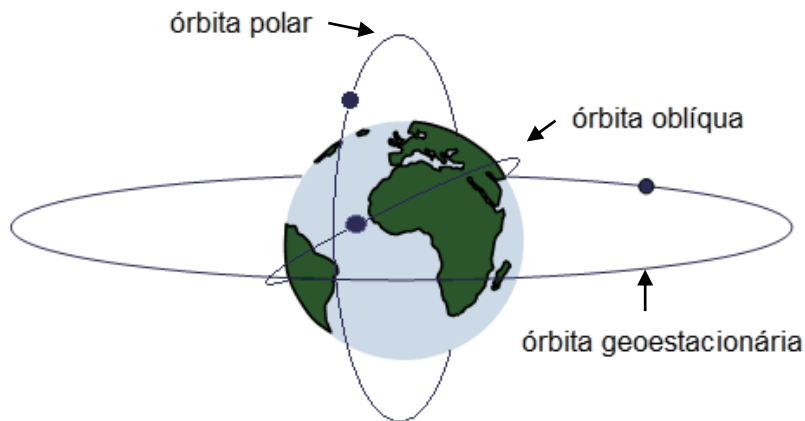


Figura 1 – Tipos de órbitas de satélite.

Fonte: Do autor com base em Schultz e Engman (2000) apud Collischonn (2006).

Os satélites geoestacionários situam-se sobre a linha do Equador e, como sempre orbitam o mesmo ponto da superfície, apresentam alta resolução temporal, ou seja, obtêm informações da superfície em curtos intervalos de tempo. São satélites de grandes altitudes, em torno de 36.000 km, o que acarreta em uma menor resolução espacial, além de produzir imagens distorcidas em latitudes mais altas, considerado inadequado para medições nos polos. Os satélites da série GOES, por exemplo, são de órbita geoestacionária, que operam em cinco bandas espectrais, na faixa do visível e infravermelho (EMBRAPA, 2014).

Os satélites polares operam em órbitas mais baixas, como os satélites da série NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), com altitude em torno de 850 km. Os de órbita oblíqua, como o TRMM, apresentam altitude ainda

menor, em torno de 400 km, o que os permite obter imagem de maior resolução espacial mesmo em frequências menores como as de micro-ondas.

Dentre as diversas áreas onde as informações estimadas por satélite são úteis, a estimativa de variáveis hidrológicas, mais especificamente de precipitação, vem ganhando espaço em estudos hidrológicos, uma vez que subsidiam uma fonte rica de informação alternativa onde não se têm informações monitoradas (NÓBREGA et al., 2008a).

Estas estimativas de precipitação são obtidas pelos satélites a partir de técnicas de sensoriamento remoto, por meio de análise e avaliação de várias características individuais das nuvens observadas nas imagens geradas, onde diversos fatores auxiliam na identificação das nuvens associadas à precipitação.

As principais características a serem analisadas das nuvens são o brilho, a temperatura no topo e a textura de sua superfície. Para cada técnica de estimativa de precipitação por satélite, a partir dos canais visível e infravermelho ou de micro-ondas, que são técnicas mais novas, há princípios que se baseiam nestas características das nuvens, as quais possibilitam a estimativa do evento.

3.3.2 Técnicas baseadas no visível e infravermelho (VIS/IR)

Os dados na banda do visível são transmitidos pelos sensores que medem a radiação refletida na porção visível do espectro eletromagnético. As áreas brilhantes das imagens geradas nesta banda mostram onde a radiação está sendo refletiva de volta para o espaço, devido ao alto albedo das nuvens (KIDD; LEVIZZANI, 2011). Os autores ainda citam que a reflectância das nuvens está relacionada a sua espessura, por isso, nuvens mais brilhantes tendem a ser mais espessas e, por consequência, mais propensas a serem associadas com nuvens precipitantes.

Porém, Kidd e Livizzani (2011) citam que a relação entre o brilho da nuvem e o real evento de precipitação é fraca e, por isso, as imagens no visível são utilizadas apenas em conjunto com observações de outras técnicas. Geralmente, as imagens do visível são usadas em conjunto com as derivadas do infravermelho, que fornecem informação sobre a textura e a temperatura do topo das nuvens, que possibilitam distinguir, por exemplo, as nuvens *Stratus*, que são normalmente mais suaves e

formadoras de garoas, das *Cumulus*, que são mais irregulares e de topos frios, caracterizando chuvas convectivas.

As técnicas de estimativa de precipitação no VIS e IR podem ser classificadas em três classes básicas, segundo Schultz e Engman (2000) apud Collischonn (2006): indexação de nuvens, evolução de nuvens e técnicas bispectrais. As técnicas de indexação de nuvens se baseiam na hipótese de que a precipitação está relacionada com a quantidade e os tipos de nuvens presentes na área. As técnicas que utilizam a evolução de nuvens são baseadas em observação consecutivas de imagem de satélite geoestacionário, que avaliam o estágio de desenvolvimento da nuvem para estimar a precipitação e, por isso, nuvens de mesmo aspecto podem produzir chuvas de diferentes intensidades dependendo se estirem evoluindo ou decaindo. As técnicas bispectrais exploram informações de profundidade e altitude das nuvens, obtidas de imagens no visível e infravermelho, respectivamente, produzindo tabelas de probabilidade de ocorrência de chuva comparadas com dados de radar, gerando campos de probabilidade, onde as maiores são dadas para as classes mais brilhantes (VIS) e mais frias (IR).

As imagens no infravermelho medem as emissões térmicas, sendo disponíveis dia e noite, ao contrário das imagens no visível, que são disponíveis apenas durante o dia. No entanto, a limitação das estimativas no infravermelho e visível estão relacionadas ao fato de que nem toda nuvem brilhante e de topo frio está efetivamente produzindo chuva e, inversamente, nem toda nuvem precipitante é brilhante e de topo frio, o que acarreta em dificuldades na associação das estimativas com a precipitação ao nível do solo (OUALLOUCHE et al., 2014).

Diversos autores salientam que essas limitações, por não “penetrarem” na nuvem, podem ser superadas pelo uso de sensores de micro-ondas (MW), que apresentam maior eficiência nas estimativas de precipitação. Dentre eles cita-se o trabalho realizado por Romilly e Gebremichael (2011) em bacias de diferentes topografias na Etiópia, onde os produtos à base de micro-ondas do satélite TRMM e do método CMORPH (*Center Morphing Method*), que utiliza dados de diferentes satélite para estimar precipitação, superaram, de forma geral, as estimativas do produto à base de infravermelho do satélite PERSIANN (*Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks*), quando comparados com informação de precipitação em superfície.

3.3.3 Técnicas baseadas em micro-ondas (MW) e canais multiespectrais

As técnicas de micro-ondas têm relação direta com a precipitação, visto que respondem de forma razoavelmente física à presença de água nas nuvens, uma vez as partículas de tamanho precipitáveis têm uma forte interação com esta radiação. Isso possibilita sua detecção por sensores, que geralmente estão a bordo de satélites em órbita de baixa altitude (OUALOUCHE et al., 2014).

Segundo Kidd e Levizzani (2011), as estimativas sobre os oceanos apresentam bastante precisão devido ao contraste gerado por sua superfície líquida “fria”, de baixa emissividade, com a superfície “quente” da nuvem precipitante. Isso ocorre porque os sensores de micro-ondas convertem o brilho espectral da nuvem em temperatura de brilho, e quanto mais gotas houver na nuvem, mais quente ela aparenta ser. Em contraponto, estimativas sobre continentes necessitam ser cuidadosamente analisadas devido à maior emissividade da superfície, que se assemelha com a das gotas precipitáveis, podendo resultar em erros em suas estimativas devido ao fundo da imagem.

Apesar da maior acurácia das estimativas obtidas com base em imagens de MW há algumas desvantagens em relação as estimativas VIS/IR. Gonçalves (2011) cita que a principal delas é o longo período entre duas passadas subsequentes sobre o mesmo ponto na superfície terrestre devido à órbita oblíqua, típica dos satélites nos quais os sensores de MW estão a bordo. Esse período entre duas passadas sobre o mesmo ponto pode chegar a dois dias, dependendo do satélite e da altitude.

Outra desvantagem frente as estimativas VIS/IR é a baixa resolução espacial dos sensores de MW, não apresentando resolução superior a 6 km, mesmo que em órbita de baixa altitude. Isso ocorre porque a taxa de amostragem é demasiadamente baixa e não permite a integração correta dos totais precipitados sobre áreas maiores (PETRY, 1995 apud COLLISCHONN, 2006).

As incertezas nas estimativas de precipitação frontal são maiores do que as geradas por precipitação convectiva, como afirma Gonçalves (2011), uma vez que os cristais de gelo, embora presentes nas precipitações estratiformes, são menores e menos numerosos do que em fenômenos convectivos, de forma a reduzir a

dispersão de MW, e por consequência, associar maior incerteza nos resultados gerados (SCHUMACHER et al., 2004).

Frente à precipitação orográfica, é necessário destacar a incapacidade dos sensores de MW em obter as estimativas, pois pouca ou nenhuma partícula de gelo é gerada no processo de colisão-coalescência das moléculas de vapor em terrenos com aclive. Este tipo de precipitação impossibilita as estimativas obtidas de técnicas de micro-ondas, assim como as técnicas baseadas no infravermelho, pois a temperatura destas nuvens são, em geral, muito maiores do que a temperatura limite usada para delimitação de precipitação (PETRY, 1995 apud COLLISCHONN, 2006).

Devido às vantagens e desvantagens de cada banda de radiação, desenvolveram-se algoritmos que utilizam canais multiespectrais para a melhor detecção da precipitação (GONÇALVES, 2011; OUALOUCHE et al., 2014). De forma geral, estas técnicas híbridas buscam explorar a alta resolução espacial das estimativas IR e o caráter global das estimativas MW, de forma a complementar e, consequentemente, aumentar a qualidade da informação estimada.

3.4 O satélite meteorológico TRMM

3.4.1 Histórico do Projeto TRMM

O satélite TRMM é um projeto conjunto entre a NASA (*National Aeronautic and Space Administration*) e a Agência de Exploração Aeroespacial do Japão, JAXA (*Japan Aerospace and Exploration Agency*), lançado em novembro de 1997, com objetivo específico de estudar e monitorar a chuva nos trópicos (KUMMEROW et al., 2000).

O TRMM é de órbita oblíqua, operando, inicialmente, a uma altitude de aproximadamente 350 km, que previa fornecer dados até março de 2004 (KUMMEROW et al., 2000). No entanto, em agosto de 2001 foi realizada uma manobra de elevação de altitude, para 402 km, que prolongou a vida útil do satélite devido à economia de energia, estendendo-a até junho de 2005, que foi quando

atingiu a reserva de combustível que assegurava a reentrada controlada do satélite na atmosfera e garantia sua queda no oceano.

Entretanto, a Agência decidiu abrir mão da reentrada controlada do satélite na atmosfera, considerando que o benefício de extensão das medições superaria o risco de eventuais peças provocarem danos materiais ou físicos em terra, caso não se desintegrassem no choque com a atmosfera, permitindo-o continuar em operação. Neste período, Collischonn (2006) cita que a previsão era do satélite TRMM operar até 2010.

A operação superou as expectativas e apenas em julho de 2014 as leituras de pressão do tanque de combustível indicaram que TRMM estava no final do seu combustível e como resultado, a NASA iniciou o processo de descida do satélite, a partir de sua altitude de operação de 402 km, garantindo sua segurança durante a deriva para baixo.

O imageador de micro-ondas continuou em operação durante todo o processo de descida da nave espacial até que atingiu a altitude de 355 km, em 8 de abril de 2015, altura em que todos os instrumentos a bordo foram desligados e no dia 15 de abril de 2015, a missão foi oficialmente encerrada (NASA 2015a). A reentrada da nave espacial na atmosfera da Terra se deu em 15 de junho de 2015, sobre o sul do oceano Índico (NASA, 2015b).

De forma geral, o satélite disponibiliza informações estimadas de precipitação de mais de dezessete anos, permanecendo em órbita e coletando informações relacionadas à precipitação tropical e subtropical por mais de dezessete anos, período compreendido entre o final do ano 1997 e início de 2015 (NASA, 2015b).

3.4.2 Instrumentos a bordo do satélite TRMM e seus produtos

Os instrumentos a bordo do TRMM relacionadas com as estimativas de precipitação são: radar de precipitação PR (*Precipitation Radar*), imageador de micro-ondas TMI (*TRMM Microwave Imager*), radiômetro no visível e no infravermelho VIRS (*Visible and Infrared Radiometer System*), sensor de energia radiante de superfície terrestre e das nuvens CERES (*Clouds and Earth's Radiant*

Energy System) e sensor para imageamento de relâmpago LIS (*Lightning Imaging Sensor*), apresentados pela NASA (2014b), conforme esboço da figura 2.

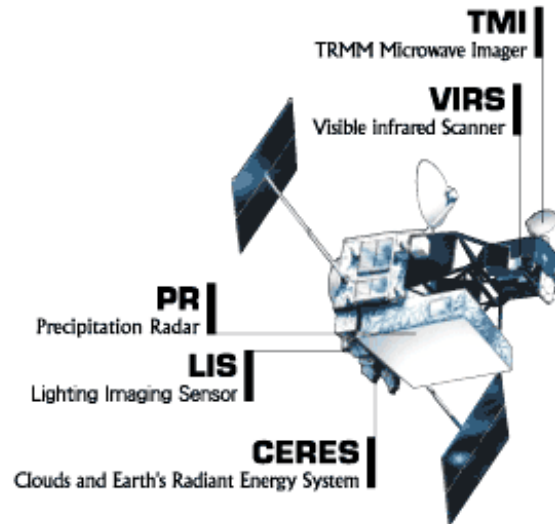


Figura 2 – Esboço dos instrumentos a bordo do satélite TRMM.

Fonte: JAXA (2014).

O PR foi o primeiro radar meteorológico lançado a bordo de um satélite. Seus principais objetivos são fornecer mapas tridimensionais de estruturas precipitantes e melhorar a precisão das estimativas geradas pelo TMI, sendo capaz de detectar taxas de precipitação bastante baixas, da ordem de $0,7 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$. Apresenta uma resolução horizontal no terreno de cerca de 5 km e uma largura de faixa 247 km. As informações do PR passam, ainda, por uma validação terrestre GV (*Ground Validation*), por meio de radares meteorológicos localizados em superfície ao longo da faixa intertropical (WOLFF et al., 2005).

O TMI é o sensor de micro-ondas projetado para fornecer informações quantitativas da precipitação sobre uma grande área sob o satélite, sendo o principal instrumento na obtenção das estimativas. Este sensor mede a intensidade da radiação em cinco frequências separadas: 10,7, 19,4, 21,3, 37, 85,5 GHz, contando com uma largura de 878 km de largura de faixa na superfície.

O VIRS detecta a radiação vinda da superfície em cinco bandas do espectro, variando do visível ao infravermelho, em uma região de 833 km de largura na

superfície. As informações obtidas são combinadas com os dados do PR e TMI, que são utilizados para delinear o perfil da precipitação.

O LIS detecta relâmpagos sobre a região tropical do globo, projetado com o objetivo de fornecer informações, com previsão de 30 segundos de ocorrência, para a emissão de alerta de tempestades severas. Os dados do LIS também podem ser utilizados com os dados de PR, TMI e VIRS para investigar a correlação entre a incidência global de relâmpago com chuvas e outras propriedades de tempestade.

O CERES foi projetado para estudar a troca de energia entre o sol, a atmosfera, a superfície das nuvens e da Terra; no entanto, só funcionou de 1998 a 2000, disponibilizando, então, breves registros acerca destas informações. Na representação esquemática da figura 3 é possível observar os instrumentos a bordo do satélite com suas respectivas faixas de observação, para a altitude de 402 km.

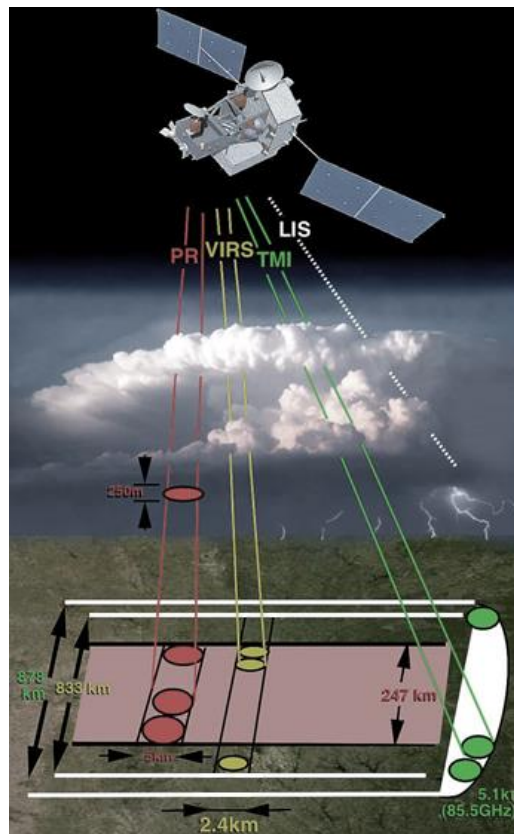


Figura 3 – Representação esquemática dos instrumentos a bordo do satélite TRMM, após 2001 para altitude de 402 km.

Fonte: Adaptado de NASA (2014b).

As grandezas primárias medidas pelos instrumentos TMI, PR e VIRS são, respectivamente, temperatura, potência e radiância, que são integrados através de diferentes algoritmos, permitindo obter os mais variados produtos. Estes produtos podem ser combinados com produtos de outros satélites, gerando as estimativas de precipitação, cuja resolução temporal e espacial depende do refinamento da estimativa (COLLISCHONN, 2006). Na figura 4 é apresentado o esquema de processamento de dados para obtenção das estimativas de precipitação.

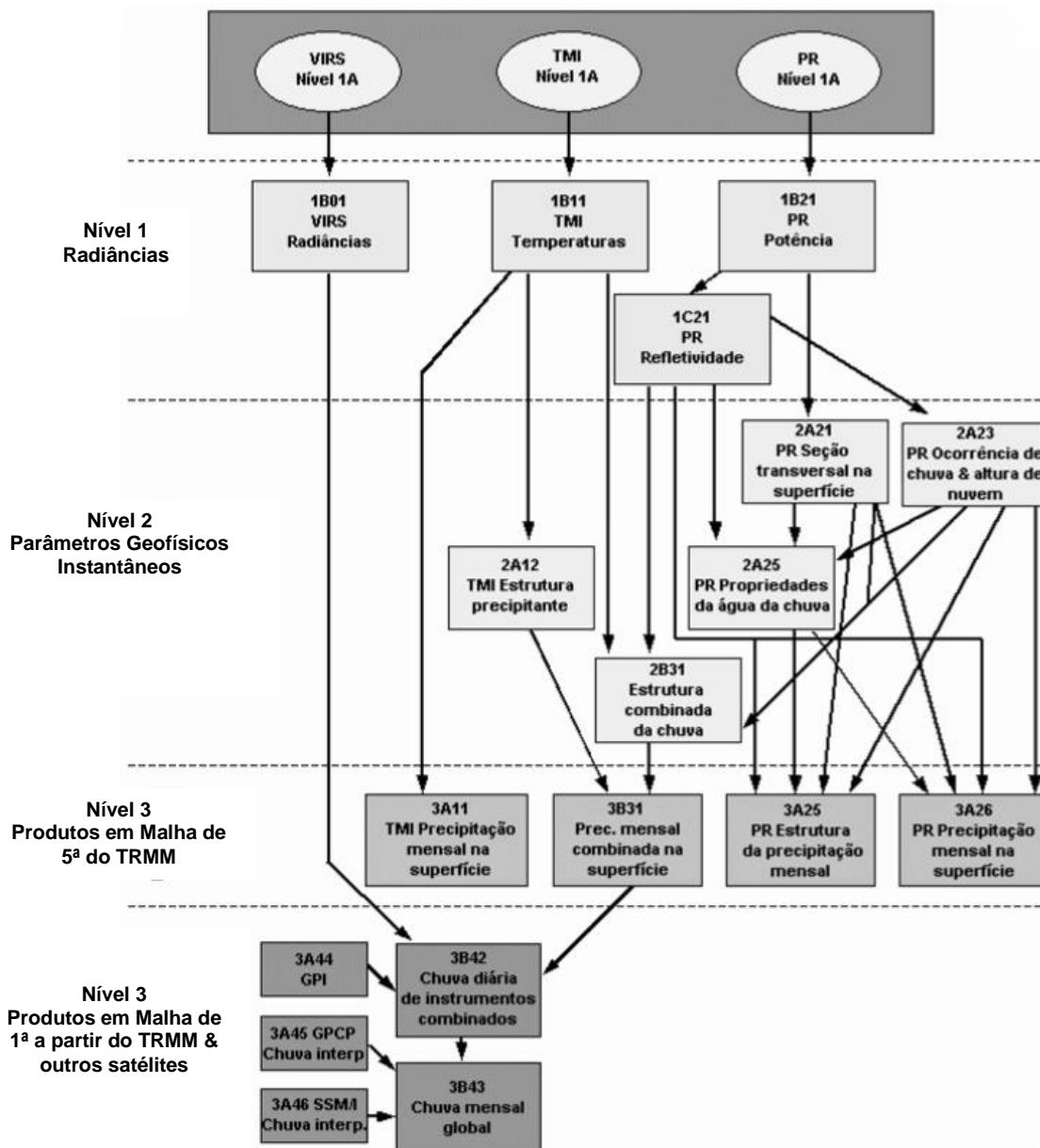


Figura 4 – Fluxograma de dados para geração das estimativas de precipitação.

Fonte: Adaptado de NASDA (2001) apud Collischonn (2006).

Os produtos do TRMM que são derivados de combinações de informações resultantes de diferentes sensores e satélite são dados por meio da análise denominada TMPA (*TRMM's Multi-satellite Precipitation Analysis*). Esta análise é constituída por uma série de algoritmos calibrados que permitem estimar a precipitação por múltiplos satélites, onde os maiores pesos são dados, logicamente, para os produtos do satélite TRMM. Na tabela 1 são apresentados os produtos derivados de múltiplas fontes TMPA, com suas respectivas descrições e período inicial de disponibilização de dados estimados de precipitação.

Tabela 1 – Produtos do satélite TRMM derivados de múltiplas fontes TMPA.

| Produto | Descrição | Data de início |
|------------------------|---|-----------------------|
| 3B40 RT (HQ) | Produto experimental com base em micro-ondas intermediária | Out/2008 |
| 3B41 RT | Produto experimental com base no infravermelho | Out/2008 |
| 3B42 | Produto da precipitação a cada 3 horas | Jan/1998 |
| 3B42 <i>derived</i> | Produto da precipitação diária acumulada entre 0 e 24 UTC | Jan/1998 |
| 3B42 RT | Produto experimental com combinação de múltiplos sensores, sem correção de pluviômetros | Out/2008 |
| 3B42 RT <i>derived</i> | Produto experimental da precipitação diária acumulada entre 0 e 24 UTC | Out/2008 |
| 3B43 | Produto da precipitação mensal | Jan/1998 |

Fonte: Adaptado de Fensterseifer (2013).

O produto 3B42, de interesse neste trabalho, está sendo executado na versão 7a, atualmente, onde foram incluídos e modificados alguns algoritmos visando estimativas mais fiéis de precipitação. Alguns autores compararam o desempenho do produto 3B42 versões 6 e 7, observando a maior eficiente deste último, podendo-se citar o trabalho de Zulkafli et al. (2014), que constataram que a versão 7 do 3B42 tem um viés significativamente menor, e uma melhor representação da distribuição da chuva. Os autores ainda testaram as estimativas num modelo hidrológico

desenvolvido pelos próprios autores, em uma sub-bacia Amazônica, localizado ao norte do Peru e sudeste do Equador, e observaram uma melhora no coeficiente de Nash-Sutcliffe quando utilizaram estimativas do produto 3B42 versão 7.

3.5 Modelos hidrológicos

3.5.1 Aspectos gerais

Modelo é definido por Tucci (2005) como sendo uma ferramenta que representa os diversos processos que ocorrem nos sistemas de forma simplificada. No âmbito de bacias hidrográficas, os modelos hidrológicos objetivam entender e representar o comportamento numa linguagem de fácil acesso.

Os modelos que simulam a transformação da chuva em vazão, caracterizam o comportamento hidrológico da bacia a partir de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros que estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais. Estes modelos apresentam resultados animadores acerca das representações do comportamento das bacias, tanto na simulação como na previsão de cenários hipotéticos para avaliação de impactos (MARINHO FILHO et al., 2012).

Lou (2010) elenca as principais aplicações dos modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão: análise de consistência e preenchimento de falhas, a partir da qual é possível estender a série de vazão com base na série de precipitação; a previsão de vazão, objetivando, por exemplo, o controle de cheias; previsão de cenários de planejamento, que possibilita estimar a vazão resultante para o cenário de uso e modificação da bacia. Sendo assim, o autor ressalta as diversas áreas abrangentes da modelagem hidrológica no âmbito da resolução de problemas ambientais.

3.5.2 Calibração e validação de modelos chuva-vazão

Uma das principais etapas a serem consideradas na modelagem hidrológica é a calibração do modelo a partir de informações já existentes, para que o hidrograma calculado seja reproduzido com boa precisão em relação ao hidrograma observado. A calibração é necessária porque alguns parâmetros representam uma abstração da realidade e por isso não podem ser medidos (TASSI et al., 2006).

A primeira técnica utilizada pelos hidrólogos para a determinação dos parâmetros, pela robustez e simplicidade, é o método da *tentativa e erro*, ou calibração manual. Esse método pode ser um processo muito lento, repetitivo e tedioso, especialmente quando há um grande número de parâmetros e o usuário é inexperiente (COLLISCHONN; TUCCI, 2003), pois este deve alterar os valores dos parâmetros em cada simulação, e deduzir a lógica pela qual os parâmetros deveriam ser ajustados para melhorar a representação dos dados observados.

Eckhardt et al. (2005) enfatizam ainda que este tipo de calibração é subjetivo e demorado, e que pode ser substituída pelo método automático, que torna tal processo mais rápido e eficiente. Para este método, foram desenvolvidos algoritmos de otimização, que determinam os valores “ótimos” dos parâmetros por meio de uma função objetivo, que mede a diferença numérica, ou seja, o erro, entre as séries de vazão calculada pelo modelo e a observada. A cada passo, o algoritmo calcula um novo valor da função objetivo, compara com o último valor calculado e segue na direção do valor ótimo para a função objetivo, quando então se verifica a convergência e encerra-se o processo iterativo. O processo termina ao ser encontrado um ponto ótimo para a função (COLLISCHONN; TUCCI, 2003).

Sendo assim, a função objetivo é uma medida de desempenho para o modelo utilizado. Quando se otimiza o valor de uma única função objetivo, o processo de calibração automática é denominado *monobjetivo*. No entanto, quando o valor é otimizado por meio de duas ou mais funções, a calibração é definida como *multiobjetivo* (BRAVO et al., 2007).

A etapa de validação do modelo consiste em verificar se os parâmetros encontrados na calibração representam satisfatoriamente as características da bacia. O procedimento usualmente empregado é dividir o período de análise em dois

subperíodos, sendo um de aproximadamente cinco sextos da série de dados disponíveis, usado para calibração, e o outro de um sexto para validação.

3.6 Modelo hidrológico IPH II

3.6.1 Descrição do modelo

O IPH II é um modelo hidrológico do tipo chuva-vazão, determinístico e concentrado, desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS). Segundo Germano et al. (1998) é um modelo parcimonioso, que pode ser utilizado em bacias de diferentes tamanhos e características. Bravo et al. (2006) desenvolveram um programa denominado WIN_IPH2, que é uma versão didática para *Windows*®, que dispõe do modelo IPH II para simulação de séries contínuas e eventos isolados. Atualmente o WIN_IPH2 está na sua segunda versão (WIN_IPH2_v2), denominado neste trabalho WIPH2, acopla dois métodos numéricos de otimização, permitindo a calibração automática monobjetivo e multiobjetivo.

Para a calibração automática monobjetivo deste modelo, utiliza-se o algoritmo SCE-UA (Shuffled Complex Evolution, University of Arizona), desenvolvido por Duan et al. (1992), citado repetidamente na literatura devido aos confiáveis e eficientes resultados na calibração automática de modelos hidrológicos.

A calibração automática multiobjetiva utiliza o algoritmo MOCOM-UA (Multi-Objective Complex Evolution Method, University of Arizona), criado por YAPO et al., (1998), que combina conceitos de estratégia de busca do método Simplex de Nelder e Mead, com conceitos de busca aleatória supervisionada, evolução competitiva, mistura complexa e ordenamento de Pareto.

No WIPH2 estão disponíveis sete funções objetivo, apresentadas na tabela 2, que podem ser utilizadas para a calibração do modelo. Algumas funções tendem a valorizar os períodos de cheia, em detrimento aos períodos de estiagem, e, conseqüentemente, o ajuste dos hidrogramas pode não ser bom para as vazões de

base. O contrário também é válido, quando a função objetivo tende a valorizar as vazões mínimas.

Neste sentido, Tassi et al. (2006) apresentaram a influência da escolha das funções objetivo nos resultados da calibração automática multiobjetivo do modelo IPH II, e concluíram que a escolha das funções objetivo foi determinante na qualidade do ajuste obtido.

Tabela 2 – Funções objetivo disponíveis no WIPH2.

| Nome | Equação |
|-------------------------------------|---|
| Coefficiente de Kling-Gupta | $FO1 = 1 - \sqrt{(R - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$ |
| Desvio absoluto médio | $FO2 = \frac{\sum_{i=1}^{NT} Q_{oi} - Q_{ci} }{NT}$ |
| Desvio quadrado relativo médio | $FO3 = \frac{\sum_{i=1}^{NT} (Q_{oi} - Q_{ci})^2}{NT \cdot Q_{oi}}$ |
| Desvio padrão do inverso das vazões | $FO4 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NT} \left(\frac{1}{Q_{oi}} - \frac{1}{Q_{ci}}\right)^2}{NT}}$ |
| Coefficiente de Nash-Sutcliffe | $FO5 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{NT} (Q_{oi} - Q_{ci})^2}{\sum_{i=1}^{NT} (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2}$ |
| Desvio relativo médio | $FO6 = \frac{\sum_{i=1}^{NT} \frac{ Q_{oi} - Q_{ci} }{Q_{oi}}}{NT}$ |
| Erro de Volume | $FO7 = \frac{\sum_{i=1}^{NT} Q_{ci} - \sum_{i=1}^{NT} Q_{oi}}{\sum_{i=1}^{NT} Q_{oi}} \times 100$ |

Sendo: R o coeficiente de correlação de Pearson; α a razão entre o desvio padrão das vazões calculadas e observadas; β a razão entre as vazões médias calculadas e observadas); Q_{oi} o valor da vazão observada no intervalo de tempo i ; Q_{ci} o valor da vazão calculado no intervalo de tempo i ; NT o número de registros (igual ao número de intervalos de tempo da simulação) e \bar{Q}_o a vazão média da série observada.

Fonte: Adaptado de Bravo et al. (2006).

Os coeficientes de Kling-Gupta (KG) e Nash-Sutcliffe (NS) são adimensionais e variam de $-\infty$ a 1, sendo o coeficiente de 1 o correspondente a uma modelagem perfeita, onde as vazões calculadas pelo modelo são justamente os valores observados (ZÚÑIGA et al., 2012). Essencialmente, quanto mais próximo de 1, mais eficiente é o modelo e melhor é a simulação das vazões. Collischonn (2006) cita que um NS inferior a 0,5 não apresenta resultados confiáveis.

O erro de volume, como o próprio nome indica, é o erro entre os volumes calculados e observados e quando mais próximo de zero mais eficiente está sendo a simulação das vazões. O desvio absoluto médio e o desvio quadrado absoluto médio são dados em $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$; o desvio padrão do inverso das vazões é dado em $1/(\text{m}^3.\text{s}^{-1})$ e; o desvio relativo médio é obtido em porcentagem de forma decimal. Como desvio padrão é uma medida de dispersão, quando menor o resultado das funções objetivo baseados nos desvios das vazões observadas e calculadas, mais eficiente está sendo a simulação.

O modelo IPH II se baseia nos seguintes algoritmos: perdas através da evaporação e interceptação; separação de escoamentos; propagação dos escoamentos superficial e subterrâneo. Estes parâmetros e algoritmos são apresentados conforme descreve Bravo et al. (2006).

Os parâmetros que compõe o modelo são:

I_0 – Capacidade de infiltração inicial ($\text{mm}.\Delta t^{-1}$);

I_b – Capacidade de infiltração mínima ($\text{mm}.\Delta t^{-1}$);

h – Parâmetro de decaimento da infiltração no solo (adimensional);

K_s – Parâmetro de propagação do escoamento superficial (Δt);

K_{sub} – Parâmetro de propagação do escoamento subterrâneo (Δt);

R_{max} – Capacidade máxima do reservatório de interceptação (mm);

Alfa – Parâmetro que afeta a separação do escoamento quando a equação de Horton não pode ser aplicada (adimensional).

Os parâmetros I_0 , I_b e h são característicos da equação de infiltração de Horton e Berthelot, sendo utilizados pelo algoritmo de separação do escoamento (TUCCI, 2005). O parâmetro de decaimento, h , com valor positivo menor do que um, é relacionado ao tipo de solo, e parâmetro R_{max} representa a capacidade de

armazenamento máximo em um reservatório hipotético de interceptação. (BRAVO et al., 2006).

O parâmetro Alfa participa do algoritmo de separação do escoamento quando a precipitação é menor que a capacidade de infiltração, no caso da simulação de séries contínuas de longo período (BRAVO et al., 2007). O parâmetro afeta, nestes casos, as proporções de precipitação que escoam superficialmente, as quais são menores à medida que o Alfa é maior (SILVA et al., 2013).

3.6.2 Algoritmo de perdas por evaporação e interceptação

Parte da precipitação que ocorre é perdida por evaporação e interceptação antes atingir a superfície do solo. A precipitação que é interceptada pela vegetação e depressões do solo é modelada por um reservatório, que tem a capacidade máxima apresentada pelo parâmetro R_{max} , com uma variável de estado R_t , conforme observado na figura 5.

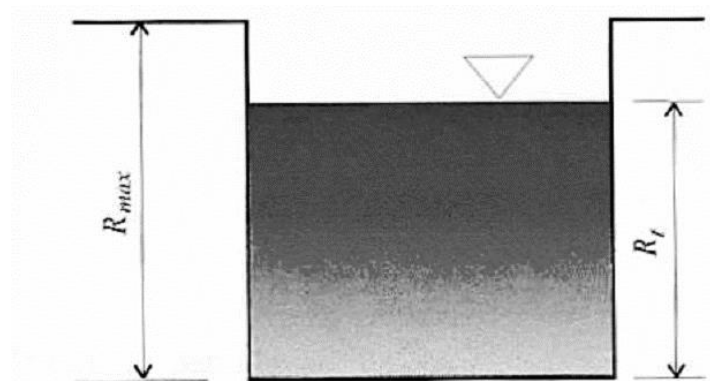


Figura 5 – Reservatório de interceptação.

Fonte: Adaptado de Tucci (2005).

Quando a precipitação não é suficiente para atender à evapotranspiração potencial, utiliza-se então o reservatório de interceptação. Se este reservatório

estiver em seu limite mínimo, ou não for capaz de atender totalmente a evapotranspiração potencial, esta passa a ser atendida pela água contida no solo, de acordo com seu conteúdo de umidade, através da relação linear apresentada por meio da equação 1.

$$E_t = \frac{EP_t \cdot S_t}{S_{max}} , \quad (1)$$

sendo E_t a evapotranspiração do tempo t , EP_t a evapotranspiração potencial, S_t o estado de umidade da camada superior do solo e S_{max} a capacidade máxima de umidade da camada superior do solo.

Quando a precipitação é maior que a demanda de evapotranspiração potencial, atendendo-a por completo, inicia-se a interceptação até preencher toda a capacidade do reservatório R_{max} . A precipitação restante é então utilizada como entrada no algoritmo de separação do escoamento.

3.6.3 Algoritmo de separação dos escoamentos

Após preencher o reservatório de perdas, o que resulta deste algoritmo pode infiltrar no solo e percolar, ou não, para o aquífero, ou gerar escoamento superficial. A parcela de água que precipita sobre áreas impermeáveis gera apenas escoamento superficial, sem que ocorra infiltração (BRAVO et. al., 2007).

O algoritmo de separação baseia-se no uso da equação da continuidade (Equação 2), aplicada para descrever o processo que ocorre na camada superficial do solo, em combinação com a equação de infiltração de Horton (Equação 3) e com uma equação empírica para a percolação (Equação 4).

$$\frac{dS}{dt} = I - T , \quad (2)$$

sendo I a infiltração e T a percolação.

$$I_t = I_b + (I_0 - I_b)h^t , \quad (3)$$

sendo I_t a capacidade de infiltração no tempo, I_b a capacidade de infiltração quando o solo está saturado, I_0 a capacidade de infiltração no solo quando a umidade é S_0 e h é igual a e^{-K} , sendo K é um parâmetro empírico relacionado ao tipo de solo. I_0 , I_b e h são os parâmetros do modelo.

$$T_t = I_b(1 - h^t) , \quad (4)$$

sendo T_t a percolação no tempo t .

Substituindo a equação 2 pelas equações 3 e 4, obtém-se a equação 5.

$$S = S_0 + \frac{I_0}{\ln h} (h^t - 1) , \quad (5)$$

sendo S_0 o estado da umidade do solo quando se inicia a percolação e I_0 a capacidade de infiltração correspondente. No modelo IPH II foi adotado S_0 igual a zero (BRAVO et al., 2006).

Isolando o termo h^t nas equações de infiltração e de percolação, 3 e 4 respectivamente, resultam nas equação 6 e 7, que relacionam o armazenamento, ou seja, o estado de umidade do solo, com a infiltração e a percolação.

$$S_t = a_i + b_i \cdot I_t , \quad (6)$$

$$S_t = a_t + b_t \cdot T_t , \quad (7)$$

sendo:

$$a_i = \frac{(-I_0^2)}{[\ln h \cdot (I_0 - I_b)]} , \quad (8)$$

$$b_i = \frac{I_0}{[\ln h \cdot (I_0 - I_b)]} , \quad (9)$$

$$a_t = 0, \quad (10)$$

$$b_t = \frac{(-I_0)}{(\ln h \cdot I_b)} \quad . \quad (11)$$

Podem ocorrer duas situações no cálculo dos volumes superficiais e percolados. Na primeira situação a precipitação que chega a este ponto é ser maior que a capacidade de infiltração, e nesse caso a equação de Horton pode ser utilizada, pois há água disponível na superfície para ser infiltrada. Sendo assim, volume infiltrado (V_i), escoado superficialmente (V_e) e percolado (V_p) são dados pelas equações 12, 13 e 14, respectivamente, e as variáveis utilizadas em cada equação foram anteriormente descritas.

$$V_i = I_b \cdot \Delta t - (I_t - I_b) \cdot \frac{(h^{\Delta t} - 1)}{\ln h} \quad , \quad (12)$$

$$V_e = P_t \cdot \Delta t - V_i \quad , \quad (13)$$

$$V_p = S_t - S_{t+1} + V_i \quad . \quad (14)$$

Numa segunda situação, onde a precipitação é menor que a capacidade de infiltração, não é impossível fazer uso da equação de Horton. Neste caso, podem ainda ocorrer duas alternativas: a precipitação sendo menor que a infiltração ao longo de todo o tempo; e a precipitação sendo menor que a infiltração inicialmente, e posteriormente, no próximo intervalo, a precipitação passa a ser maior que a infiltração, já que esta decai conforme o solo vai atingindo sua capacidade de campo e se satura.

Se a precipitação (P_t) é menor que a capacidade de infiltração (I_t) e a P_{t+1} é menor que a I_{t+1} , o algoritmo de separação de escoamento do modelo IPH II considera que todo o volume infiltra, e assim, a infiltração é substituída pela precipitação na equação de continuidade, substituindo a percolação (T) em função de S_t (Equação 7), e resolvendo a equação diferencial para o intervalo $t, t+1$, resulta na equação 15.

$$S_{t+1} = S_t \cdot e^{\frac{-\Delta t}{bt}} + P_t \cdot bt \cdot \left(1 - e^{\frac{-\Delta t}{bt}}\right) \quad , \quad (15)$$

sendo P_t dado em mm. Δt^{-1} .

Se $I_{t+1} > P_{t+1}$ não haverá escoamento superficial e o $V_e = 0$, enquanto o V_p é determinado pela equação 14.

Quando se utiliza o modelo em séries contínuas de eventos, há uma modificação do método original, pois as variáveis apresentam valores médios para a capacidade de infiltração, entretanto em alguns setores da bacia pode haver escoamento, mesmo em condições de $P > I$, devido a variabilidade de I na área. Para considerar esse fato, foi inserida a equação 16.

$$Cr_t = \frac{\left(\frac{P_t}{I_t}\right)}{\left(\frac{P_t}{I_t} + \text{alfa}\right)}, \quad (16)$$

sendo Cr um coeficiente que representa a porcentagem de precipitação que escoam superficialmente e alfa é um parâmetro do modelo. E finalmente, o volume de escoamento superficial é dado pela equação 17.

$$V_e = P_t \cdot Cr_t . \quad (17)$$

Se a precipitação (P_t) é menor que a capacidade de infiltração (I_t) e a P_{t+1} é maior que a I_{t+1} , após o cálculo da capacidade de infiltração verifica-se que dentro do intervalo, a curva de infiltração cruza a da precipitação, criando duas situações distintas. A figura 6 será utilizada para exemplificar as condições existentes na definição do algoritmo de infiltração.

Para encontrar o ponto x da figura 6 divide-se o intervalo em dois, onde no primeiro, a equação de continuidade tem como entrada toda a parcela de precipitação que chega a este ponto (Equação 15). Nesta equação o intervalo de tempo é Δt_x . No ponto x , S_x é determinado considerando $I = P$, através da equação 6. O intervalo de tempo Δt é obtido da equação 3.15, resultando na equação 18.

$$\Delta_{tx} = \frac{2 \cdot b_t \cdot (S_x - S_t)}{(2 \cdot b_t \cdot P - S_x - S_t)} . \quad (18)$$

Conhecidos os intervalos $[0, \Delta t_x]$ e $[\Delta t_x, \Delta t]$, o primeiro é tratado como o caso 2 e o segundo como o caso 1.

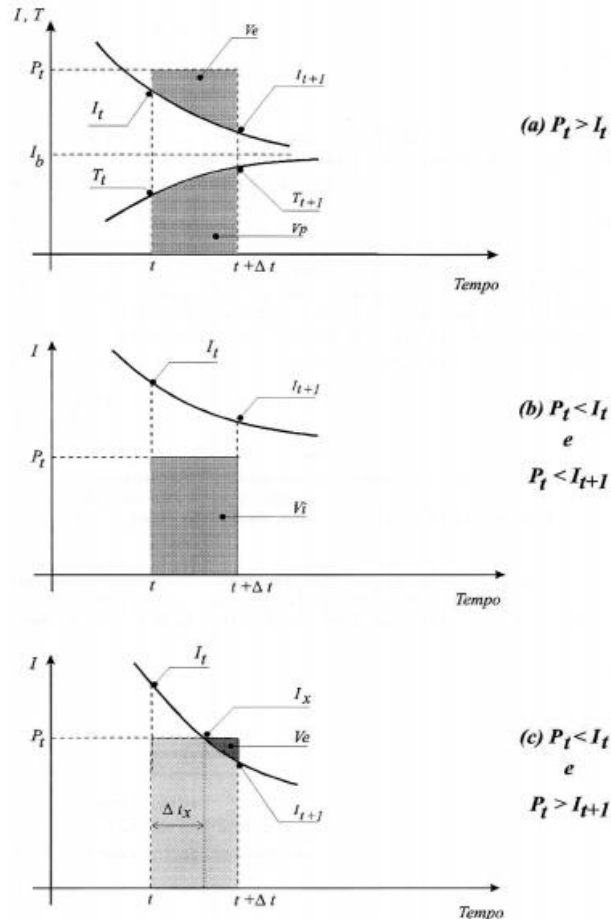


Figura 6 – Condições existentes na definição do algoritmo de infiltração.

Fonte: Adaptado de Tucci (2005).

3.6.4 Propagação superficial e subterrânea

Para calcular o escoamento superficial é utilizado o método de Clark, que é uma combinação do histograma tempo-área (HTA), que representa o efeito de translação da chuva sobre a superfície da bacia, com um reservatório linear simples (RLS), que representa os efeitos de armazenamento das partículas de água no percurso até a seção de controle da bacia (Figura 7).

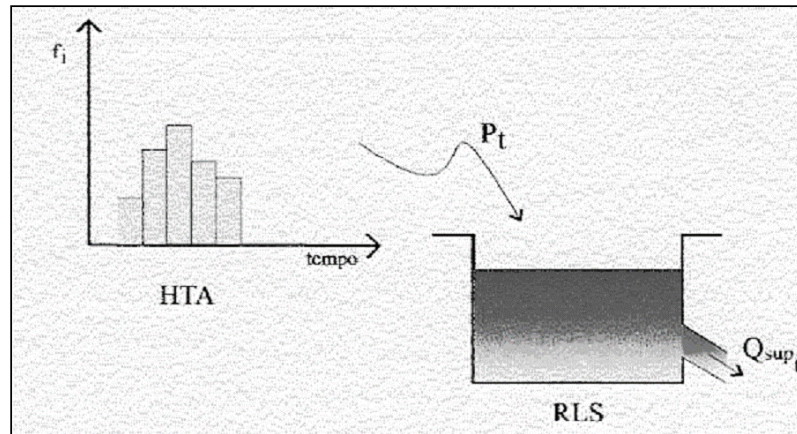


Figura 7 – Método de Clark.

Fonte: Adaptado de Mine (1998).

O HTA pode ser determinado através do conhecimento detalhado da bacia hidrográfica, para o qual é necessário estimar o tempo de concentração e a posição das isócronas com igual tempo de traslado até a seção de controle. Quando não se têm informações suficientes, a determinação do HTA pode ser substituída, sem muito erro, por um histograma sintético que calcula o tempo de percurso em função da distância do ponto em relação à seção principal.

No modelo, a representação de HTA é dada pelas equações 19 e 20, que relacionam a área acumulada de contribuição com o tempo de percurso.

$$A_c = a \cdot T^n, \quad 0 < T < 1/2 \quad (19)$$

$$A_c = 1 - a(1 - T)^n, \quad 1/2 < T < 1 \quad (20)$$

$$a = (0,5)^{1-n} \quad (21)$$

sendo A_c a área acumulada expressa relativamente à área total, T o tempo em unidade do tempo de concentração t_c , n o coeficiente que varia em função da forma da bacia, podendo ser 1, 1,5 e 2, quando as bacias tem formatos próximos à retângulos, círculos ovais e losangos, respectivamente.

Cada lâmina de chuva efetiva é distribuída pelo histograma tempo-área e filtrada pelo reservatório linear simples, onde o escoamento superficial se dá, então, pela equação 22.

$$Q_{sup} = Q_{sup_{t-1}} \cdot e^{\frac{-\Delta t}{K_{sup}}} + P_t \left(1 - e^{\frac{-\Delta t}{K_{sup}}} \right), \quad (22)$$

sendo Q_{sup_t} a vazão superficial no instante t, K_{sup} o tempo médio de esvaziamento do reservatório (parâmetro do modelo), e P_t a precipitação efetiva no tempo t.

A propagação do escoamento subterrâneo é calculada pela equação 22, substituindo K_{sup} por K_{sub} , e a variável P_t por V_p , pois o volume percolado é a entrada para o aquífero, conforme equação 23.

$$Q_{sub} = Q_{sub_{t-1}} \cdot e^{\frac{-\Delta t}{K_{sub}}} + V_p \left(1 - e^{\frac{-\Delta t}{K_{sub}}} \right), \quad (23)$$

sendo Q_{sub} a vazão subterrânea no instante t; K_{sub} o tempo médio de esvaziamento do reservatório subterrâneo (parâmetro do modelo) e V_p o volume percolado.

3.7 Qualidade das estimativas de precipitação obtidas por satélite e uso em modelos hidrológicos

Diversos estudos vêm sendo realizados, em diferentes regiões, buscando comparar informações de precipitação obtidas em superfície ou por radares com as estimativas dadas por satélites, porém, poucos testaram seu desempenho em modelos hidrológicos. A seguir serão apresentados alguns artigos relacionados à qualidade dos dados estimados por satélite, quando comparadas com precipitação observada em superfície, além de uma revisão de trabalhos que se dedicaram às modelagens hidrológicas com estas estimativas como informação de entrada.

Um dos primeiros trabalhos a utilizar técnicas de indexação de nuvens para estimativas de precipitação data da década de 1970, apresentando metodologia simples, desenvolvida por Barrett (1970). Neste trabalho, o autor assumia uma taxa

de precipitação para cada tipo de nuvem, objetivando estimar a precipitação mensal sobre a Austrália e áreas adjacentes. Como as imagens não eram digitais, os resultados apresentaram pouca acurácia.

Desde então, com o desenvolvimento dos computadores e de técnicas de processamento de imagens, mais estudos se dedicaram ao uso de sensoriamento remoto para obtenção de estimativas de variáveis hidrológicas. Dentre os artigos mais atuais, que buscam relatar a qualidade das informações estimadas por satélite, pode-se citar o trabalho desenvolvido por Nobrega et al. (2008a). Os autores realizaram uma análise estatística comparativa entre dados de precipitação observados e dados de precipitação estimados pelo satélite TRMM, utilizando dados de quatro estações meteorológicas e 6 pluviômetros localizados na bacia do rio Jamari, no estado de Rondônia. Os resultados indicam que o TRMM se correlaciona melhor com uma rede mais densa de pluviômetro, se mostrando praticamente idênticos quando comparado os dados acumulados ao longo do período estudado. O satélite também foi hábil ao capturar a variabilidade sazonal da precipitação sobre a bacia, indicando que os resultados foram satisfatórios.

Leivas et al. (2012) avaliaram o comportamento do Índice de Vegetação Padronizado (IVP) para o monitoramento da seca no nordeste brasileiro, subsidiando os resultados com dados de precipitação obtidos do satélite TRMM. A intensa seca que ocorreu em 2012 apresentou IVP muito abaixo do normal, compatível com o baixo índice pluviométrico estimado pelo satélite para a região.

No Centro-Oeste do Brasil, Danelichen et al. (2013) avaliaram o desempenho do satélite TRMM na estimativa da precipitação, comparado com séries de precipitação obtidas pelo Instituto de Controle de Espaço Aéreo (ICEA) do Comando da Força Aérea. Como resultado encontraram uma alta correlação, de 88%, com a série medida e alto coeficiente de Willmott (0,92). No entanto, observaram que o satélite superestimou a precipitação anual entre 0,6 e 37,4%, com maior superestimativa na estação seca.

Numa região montanhosa de Nepal, Krakauer et al. (2013) avaliaram estimativas mensais de precipitação obtidas por quatro produtos de estimativas por sensoriamento remoto, sendo eles o 3B43 do satélite TRMM, o GSMaP (*Global Satellite Mapping of Precipitation*), o CMORPH e o PERSIANN, comparando-as com medições convencionais em superfície. As estimativas do produto 3B43 do satélite TRMM se sobressaíram em relação aos demais produtos dos satélites,

apresentando maior coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (0,49) quando comparadas com dados de estações observadas.

Clarke e Buarque (2013) exploraram a combinação de dois produtos de chuva por satélite, CMORPH e o 3B42 versão 6 do TRMM, comparando os resultados com informações derivadas de pluviômetros. A análise foi realizada em escala anual, por meio de uma análise multivariada e modelos geoestatísticos paramétricos, sobre a bacia do Rio Tocantins. Os resultados mostraram que a combinação de ambas as fontes por sensoriamento pode ser preditora em locais onde não se têm dados observados.

Woldemeskel et al. (2013) exploraram um método de combinação entre dados de precipitação de pluviômetros e estimados pelo produto 3B42 do satélite TRMM, em escala mensal para as condições australianas. A técnica de combinação foi baseada no método de interpolação ponderada pela distância, e os resultados mostraram que a técnica de combinação melhorou a estimativa da precipitação espacializada, sobre algumas regiões da Austrália, especialmente em locais onde a rede de pluviômetros é escassa.

A bacia transfronteiriça do Rio Brahmaputra se estende por quatro países: China, Índia, Butão e Bangladesh e é caracterizada por dados escassos de precipitação. Esta bacia foi alvo de estudo de Bajracharya et al. (2014a), que avaliaram as estimativas de cinco produtos de estimativas por sensoriamento remoto, sendo eles o RFE (*Rainfall Estimate*) 2.0, Modified-RFE2.0, CMORPH, GSMaP e o 3B42 do satélite TRMM. Foram comparadas as estimativas obtidas em diferentes resoluções temporais (diárias, mensais, decadais e sazonais) com dados de pluviômetros observado entre 2004 e 2006. Todos eles detectaram chuvas fortes, moderada e baixa, mas subestimaram significativamente as chuvas de maior magnitude, especialmente nas áreas onde predominam eventos orográficos. No geral, Modified-RFE 2.0 teve o melhor desempenho, seguido pelo 3B42 do TRMM. O estudo conclui que existe um uso potencial de precipitação por satélite em regiões caracterizadas por escassez de informações pluviométricas.

Em um estudo recente, Jiménez e Collischonn (2015) propuseram um novo método de interpolação (CHUVSAT) utilizando dados de chuva medidos por pluviômetros e estimados por satélite em tempo quase real (TRMM-RT), em escala temporal diária. Os resultados do método de interpolação foram avaliados em termos de simulação de vazão, utilizando do modelo hidrológico MGB-IPH, comparando as

séries temporais de vazões calculadas com observadas em diferentes seções de rios da bacia do Rio Tocantins. Como resultado, os autores notaram que a combinação entre os dados precipitação estimados por satélite e pluviômetros permitiu criar um conjunto de dados de boa qualidade, que obteve resultados superiores na simulação da vazão quando comparados com informações apenas de pluviômetros. Esse resultado foi mais evidente para bacias com área de drenagem da ordem de 5.000 km². Para bacias maiores os resultados do CHUVSAT foram semelhantes aos obtidos utilizando apenas os dados de pluviômetros, enquanto os resultados utilizando dados de satélite foram inferiores. Os autores concluíram que a combinação de dados de satélite e pluviômetros tem alto potencial para aplicações hidrológicas, com ênfase na previsão de vazões em rios de grande porte.

Se tratando de modelagem hidrológica, Fekete et al. (2004) fizeram um estudo com dados mensais, testando seis diferentes conjuntos de dados de precipitação em um modelo simples de balanço hídrico global, que calcula a vazão média de longo período através da diferença entre precipitação e evapotranspiração. Foram utilizados dados de sensores remotos, estações pluviométricas e de reanálises de precisão meteorológica, dentre eles dados do satélite TRMM. Os autores obtiveram resultados muito similares entre os diversos conjuntos de dados, mostrando que as estimativas dos satélites podem ser dados relativamente confiáveis. No entanto, é importante ressaltar que o modelo utilizado é excessivamente simplificado e feito em caráter global, não considerando uma bacia hidrográfica específica.

No trabalho desenvolvido por Collischonn (2006) foi avaliado a potencialidade de uso das estimativas de precipitação obtidas pelo satélite TRMM como dado de entrada no modelo hidrológico distribuído MGB-IPH. Foram utilizadas, para a modelagem, duas bacias hidrográficas com contraste de monitoramento, sendo uma caracterizada pela boa cobertura de rede pluviométrica e a outra com baixa densidade de pluviômetros distribuídos pela área. Os resultados foram analisados em termos de simulação de vazão, considerando o desempenho do modelo para três arquivos de entrada de dados pluviométricos, testados separadamente, que são: informações de pluviômetros, informações do satélite TRMM e informações integradas utilizando dados de pluviômetros com base nas estimativas do satélite. A integração entre pluviômetros e satélites não apresentou resultados satisfatórios a ponto de ser justificado seu uso, devido à complexidade de obtenção da integração.

A simulação com informação de entrada do satélite TRMM teve desempenho minimamente inferior ao dos dados de pluviômetros, podendo ser considerado como uma fonte alternativa de informações pluviométricas em áreas com deficiente rede pluviométrica.

Devido, principalmente, ao difícil acesso em áreas de florestas, grande parte da bacia Amazônica é caracterizada por informações escassas de precipitação. Para contrapor tal problema, Nóbrega et al. (2008b) analisaram a utilização de estimativas de precipitação geradas pelo produto 3B42 do satélite TRMM como variável de entrada no modelo hidrológico semidistribuído SLURP (*Semi-distributed Land Use-based Runoff Processes*), na bacia do Rio Jamari, localizado em Rondônia. Os resultados indicaram uma boa adequação do modelo ao simular a vazão, com coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,82, concluindo que o método de calibração do modelo, utilizando dados do satélite, mostrou-se hábil e com bons resultados.

Bajracharya et al. (2014b) analisou o modelo de previsão de vazões GeoSFM (*Geospatial Stream Flow Model*) utilizando estimativas de precipitação de satélite, obtidos do produto RFE 2.0 da NOAA, buscando comparar a simulação da vazão gerada pelas estimativas com a vazão observada na bacia. Quando utilizaram apenas as estimativas do satélite como informação de entrada obtiveram um fraco desempenho do modelo. Já quando se incorporou a espacialização das estimativas com as informações pontuais dos pluviômetros notaram grande melhora, com um coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,91. Deste modo, concluíram que as informações de precipitação estimadas por satélites podem ser consideradas na predição de inundação.

Diante da importância da calibração dos modelos e da dificuldade em obtenção das séries, com períodos considerados adequados e sem falhas, Matos et al. (2014) analisaram a extensão da série de chuva utilizada para calibração do modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), para a bacia do Zambeze, em Moçambique, de aproximadamente 1.400.000 km². Para isso, o autor utilizou estimativas de precipitação do satélite TRMM integradas às informações pontuais de pluviômetros espacializadas pela nova técnica de interpolação por memória orientada por padrões, ou do Inglês POM (*Pattern Oriented Memory*). Esta série estendida de precipitação foi comprada com uma série de período menor. O artigo evidencia as melhoras no desempenho do modelo quando se utiliza a integração

das estimativas do satélite com informações pontuais, que possibilitam uma maior série de informações de entrada.

Diante dos resultados dos trabalhos encontrados na literatura, verifica-se que, em muitos casos a utilização de estimativa de satélite produziu bons resultados para bacias específicas. No entanto, poucos trabalhos avaliaram a influência da dimensão da área de drenagem no resultado e estabeleceram um tamanho a partir da qual as estimativas podem ser utilizadas como alternativa às informações pluviométricas, uma vez que em grandes bacias, ou mesmo em nível global, os resultados são considerados satisfatórios.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo é descrita a metodologia aplicada à pesquisa, visando atingir os objetivos propostos.

4.1 Critérios utilizados para a escolha das bacias

Foram selecionadas quatro bacias hidrográficas com diferentes áreas de drenagem, sendo considerados alguns critérios, tais como:

- a) localizarem-se na região subtropical do Brasil, ao sul do trópico de capricórnio ($23^{\circ} 27'$ Sul), preferencialmente, no estado do Rio Grande do Sul, ou estarem parcialmente contidas nele. Este critério foi estabelecido pela possibilidade de haver divergência nas estimativas da precipitação obtidas pelo satélite TRMM, quando se trata de áreas localizadas em latitudes muito diferentes;
- b) apresentarem áreas adequadas para a modelagem utilizando o IPH II, em sua versão para *Windows*[®] (WIPH2), sendo cada bacia representativa de uma escala de área de drenagem;
- c) possuírem densidade e distribuição de pluviômetros suficientes pela área de drenagem, de forma a permitir a construção de diferentes cenários fictícios de rede pluviométrica, alterando-se a densidade e a distribuição dos pluviômetros pela área.

4.2 Cenários pluviométricos

Foram construídos diferentes cenários de rede pluviométrica em cada bacia hidrográfica, com o objetivo de observar o comportamento da vazão simulada no modelo WIPH2, à medida que se altera a quantidade e a distribuição dos

pluviômetros pela área de drenagem. Isto permite avaliar a influência desta resposta comparativamente ao resultado obtido com dados do TRMM.

Assim, para cada uma das quatro bacias escolhidas, foram gerados quatro cenários com diferentes quantidades de pluviômetros: (i) 100% do número de pluviômetros encontrados na bacia, denominado Cen Real; (ii) 75% do número total de pluviômetros – Cen 75%; (iii) 50% do número total pluviômetros – Cen 50% e; (iv) com 25% do número total de pluviômetros – Cen 25%.

As estações de monitoramento pluviométrico selecionadas para compor cada cenário foram sorteadas de maneira aleatória, com reposição entre cada cenário, seguindo uma distribuição normal, por meio de uma planilha eletrônica do Microsoft® Excel® (versão 2013). Esta função gerou valores distintos, compreendidos entre 0 e 1 para cada estação pluviométrica, sendo ordenados de maneira crescente na sequência. Posteriormente, selecionou-se apenas o número de estações correspondentes a percentagem daquele cenário, segundo o ordenamento do menor para a maior valor, tendo como base de cálculo o número real de pluviômetros. Este procedimento foi realizado independentemente para cada um dos três cenários, de cada uma das quatro bacias escolhidas.

Resultaram, portanto, 16 cenários a serem analisados, sendo 4 deles com a quantidade real de estações pluviométricas e 12 hipotéticos, nos quais se apresentaram diferentes condições de cobertura e distribuição de estações pluviométricas. Além destes cenários de monitoramento, ainda foram obtidas as estimativas de satélite para cada bacia escolhida (Cen TRMM).

4.3 Fontes de dados

As informações de entrada necessárias para calibração e validação do modelo WIPH2 são precipitação, vazão e evapotranspiração, dadas em termos médios espacializados sobre a bacia. Essas variáveis de entrada foram determinadas conforme a seguir descrito.

4.3.1 Precipitação estimada por satélite

Para a obtenção das estimativas de precipitação a partir de satélite, foi utilizado o produto 3B42 Versão 7 do satélite TRMM e de fontes auxiliares a bordo de outros satélites. Este produto foi escolhido por apresentar alta resolução espacial e temporal, além de fornecer estimativas mais confiáveis (CONTI, 2002; NICHOLSON et al., 2003; FEKETE et al., 2004; COLLISCHONN, 2006; COLLISCHONN et al., 2008; NÓBREGA et al., 2008a; ZULKAFI et al., 2014).

Estas estimativas foram obtidas a partir de imagens, contendo a grade de informação pluviométrica estimada para cada pixel, adquiridas gratuitamente através do endereço eletrônico <<http://mirador.gsfc.nasa.gov>>, em formato *.nc* (*NetCDF*). Como havia uma imagem para cada intervalo de tempo (3 horas) e o período de análise do trabalho foi compreendido entre 01 de janeiro de 1998 e 31 de julho de 2014, foi necessário o *download* de 48.448 imagens de 13,2 MB (*Megabytes*) cada uma.

4.3.2 Precipitação mensurada em solo e dados de vazão

Os dados de precipitação pontuais mensurados a partir do monitoramento de pluviômetros, foram obtidos na base de dados hidrológicos *HidroWeb* (ANA, 2015), mantidos pela Agência Nacional de Águas, e no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa – BDMEP (INMET, 2015) do Instituto Nacional de Meteorologia. Nestas bases de dados selecionaram-se as estações pluviométricas de interesse, juntamente com as estações fluviométricas localizadas nas seções de controle de cada bacia. Estas informações são diárias, compreendidas, também, para o período entre 01 de janeiro de 1998 e 31 de julho de 2014, totalizando 6.056 dias. A escolha deste período se deu devido à disponibilidade de dados históricos do satélite TRMM.

4.3.3 Evapotranspiração real

Os dados de evapotranspiração real foram estimados com base na metodologia apresentada por Doorrenbos e Pruit (1977), na qual a evapotranspiração potencial é estimada pela correção da evaporação do Tanque Classe A com um fator de tanque denominado K_p . Este fator de correção do tanque é determinado com base em tabelas que relacionam dados médios de velocidade do vento, umidade relativa do ar e informações acerca do ambiente no qual o Tanque Classe A está instalado, podendo variar de 0,55 a 0,85.

Allen et al. (1998) também citam que os valores apresentados para K_p muitas vezes precisam ser reduzidos ou acrescidos, de acordo com as características de cada área. Por exemplo, em locais onde o tanque é instalado próximo a culturas agrícolas, os coeficientes de tanque deverão ser aumentados em até 30% para climas secos ventosos e apenas um aumento de 5 a 10% são previstos para condições úmidas e de ventos fracos.

O material e a pintura do Tanque Classe A também podem influenciar o valor de K_p , assim como do nível da água no tanque, que deve ser mantido entre 5,0 e 7,5 cm da borda, não devendo ultrapassar 10 cm, pois isso poderia induzir erros de até 15% na leitura da evaporação (Allen et al., 1998). Portanto, as devidas correções às medições do Tanque Classe A devem ser aplicadas de forma a minimizar as incertezas nesta variável.

Com base nesta metodologia foram selecionadas estações pluviométricas, no bancos de dados *HidroWeb* e *BDMEP*, que continham informações de clima, mais especificamente de evaporação do Tanque Classe A, que se localizavam dentro ou no entorno das bacias. Porém, informações de evaporação são ainda mais escassas do que informações pluviométricas e nenhuma estação apresentava dados que compreendesse o período de estudo.

A alternativa adotada foi a obtenção do valor diário de evapotranspiração a partir da média de longo período da evaporação dos Tanques Classe A, corrigida com o K_p de cada bacia, determinado com auxílio do balanço hídrico.

Para isso, tabularam-se todos os dados disponíveis de evaporação do Tanque Classe A, de modo que se apresentassem em milímetros acumulados no mês. Fez-se, então, uma média da evaporação de longo período para cada mês, assim como

uma média anual, para cada estação utilizada. Posteriormente, foi obtido um único valor de evaporação para cada mês, a partir da média entre os valores encontrados para cada estação utilizada para a bacia. Analogamente, obteve-se um único valor de evaporação anual.

Após a obtenção do valor de evaporação média para cada mês e anual, estimou-se o K_p por meio do balanço hídrico da bacia, da seguinte maneira: estimou-se a precipitação média anual e a vazão média anual, a partir das quais obteve-se a evapotranspiração anual real da bacia; de posse deste valor foi estimado o K_p , com o auxílio da ferramenta *Solver* do Excel®, de tal forma que a multiplicação entre K_p e evaporação anual do Tanque Classe A resultasse em um valor igual à evapotranspiração real anual, obtida do balanço hídrico.

Com o fator de correção de tanque determinado, utilizou-se da equação 24 para corrigir a evaporação média mensal, estimando-se então a evapotranspiração real mensal. Este valor foi dividido pelo número de dias correspondente a cada mês, obtendo-se a evapotranspiração real diária da bacia, em milímetros (Equação 25). Desta maneira, a evapotranspiração real diária é a mesma para todos os dias de um mesmo mês. Estes valores de $ET_{real} (diária)$ foram utilizados como informação de entrada no WIPH2.

$$ET_{real} (mensal) = Evapo_{tanque} (mensal) \times K_p , \quad (24)$$

$$ET_{real} (diária) = \frac{ET (mensal)}{N^{\circ} \text{ de dias correspondente ao mês}} , \quad (25)$$

sendo $ET_{real} (mensal)$ a evapotranspiração real mensal; $Evapo_{tanque} (mensal)$ a evaporação mensal do tanque Classe A; K_p o fator de correção e transformação da evaporação para evapotranspiração real, com base no balanço hídrico; $ET_{real} (diária)$ a evapotranspiração real diária.

A metodologia para a obtenção dos dados de evapotranspiração real diária foi a mesma para todas as bacias hidrográficas, variando apenas o número de estações climatológicas, de acordo com a disponibilidade das mesmas sobre a área da bacia e seu entorno.

4.4 Precipitação média espacializada

As simulações no modelo WIPH2 foram realizadas de maneira independente, considerando cinco diferentes séries históricas de precipitação como informações de entrada, para cada bacia, conforme segue:

- a) precipitação média obtida por meio da interpolação de dados da quantidade e distribuição real de pluviômetros pela área (Cen Real);
- b) precipitação média obtida por meio da interpolação de dados do cenário com 75% dos pluviômetros (Cen 75%);
- c) precipitação média obtida por meio da interpolação de dados do cenário com 50% dos pluviômetros (Cen 50%);
- d) precipitação média obtida por meio da interpolação de dados do cenário com 25% dos pluviômetros (Cen 25%);
- e) precipitação média obtida pela média dos valores dos pixels do satélite TRMM, localizados sobre as bacias (Cen TRMM).

4.4.1 Interpolação dos dados de pluviômetros

Como o modelo WIPH2 é concentrado, ele requer informações médias sobre a bacia; assim, os dados de precipitação dos pluviômetros foram interpolados para grades regulares com resolução espacial de 1 km, ou aproximadamente 0,01°, por meio do método de interpolação do inverso do quadrado da distância, ou IDW, (Equações 25 e 26), escolhido devido aos bons resultados comumente apresentados em estudos hidrológicos, como cita Marcuzzo et al. (2011) dentre outros autores.

$$\hat{P} = \sum_{i=1}^N W_i \times P_i \quad e \quad (25)$$

$$W_i = \frac{D_i^{-2}}{\sum_{j=1}^N D_j^{-2}} \quad , \quad (26)$$

sendo \hat{P} a chuva interpolada na célula, P_i a precipitação no posto “i”, D_i a distância entre o centro da célula e o posto “i” e N o número de estações pluviométricas considerados.

Para realizar a interpolação foi utilizado o *software* IDRISI, que permitiu otimizar o processo, a partir de um *Script*, com rotinas geradas por meio de linguagem de programação em FORTRAN, já que o número de dias em análise tornava inviável o processamento manual.

Nesta rotina foram criadas 6.056 imagens (uma para cada dia da série) no formato *raster*, com o valor da precipitação observada em cada estação pluviométrica no dia correspondente. Ressalta-se que foram geradas 6.056 imagens para cada um dos quatro cenários de análise (Cen Real, Cen 75%, Cen 50% e Cen 25%), de cada uma das quatro bacias escolhidas, o que totaliza 96.896 imagens raster com o valor da precipitação observada em cada pluviômetro.

Na sequência, realizou-se o processo de interpolação com o interpolador IDW, em que eram geradas 12.112 imagens como produto desta interpolação (primeiro as imagens eram transformadas para formatos vetoriais, gerando novos 6.056 arquivos, e posteriormente interpoladas, gerando outras 6.056 imagens, sendo 1 para cada dia, já convertidas para o formato *raster*). O próximo passo era “recortar” apenas a área de interesse, desconsiderando os pixels que estavam fora da bacia (mais 6.056), e por fim, foi determinada a chuva média espacializada na área de cada bacia hidrográfica, por meio da média aritmética dos pixels da bacia. Como produto, foram obtidas quatro séries temporais com 6.056 dias, que representam a chuva média espacial de cada bacia hidrográfica, sendo uma para cada cenário de análise.

4.4.2 Integração dos dados do satélite para acumulado diário

Como as informações do satélite já se apresentavam espacializadas, dispensou-se, então, o processo de interpolação aplicado às informações mensuradas por pluviômetro. A metodologia para obtenção da chuva média estimada por satélite consta dos passos a seguir.

As imagens do TRMM obtidas foram processadas no *Software GrADS (Grid Analysis and Display System)*, que permitiu tirar a série histórica da grade de pixels sobre cada bacia por meio do *GrADS Script*. Estas séries foram obtidas no formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) e continham a intensidade da precipitação, em milímetros por hora (mm.h^{-1}), de cada pixel da grade em intervalos de 3 horas. Notou-se, nesta etapa do processamento dos dados, que as estimativas do satélite, além de serem disponibilizadas para downloads sem custo algum, ainda apresentam outra vantagem que é a baixa quantidade de falhas na série temporal dos pixels.

A determinação da chuva média espacial sobre a bacia foi realizada a partir de um *script* em linguagem Fortran, rodado com as séries temporais das grades sobre as bacias hidrográficas, que determinou a média aritmética dos valores dos pixels que estavam contidos sobre áreas das bacias, desconsiderando os demais. O arquivo de saída no formato ASCII contém o volume da precipitação média espacializada pela área, em mm.

No entanto, como a discretização temporal da chuva média é de 3 h, diferindo da informação diária dos pluviômetros, foi realizada a integração da precipitação prevista em 8 intervalos de tempo, de forma a permitir a comparação com os dados obtidos em solo.

Para encontrar a melhor integração dos intervalos, buscou-se aquela que apresentava maior coeficiente de correlação (R) com a informação de pluviômetro obtida para o cenário real. Na figura 8 é apresentado um esquema das integrações de 8 intervalos de tempo, com diferentes horários de início, a partir dos quais obteve-se o somatório dos volumes de chuva de cada intervalo. O intervalo selecionado foi aquele que melhor correspondeu ao dado diário das estimativas do satélite, baseando-se no R.

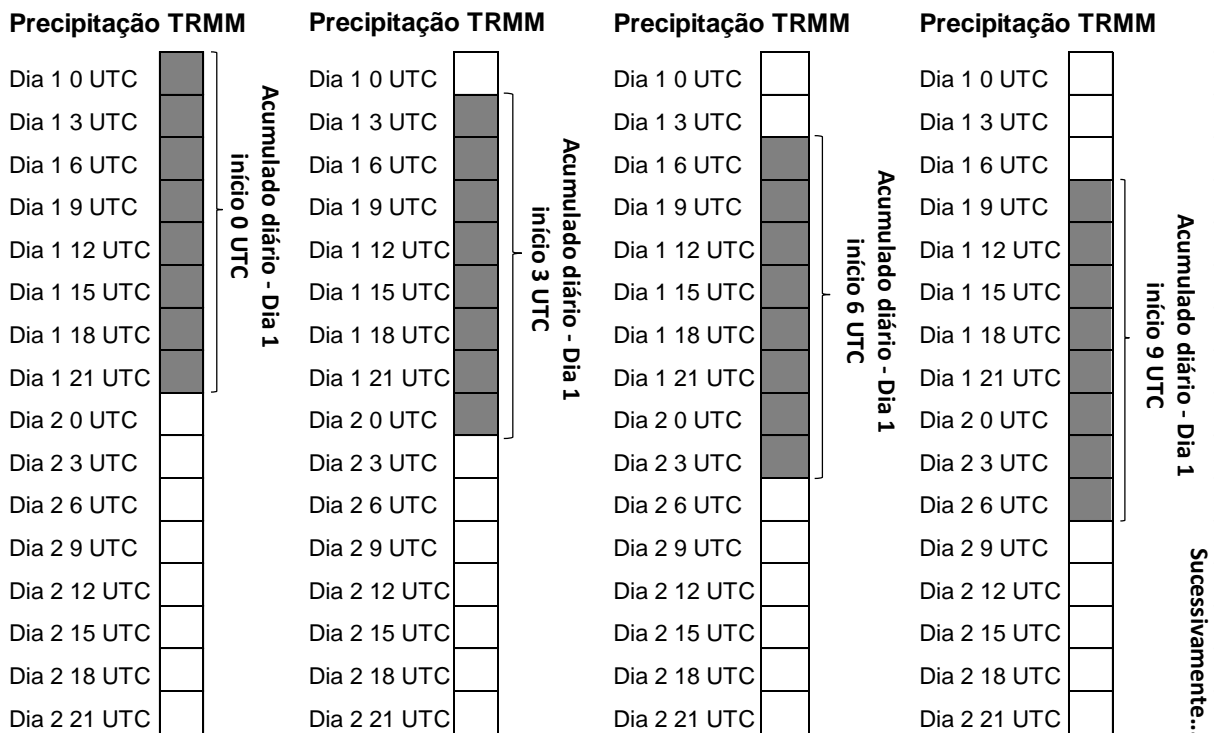


Figura 8 – Representação esquemática do processo de integração dos dados do satélite para obtenção de dados diários.

Fonte: Acervo próprio.

4.5 Testes estatísticos comparativos

Após a determinação das séries de chuva média para a condição real de pluviômetros, para os diferentes cenários de densidade e a partir da estimativa por satélite, foi realizada uma verificação do grau de semelhança entre elas. A chuva média obtida a partir da densidade e distribuição real dos pluviômetros (Cen Real) foi utilizada como referência nesta análise.

Foi realizada uma análise de dispersão entre as séries diárias, compreendendo todo o período de estudo, além do uso dos coeficientes de correlação (R), de determinação (R^2) e Erro de Volume (Errv).

O coeficiente de correlação (Equação 27) é capaz de representar as variações no tempo, entre as precipitações médias estimados por pluviômetros e pelo satélite. Este coeficiente varia entre -1 e 1, sendo 1 uma correlação perfeita.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{calc\ i} - \overline{P_{calc}}) \times (P_{100\%i} - \overline{P_{100\%}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{calc\ i} - \overline{P_{calc}})^2 \times \sum_{i=1}^n (P_{100\%i} - \overline{P_{100\%}})^2}}, \quad (27)$$

sendo $P_{calc\ i}$ o valor da precipitação média no tempo, obtido a partir dos cenários ou das estimativas do satélite TRMM no intervalo de tempo i ; $P_{100\%i}$ a precipitação média a partir de dados da condição real de pluviômetros no intervalo i . A barra superior indica a média dos valores e n é o número de dias de comparação, relativos ao período de janeiro de 1998 a julho de 2014.

O erro de volume total precipitado (Equação 28) apresenta o quão similar são os volumes médios precipitados, estimados por pluviômetros e pelo satélite. Como erro de volume é uma medida de dispersão, quando mais próximo de zero menor o erro.

$$Errv = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n (P_{calc\ i} - P_{100\%i})}{\sum_{j=1}^n P_{100\%i}}, \quad (28)$$

sendo $P_{calc\ i}$ o valor da precipitação média no tempo, obtido a partir dos cenários ou das estimativas do satélite TRMM no intervalo de tempo i ; $P_{100\%i}$ é a precipitação média a partir de dados da condição real de estações pluviométricas (100% dos pluviômetros) no intervalo i ; e n é o número de dias de comparação, relativos ao período de janeiro de 1998 a julho de 2014.

Há diversos outros testes¹ comparativos entre precipitação mensurada por pluviômetros e estimativas de satélites, no entanto, o objetivo do trabalho não foi analisar a existência dessas diferenças, ou mesmo quantificar esses desvios de volumes, pois sabe-se que eles existem e não seguem um padrão - ora superestimam, ora subestimam os volumes de precipitação, tanto para as máximas como para a estiagem. Em razão dos diversos trabalhos já realizados e aqueles que estão em execução acerca deste tema, optou-se por não fazer outros testes comparativos, além dos coeficientes de correlação e determinação e erro de volume

¹ Interpolação de dados de pluviômetros comparando a diferença relativa entre os pixels desta espacialização com os pixels estimados por satélite (COLLISCHONN et al., 2007; COLLISCHONN et al., 2008); comparando o valor mensurado por pluviômetro com o valor do pixel no qual o equipamento se encontra (FENSTERSEIFER, 2013); testes comparativos tanto para bacias hidrográficas (NOBREGA et al., 2008a; BAJRACHARYA et al., 2014a) como para regiões maiores (LEIVAS, et al., 2012; DANELICHEN et al., 2013; KRAKAUER et al., 2013); análise de qualidade do produto gerado também pela fusão entre as informações de pluviômetros e de satélite, enfim, inúmeros outros testes e análises podem ser realizados.

já citados. A estatística básica descritiva utilizada foi realizada em nível local de bacias com intuito de observar se a diferença entre as séries, em termos médios diários, também seria observada numa modelagem chuva-vazão concentrada e/ou se seriam minimizados ou maximizados.

4.6 Simulações com o modelo WIPH2

Do período de análise deste estudo (janeiro de 1998 a julho de 2014), foi submetido no modelo aquele período em que as séries de dados de vazão, precipitação obtida por pluviômetros e as próprias informações dos pixels do satélite se apresentaram com menor número de falhas. Para cada bacia foram analisados os períodos das séries de melhor qualidade dos dados hidrológicos, tanto para calibração como para a validação do modelo. Por isso, o período modelado não foi o mesmo dentre as bacias, entretanto, para uma mesma bacia o período foi o mesmo entre os cenários.

4.6.1 Calibração e validação do modelo

Para cada bacia, o WIPH2 foi calibrado considerando cinco arquivos de precipitação média diária separadamente: Cen Real, Cen 75%, Cen 50%, Cen 25% e Cen TRMM, totalizando 20 calibrações de parâmetros. As demais informações de entrada do modelo mantiveram-se as mesmas, como evapotranspiração e condições iniciais. Desta forma, o resultado do processo de calibração foi influenciado unicamente pela variável de entrada: precipitação.

Buscou-se a função objetivo, ou a combinação de duas funções, que produzisse o melhor ajuste do modelo, dentre aquelas disponíveis no WIPH2 (Tabela 2). Para isso, utilizou-se tanto da calibração automática monobjetivo como da multiobjetivo. Para a monobjetivo, considerou-se 20 complexos com 40 indivíduos, com número de gerações de 500, e para a multiobjetivo, 200 indivíduos na população. Estes valores foram adotados em função das limitações

computacionais. Além das funções disponíveis no WIPH2, externamente foi calculado o coeficiente de Correlação – R, conforme equação 27, porém com dados de vazões observadas e calculadas.

Os parâmetros calibráveis do modelo, conforme apresentados no tópico 3.6.1, são I_0 , I_b , h , K_s , K_{sub} , R_{max} e Alfa, e seus limites máximos e mínimos de calibração variaram conforme houve necessidade de mantê-los em faixas que sejam fisicamente reais para as condições locais.

Outra informação que o WIPH2 requer inicialmente é o Coeficiente de forma – n , do histograma tempo-área (HTA), utilizado para obtenção do escoamento superficial (descrito no tópico 3.6.4). Este coeficiente foi determinado em função da forma da bacia, o qual poderia ter o valor de 1, 1,5 e 2, se o formato da bacia tivesse próximo a um retângulo, círculo oval ou losango, respectivamente.

O tempo de concentração (T_c) foi determinado pela análise de hidrogramas, e correspondia o tempo entre o fim da precipitação (foi utilizada a precipitação média espacializada a partir de todos os pluviômetros disponíveis na área) e o ponto de inflexão do hidrograma, empregando o método da separação gráfica da declividade constante, conforme sugerido por Tucci (2013). Analisou-se entre 5 e 10 hidrogramas ao longo das séries de vazão, conforme possibilidade de visualização deste parâmetro, pois, muitos hidrogramas não apresentam o T_c com clareza devido à precipitação contínua mesmo com o hidrograma já em recessão. Fez-se uma média entre os valores de T_c obtidos, para cada uma das quatro bacias.

As condições iniciais de análise do modelo compreendem informações acerca da percolação e das vazões subterrânea e superficial, todas em $m^3.s^{-1}$. Estas informações foram estimadas a partir do valor da vazão observada no primeiro dia da série submetida à calibração e dos volumes precipitados na semana anterior e, de certa forma, foram calibrados (alterados manualmente) conforme produziam melhores/piores resultados no período inicial da simulação. Como o período inicial da simulação é, por vezes, considerado como o período de aquecimento do modelo, estes valores de percolação e vazões foram estimados apenas pela adequação visual da simulação, de forma gráfica.

A comparação entre as simulações resultantes das informações do TRMM e dos pluviômetros foi dada, primeiramente, pelo seu ajuste gráfico e, em termos quantitativos foram expressos pelos coeficientes de avaliação utilizados. Além da comparação entre as simulações dos hidrogramas observados e calculados,

também foi avaliada a simulação da curva de permanência, que é outro resultado fornecido pelo WIPH2.

Posteriormente à calibração, se realizou o processo de validação, no qual se verificou se os parâmetros que melhor simularam a vazão apresentavam resultados similares na validação, tanto para os hidrogramas como para as curvas de permanência. Tal como a calibração, a validação contou com 20 conjuntos de dados avaliados separadamente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização das bacias selecionadas

A partir dos critérios definidos para a escolha das bacias hidrográficas, foram selecionadas quatro bacias para análise, que têm como rios principais o Turvo, Ijuí, Jacuí e Alto Uruguai. As bacias dos rios Turvo e Ijuí estão localizadas na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul (RS), a bacia do Rio Jacuí na região central deste estado e a bacia do Alto Uruguai, além de abranger a região noroeste do RS, também drena parte do estado de Santa Catarina. A figura 9 representa a localização destas bacias em estudo.

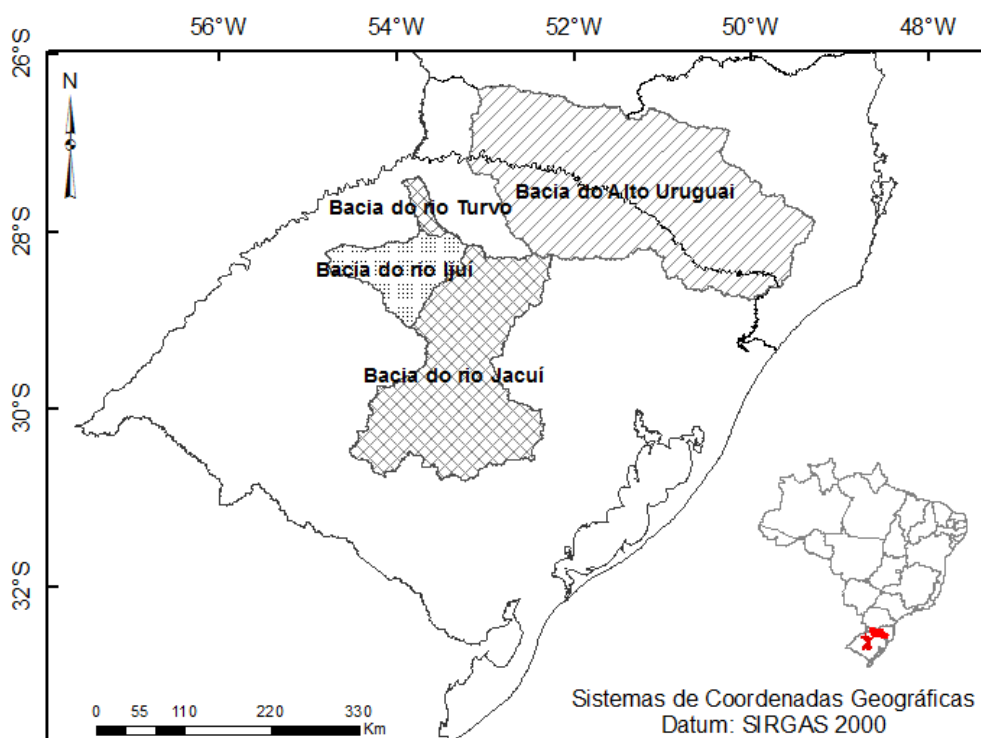


Figura 9 – Localização das bacias hidrográficas selecionadas para aplicação da metodologia proposta.

Fonte: Acervo próprio.

5.1.1 Bacia do Rio Turvo

A bacia hidrográfica do Rio Turvo faz parte da unidade U030 da divisão do Rio Grande do Sul em bacias hidrográficas. Esta U030 trata-se de um conjunto de bacias contíguas de sete afluentes diretos do rio Uruguai, situadas no extremo norte do estado (SEMA, 2012). A bacia do rio Turvo foi delimitada até o posto fluviométrico denominado Três Passos, totalizando uma área de drenagem 1.540 km². Na figura 10 são apresentadas as localizações das estações pluviométricas, climatológicas e a fluviométrica, utilizadas para obtenção das informações hidrológicas da bacia do Rio Turvo.

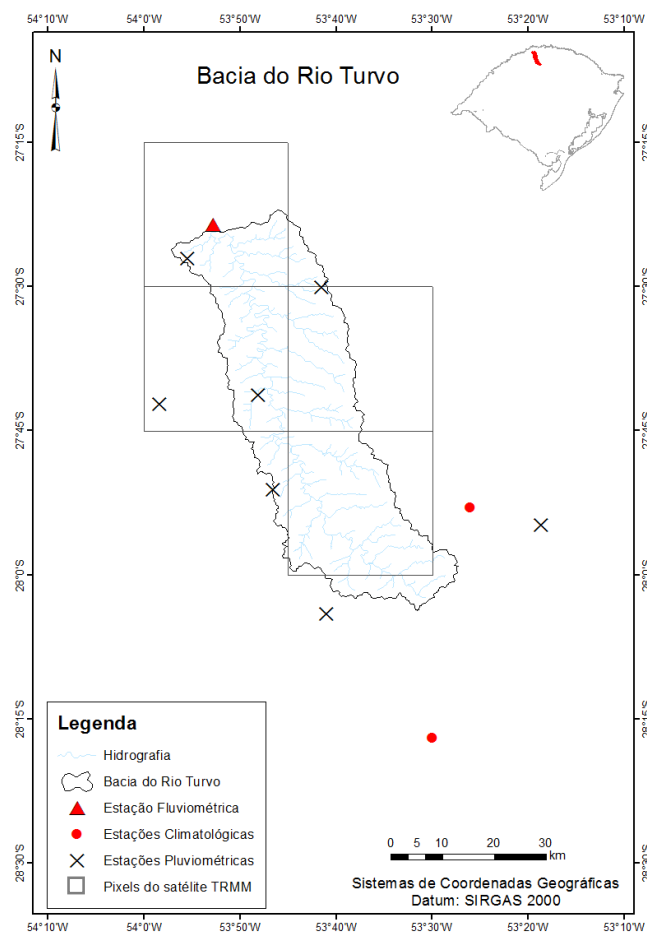


Figura 10 – Bacia hidrográfica do Rio Turvo com a localização das estações de monitoramento e pixels do TRMM.

Fonte: Acervo próprio.

Complementar a figura 10, o apêndice A apresenta o código e o nome, utilizado pela ANA, das estações de monitoramento, assim como as coordenadas de localização e as altitudes nas quais elas se encontram.

Com base nas séries históricas das 7 estações pluviométricas, a precipitação média anual atinge 1.742 mm, com clima do tipo Cfa, de acordo com a classificação climática de Köppen (CEMET RS, 2012). Esta classificação indica que a precipitação é razoavelmente bem distribuída, sem a ocorrência de estação seca nem chuvosa bem definidas, apesar de ser observado um maior volume precipitado no mês de outubro (Figura 11). A temperatura média anual da região do município de Santa Rosa, na qual a bacia do Turvo está inserida, é de cerca de 20,8 °C e a umidade relativa média anual é de aproximadamente 75% (CEMET RS, 2012). A vazão média ficou em torno de 45,7 m³.s⁻¹, e foi obtida por meio da média de longo período da série da estação fluviométrica Três Passos. Isso corresponde a uma vazão específica de 29,65 L.s⁻¹.km⁻².

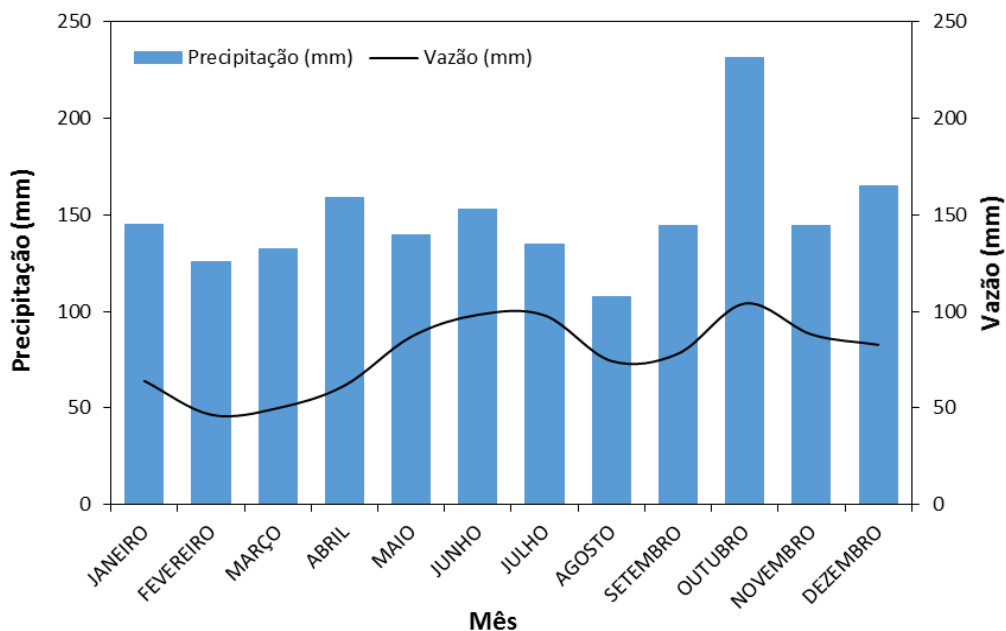


Figura 11 – Precipitação média mensal obtida pelos 7 pluviômetros na bacia do Rio Turvo e vazão média mensal da estação fluviométrica Três Passos.

Fonte: Acervo próprio.

O uso do solo é destinado principalmente à produção agrícola da soja, em rotação com milho, trigo ou outras culturas relacionadas, além do perfil agropecuário baseado na suinocultura e bovinocultura de leite, com estrutura agrária baseada predominantemente na pequena e média propriedade (FEPAM, 2015a).

Constitui-se numa bacia com população predominantemente rural, apresentando demanda significativas de água com perspectivas de aumento do consumo em função das atividades socioeconômicas que se desenvolvem na região. Os principais usos da água se destinam à dessedentação animal, com forte potencial de poluição dos mananciais, ao abastecimento humano e à irrigação (SEMA, 2015).

Os solos predominantes nesta região são os Brunizém Avermelhados, atualmente denominados Chernossolos, e Solos Litólicos (Neossolos), que apresentam elevada pedregosidade em áreas de relevo movimentado, além dos Latossolos Roxo e Vermelho-Escuro (BRASIL, 2006).

Os Chernossolos são constituídos, geralmente, por perfis pouco profundos, com fertilidade natural muito elevada. No horizonte B há um maior acúmulo de argila e a estrutura é em blocos angulares ou subangulares. São solos que ocorrem com frequência em relevo fortemente ondulado, e que devido a menor profundidade do seu perfil apresentam alta pedregosidade. Estas características tornam estes solos muito susceptíveis à erosão hídrica, quando cultivados (EMBRAPA, 2013).

Os Neossolos Litólicos apresentam características próximas as dos Chernossolos, com perfis rasos, muito material de rocha em decomposição e fertilidade natural de média a alta. Também ocorrem em relevos ondulados ou montanhosos (EMBRAPA, 2013).

Os Latossolos Roxo e Vermelho-Escuro apresentam coloração escura, em tons avermelhados, devido à presença de ferro na sua composição química. O que os diferencia é que o teor de óxido de ferro (Fe_2O_3) é maior no Latossolo Roxo (>18%) em relação ao Vermelho-Escuro (8-18%). São solos geralmente profundos, com textura média a argilosa, e que, apesar de apresentarem baixa fertilidade natural, são considerados de boa potencialidade agrícola. Entretanto, o uso de máquinas pesadas e as práticas de preparo convencionais com revolvimento intensivo do solo, na maioria das vezes fora do teor adequado de umidade, têm provocando uma rápida degradação física dos mesmos (EMBRAPA, 2013).

5.1.2 Bacia do Rio Ijuí

A bacia do Rio Ijuí foi delimitada até o posto fluviométrico denominado Ponte Mística, localizado no município de São Luiz Gonzaga, situado a noroeste do estado do Rio Grande do Sul. Esta bacia é um afluente do Uruguai pela margem esquerda, drenando uma área de aproximadamente 9.450 km². Abrange total ou parcialmente 38 municípios gaúchos. Seus principais rios, além do Ijuí, são o Caxambu, Potiribu, Conceição e Ijuizinho (SEMA, 2015). A figura 12 mostra as estações de monitoramento utilizadas para obtenção das informações hidrológicas desta bacia.

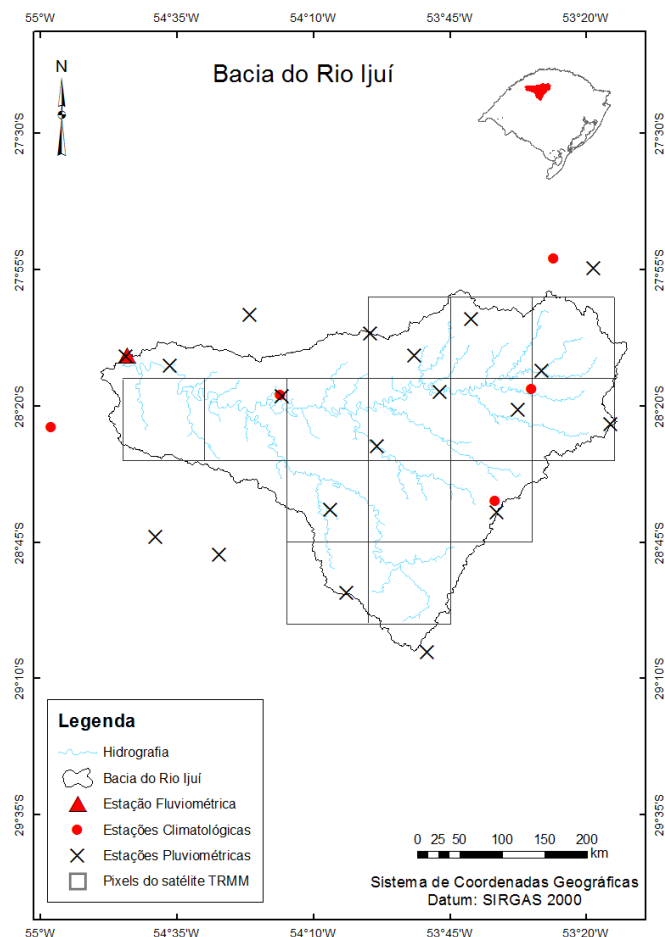


Figura 12 – Bacia hidrográfica do Rio Ijuí com a localização das estações de monitoramento e pixels do TRMM.

Fonte: Acervo próprio.

Complementar à figura 12, no apêndice A está disponível o código e nome, determinados pela ANA, das estações de monitoramento na bacia do rio Ijuí, com suas coordenadas de localização e altitudes respectivas.

A precipitação média anual, obtida pelas dezenove estações pluviométricas disponíveis na bacia do Rio Ijuí, atinge 1.839 mm, com clima do tipo Cfa da classificação de Köppen (BELTRAME, 2000). Assim como na bacia do Rio Turvo, mesmo indicando precipitações homogêneas durante todo o ano, a bacia do Rio Ijuí também registra um maior volume precipitado no mês de outubro (Figura 13). A temperatura média anual em São Luiz Gonzaga, onde foi determinado o exutório da bacia, é de 18,9 °C (SEMA, 2012). A vazão média de longo período da série da estação fluviométrica Ponte Mística é de 273 m³.s⁻¹, o que corresponde a uma vazão específica de 28,86 L.s⁻¹.km⁻².

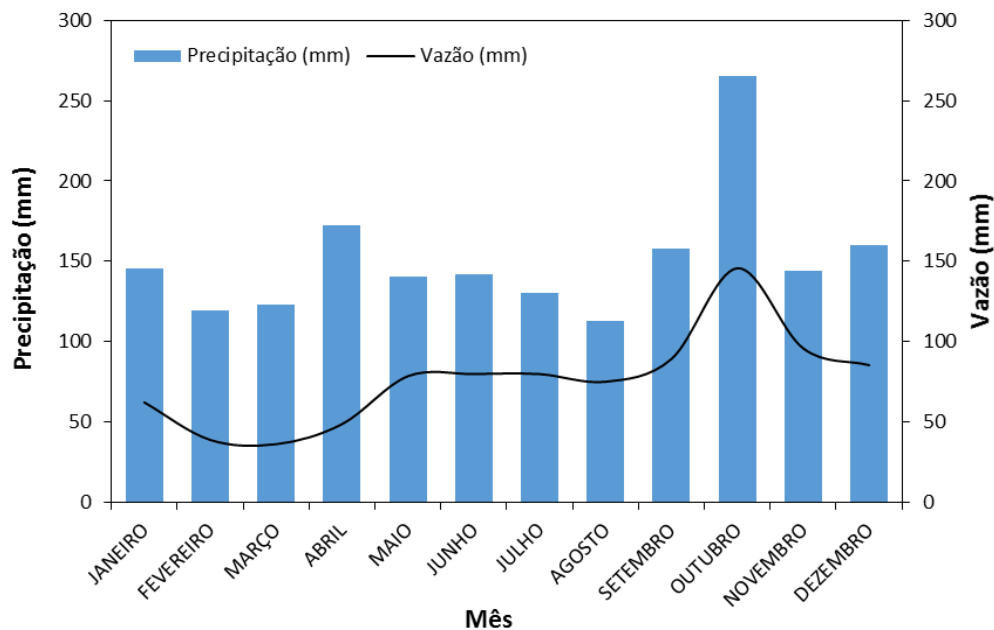


Figura 13 – Precipitação média mensal obtida pelos 19 pluviômetros na bacia do Rio Ijuí e vazão média mensal da estação fluviométrica Ponte Mística.

Fonte: Acervo próprio.

O uso do solo é marcado pela cultura da soja, assim como a bacia do rio Turvo, porém com maior utilização de irrigação por pivô central. O principal uso da água se destina, então, à irrigação seguido do abastecimento público, além da geração de energia em pequenas centrais hidrelétricas (SEMA, 2015).

Seu relevo é composto de colinas em regiões de campos com declives suaves que variam entre 3 e 15% e os solos predominantes são os Latossolos Roxos e Vermelho-Escuros e as Terras Roxas Estruturadas, atualmente chamados de Nitossolos Vermelhos ou Vermelho-Escuros (SORRIBAS, 2011). De maneira geral, estes solos são profundos e com alto teor de argila no seu perfil. No entanto, apesar desta região apresentar solos de características argilosas (mais de 60% de argila), nota-se uma forte drenagem devido aos microagregados formados em todo o perfil, resultando em maior macro-porosidade (CASTRO, 1996 *apud* SILVA JÚNIOR et al., 2003).

5.1.3 Bacia do Rio Jacuí

A bacia do Rio Jacuí foi delimitada até o posto fluviométrico denominado Rio Pardo (código 85900000 da ANA), e engloba as bacias do Alto Jacuí, Vacacaí-Vacacaí Mirim e parte do Baixo Jacuí. Esta bacia está situada na região centro oriental do estado e pertence à região hidrográfica do Guaíba (SEMA, 2012). Conta com uma área de drenagem de aproximadamente 38.700 km².

Na figura 14 são apresentadas as localizações das estações pluviométricas, climatológicas e a fluviométrica, utilizadas para obtenção das informações hidrológicas da bacia do Rio Jacuí. No apêndice A, complementar a essas informações, estão os códigos e nomes (utilizados pela ANA) de todas as estações utilizadas para esta bacia, assim como as coordenadas de localização e altitudes nas quais elas se encontram.

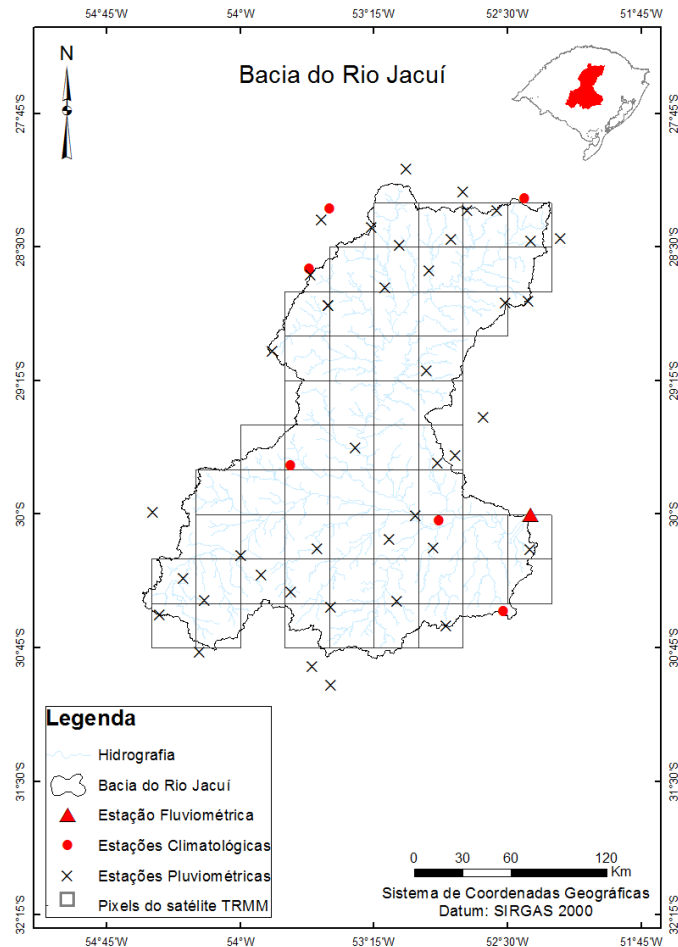


Figura 14 – Bacia hidrográfica do Rio Jacuí com a localização das estações de monitoramento e pixels do TRMM.

Fonte: Acervo próprio.

A precipitação média anual, obtida pelas 41 estações pluviométricas na bacia do Rio Jacuí, atinge 1.678 mm com médias mensais variando entre 120, em agosto, e 185 mm, em outubro (Figura 15). A temperatura média anual varia entre 17 e 20 °C, com umidade relativa do ar oscilando entre 65 e 75 % nos meses mais quentes, e entre 75 e 85 % nos meses mais frios (ROSSATO, 2011). A vazão média de longo período da série da estação fluviométrica Rio Pardo é de $948 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, correspondendo a uma vazão específica $24,50 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$.

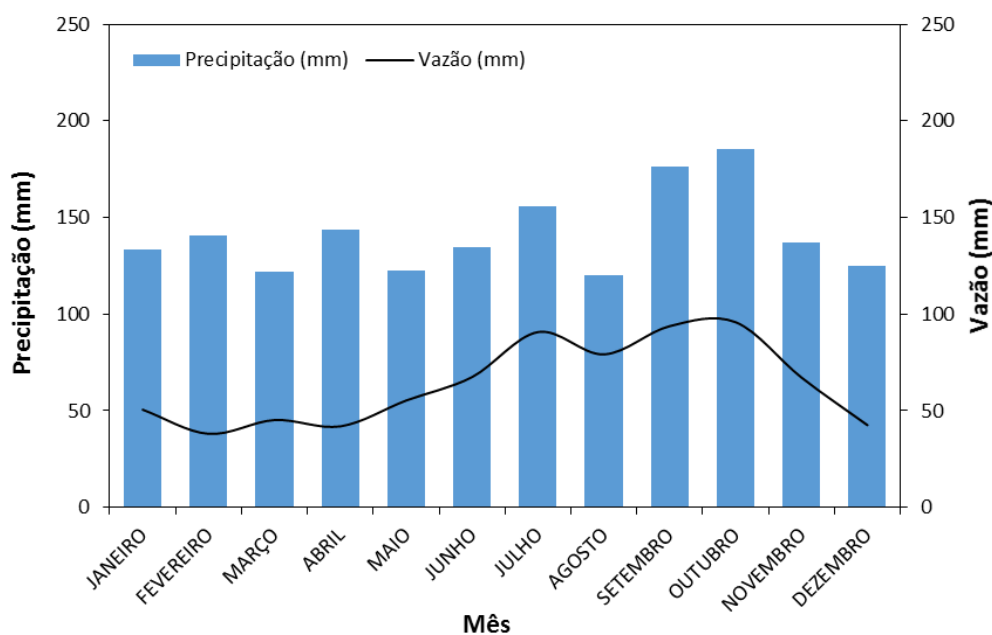


Figura 15 – Precipitação média mensal obtida pelos 41 pluviômetros na bacia do Rio Jacuí e vazão média mensal da estação fluviométrica Rio Pardo.

Fonte: Acervo próprio.

O solo é caracterizado pelo uso intensivo da agricultura e pecuária, em toda a sua extensão, e pelo aproveitamento energético em seu trecho superior, destacando-se ainda as aglomerações urbanas de porte significativo. Especificamente, na área norte do rio Jacuí predominam as culturas intensivas de soja e trigo, através do sistema de cultura rotativa e na área sul aparece, além destas culturas, o cultivo do arroz irrigado e a pecuária (FEPAM, 2015b).

Nesta bacia a demanda de água para irrigação de lavouras de arroz merece destaque, já que somam cerca de 78.000 hectares plantados (FEPAM, 2015b), que necessitam entre 1,0 e 1,4 $L.s^{-1}.ha^{-1}$ de água (SCIVITTARO et al., 2010). Considerando uma média de 1,2 $L.s^{-1}.ha^{-1}$ para o período de novembro e abril, a demanda hídrica estimada para estes hectares plantados atinge 93.600 $L.s^{-1}$, que corresponde a 10 % da vazão do Rio Jacuí na estação fluviométrica Rio Pardo. Fica claro, então, que há uma alteração no regime natural do curso de água em alguns meses do ano, o que leva a necessidade de um planejamento adequado dos recursos hídricos devidos aos conflitos gerados pelo seu uso.

Os solos nesta região são do grupo Planossolo, típicos de áreas baixas, de relevo plano a suaves ondulações. Geralmente são marcados pela presença de um horizonte superficial eluvial de textura arenosa ou média, que contrasta abruptamente com o horizonte adjacente B, de elevada concentração de argila (EMBRAPA, 2013).

5.1.4 Bacia do Alto Uruguai

A bacia hidrográfica do Alto Uruguai teve o exutório estabelecido junto ao posto fluviométrico denominado Iraí (código 75100000 da ANA). Abrange a região noroeste do estado do Rio Grande do Sul e parte de Santa Catarina, totalizando uma área de drenagem de cerca de 61.900 km². Na figura 16 podem ser observadas as estações de monitoramento pluviométrico, climatológico e fluviométrico da bacia do Alto Uruguai. No apêndice A consta os código e nome das estações, utilizados pela ANA, bem como suas respectivas coordenadas geográficas e altitudes.

Esta bacia compreende a porção alta da bacia do Uruguai, localizada inteiramente em território brasileiro, tendo origem na confluência dos rios Pelotas e Canoas. Nesta porção inicial a ocupação antrópica é relativamente baixa, destacando-se a pecuária e o cultivo de maçã (BRASIL, 2006).

Além destes dois rios, destacam-se também o rio do Peixe, Chapecó e Passo Fundo, onde há uma maior concentração industrial, inclusive apresentando comprometimento da qualidade dos recursos hídricos, a partir das fontes poluidoras de origem industrial, além da degradação causada pela intensa atividade suinícola. Esta bacia também apresenta um alto potencial hidrelétrico garantido pelo relevo com grande declividade.

Nesta bacia encontram-se os Cambissolos, que são solos minerais de coloração bruno-avermelhada. O horizonte B apresenta textura variando de muito argilosa a média, com teores comumente elevados de silte. A presença de cascalhos pode ou não ser verificada (EMBRAPA, 2013).

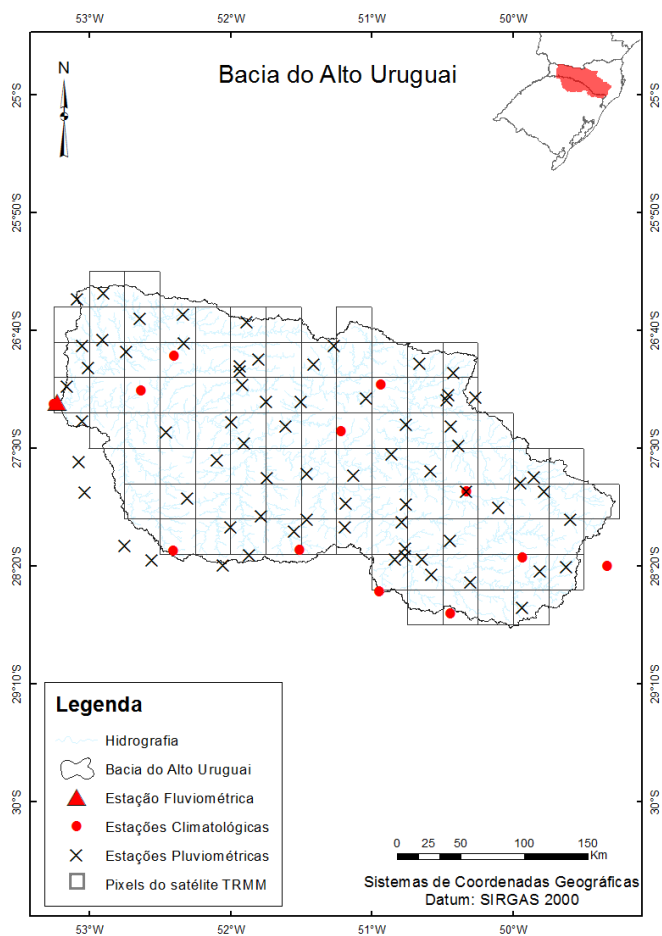


Figura 16 – Bacia hidrográfica do Alto Uruguai com a localização das estações de monitoramento e pixels do TRMM.

Fonte: Acervo próprio.

A precipitação média anual, obtida pelas 70 estações pluviométricas na bacia do Alto Uruguai, atinge 1.766 mm, sem presença de sazonalidade em sua distribuição ao longo do ano, registrando maiores volumes para os meses de setembro e outubro (Figura 17). A temperatura média anual permanece entre 16 e 20 °C; e o clima varia entre Cfa e Cfb: quando a temperatura do mês mais quente é superior a 22 °C, áreas de relevo mais baixo, o clima é classificado como sendo Cfa; em contraponto, nas áreas de temperatura máximas do mês inferior a 22 °C, nas partes mais altas da bacia, o clima é temperado Cfb (SEMA, 2012). A vazão média obtida por meio da média de longo período da série da estação fluviométrica Iraí é de $1.784 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, o que corresponde a uma vazão específica de $28,83 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$.

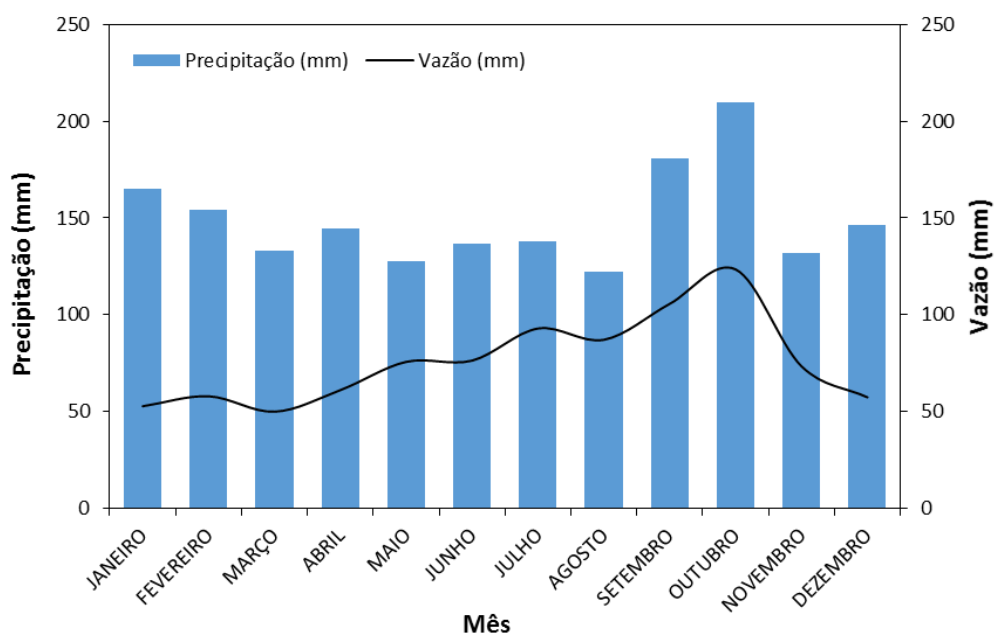


Figura 17 – Precipitação média mensal obtida pelos 70 pluviômetros na bacia do Alto Uruguai e vazão média mensal da estação fluviométrica Iraí.

Fonte: Acervo próprio.

5.2 Processamento dos dados espacializados para uso no modelo

5.2.1 Cenários de redes pluviométricas

A bacia do rio Turvo contou com 7 estações pluviométricas cadastradas nos bancos de dados, localizadas no interior ou a até 20 km do seu entorno, que continham informações no período de estudo (janeiro de 1998 a julho de 2014). Os cenários de simulação com diferentes redes de pluviômetros foram montados a partir desta quantidade total de estações, que totalizaram 5, 3 e 2 estações para os cenários com 75%, 50% e 25% das estações, respectivamente. Para o cálculo da chuva média estimada por satélite, utilizou-se de 4 pixels do TRMM contidos na área da bacia.

Para as demais bacias as informações acerca da quantidade de estações pluviométricas e pixels sobre as áreas das bacias são apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 – Cobertura de monitoramento pluviométrico utilizada em cada cenário.

| Bacia - Cenário | Número de Estações | Cobertura de Pluviômetros (km².estação⁻¹) |
|------------------------|---------------------------|--|
| Turvo | | |
| Cen Real (100%) | 7 | 220 |
| Cen 75% | 5 | 308 |
| Cen 50% | 3 | 513 |
| Cen 25% | 2 | 770 |
| Ijuí | | |
| Cen Real (100%) | 19 | 497 |
| Cen 75% | 14 | 675 |
| Cen 50% | 9 | 1.050 |
| Cen 25% | 5 | 1.890 |
| Jacuí | | |
| Cen Real (100%) | 41 | 944 |
| Cen 75% | 31 | 1.248 |
| Cen 50% | 20 | 1.935 |
| Cen 25% | 10 | 3.870 |
| Alto Uruguai | | |
| Cen Real (100%) | 70 | 884 |
| Cen 75% | 52 | 1.190 |
| Cen 50% | 35 | 1.769 |
| Cen 25% | 17 | 3.641 |

Fonte: Acervo próprio.

De maneira complementar a tabela 3, na figura 18 são apresentadas as quatro bacias hidrográficas utilizadas no estudo, com a representação da distribuição espacial do verdadeiro número de pluviômetros encontrado nos bancos de dados (Cen Real), os cenários com diferentes coberturas de pluviômetros (Cen 25%, Cen 50% e Cen 75%) e distribuição espacial de acordo com o resultado do sorteio aleatório, além da localização dos pixels do satélite TRMM (Cen TRMM).

A distribuição espacial das estações pluviométricas, gerada a partir do sorteio aleatório mostrou diferentes características em cada cenário de uma mesma bacia. O sorteio manteve uma boa distribuição espacial da rede de pluviômetros em alguns casos, como no Cen 25% da bacia do Rio Ijuí, enquanto o mesmo para as bacias dos rios Turvo e Jacuí produziram uma distribuição espacial notadamente não-uniforme.

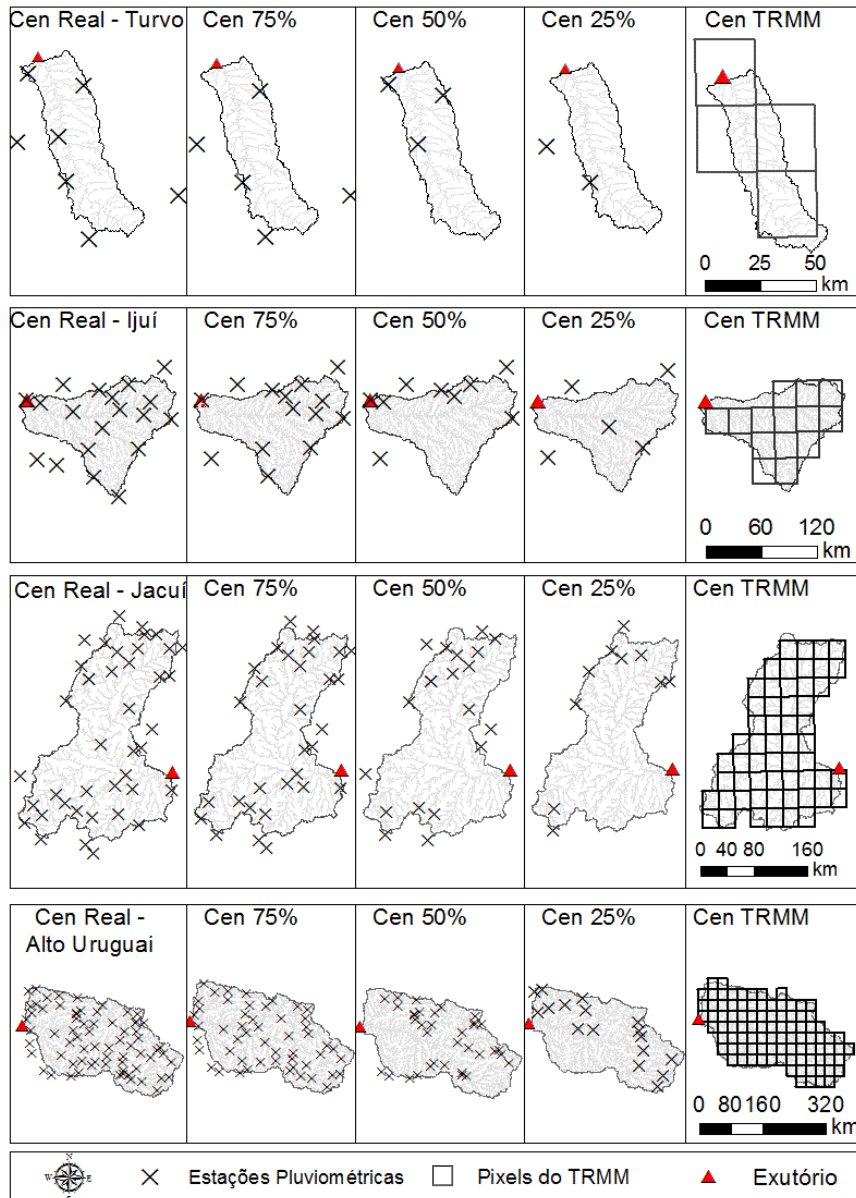


Figura 18 – Diferentes conjuntos de informações pluviométricas utilizados para cálculo da chuva média espacializada.

Fonte: Acervo próprio.

De maneira geral, os cenários gerados para a bacia do rio Jacuí foram os que apresentaram menores coberturas de monitoramento (relação entre a área da bacia e o número de estações), com destaque para o Cen 25% que, além apresentar uma distribuição espacial não-uniforme dos pluviômetros, contou com a menor cobertura dentre os cenários de todas as bacias, com 1 pluviômetro para 3.870 km². Destaca-

se que mesmo para o Cen Real, esta bacia se caracterizou pela baixa densidade de pluviômetros ($944 \text{ km}^2 \cdot \text{estação}^{-1}$).

A partir da figura 19 é possível observar a espacialização da precipitação para os diferentes cenários das bacias em análise. Utilizou-se das imagens do dia 27 de fevereiro de 2007 apenas para ilustração e melhor compreensão do procedimento. Deste ponto da espacialização, era realizada a média aritmética do valor de cada unidade de pixel no interior da bacia, desconsiderando os demais. Como produto final era obtida a chuva média diária.

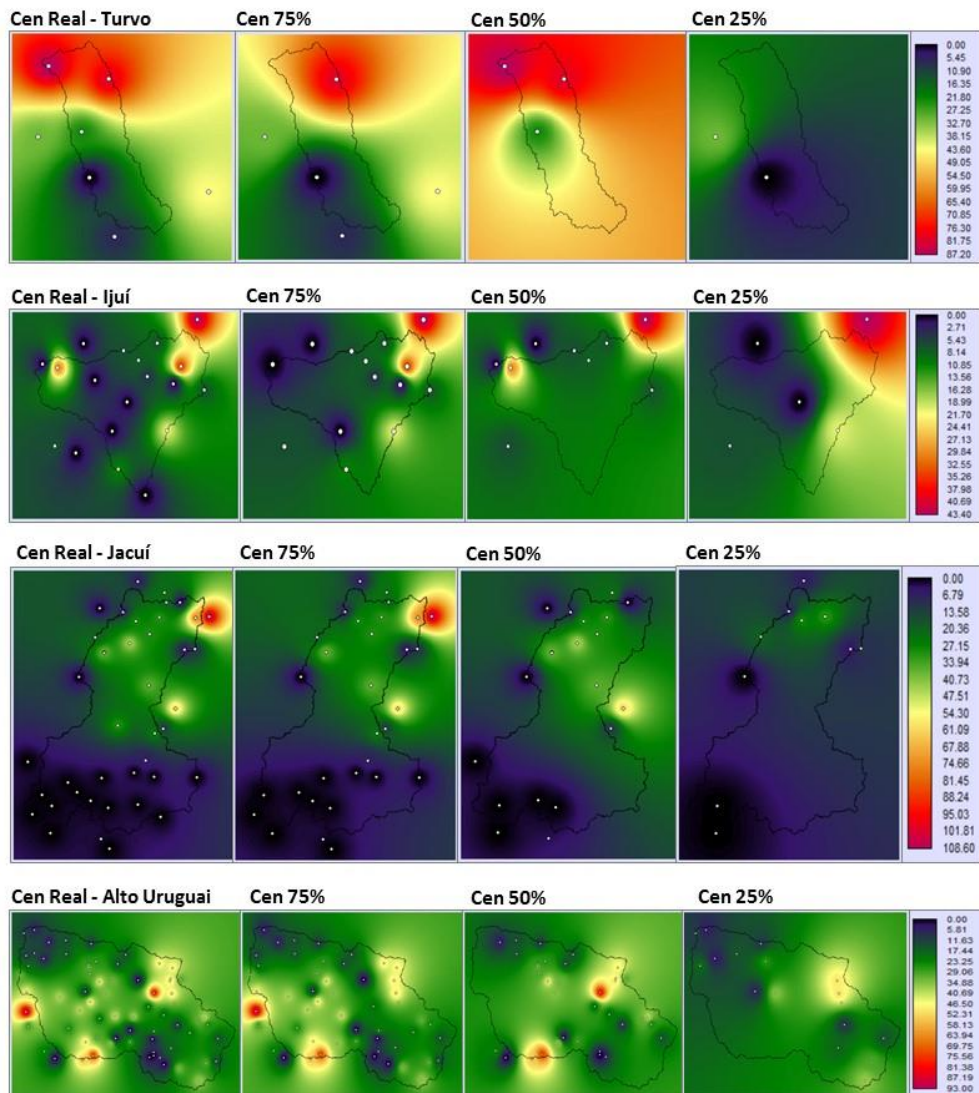


Figura 19 – Resultado da espacialização da precipitação dos diferentes cenários com distintas redes de pluviômetros, para o dia 25 de fevereiro de 2007.

Fonte: Acervo próprio.

Esta etapa do processamento dos dados gerou 387.584 arquivos (mais 4 séries históricas, no formato ASCII, com 6.056 dias), sendo 290.688 imagens em formato *raster*, demandando aproximadamente 1 Tb (Terabyte) de espaço em memória computacional e a necessidade de aquisição de HD (*Hard Disk*) externo com grande capacidade de armazenamento de dados.

5.2.2 Integração dos dados do TRMM

A integração dos intervalos de 3 h das estimativas do TRMM que melhor se correlacionou com os dados dos pluviômetros foi o acumulado das 12 horas às 9 horas UTC, para todas as bacias, com 1 dia de defasagem entre ambos, notando uma antecipação das estimativas do satélite em relação aos dados coletados em solo. Na tabela 4 pode ser observado o resultado dessas correlações para as bacias dos rios Turvo, Ijuí, Jacuí e Alto Uruguai.

Tabela 4 – Resultados das correlações entre as chuvas médias geradas pelo Cen Real e as integrações diárias do TRMM, com diferentes horários de início.

| Dia da correlação | Hora Inicial da Integração do TRMM (UTC) | | | | | | | |
|-------------------------|--|------|------|------|-------------|------|------|------|
| | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 |
| Turvo | | | | | | | | |
| | R | | | | | | | |
| dia 1 pluv - dia 1 TRMM | 0,48 | 0,41 | 0,33 | 0,25 | 0,16 | 0,11 | 0,08 | 0,05 |
| dia 2 pluv - dia 1 TRMM | 0,53 | 0,60 | 0,67 | 0,74 | 0,77 | 0,71 | 0,65 | 0,55 |
| dia 3 pluv - dia 1 TRMM | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,07 |
| Ijuí | | | | | | | | |
| dia 1 pluv - dia 1 TRMM | 0,56 | 0,48 | 0,40 | 0,30 | 0,22 | 0,16 | 0,13 | 0,09 |
| dia 2 pluv - dia 1 TRMM | 0,58 | 0,66 | 0,75 | 0,82 | 0,85 | 0,80 | 0,73 | 0,64 |
| dia 3 pluv - dia 1 TRMM | 0,07 | 0,08 | 0,10 | 0,14 | 0,20 | 0,30 | 0,39 | 0,49 |
| Jacuí | | | | | | | | |
| dia 1 pluv - dia 1 TRMM | 0,58 | 0,49 | 0,38 | 0,28 | 0,19 | 0,13 | 0,09 | 0,06 |
| dia 2 pluv - dia 1 TRMM | 0,62 | 0,71 | 0,81 | 0,86 | 0,88 | 0,83 | 0,77 | 0,68 |
| dia 3 pluv - dia 1 TRMM | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,16 | 0,23 | 0,32 | 0,41 | 0,52 |
| Alto Uruguai | | | | | | | | |
| dia 1 pluv - dia 1 TRMM | 0,64 | 0,54 | 0,43 | 0,33 | 0,24 | 0,17 | 0,13 | 0,10 |
| dia 2 pluv - dia 1 TRMM | 0,63 | 0,73 | 0,82 | 0,88 | 0,91 | 0,88 | 0,83 | 0,74 |
| dia 3 pluv - dia 1 TRMM | 0,12 | 0,15 | 0,17 | 0,20 | 0,25 | 0,32 | 0,40 | 0,51 |

Este resultado vai de acordo com o observado por Collischonn (2006), que obteve 25 horas de defasagem entre as informações de pluviômetros e estimadas pela TRMM, observando também uma antecipação dos dados obtidos por satélite. Desta forma, a chuva média obtida por pluviômetro foi correlacionada com a chuva média estimada por satélite do dia anterior.

5.2.3 Estimativa da evapotranspiração

A evapotranspiração média real foi estimada com base nas estações climatológicas utilizadas para cada bacia. O coeficiente de correção do tanque classe A – k_p , variou de 0,870 a 0,952 para as bacias estudadas.

Para a bacia do Rio Turvo, como a precipitação média anual resultou em 1.742 mm e a vazão média anual 935 mm, a evapotranspiração real resultou em 807 mm. Como a evaporação média anual do tanque classe A atingiu 929 mm, o K_p foi estimado em 0,870. Esse coeficiente foi utilizado para correção das evaporações médias mensais, transformando-as em evapotranspirações reais mensais e, posteriormente, em evapotranspiração real diária, em termos médios para um mesmo mês, conforme valores apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Evapotranspiração média diária obtida a partir da correção da evaporação do tanque classe A, para a bacia do Rio Turvo.

| Mês | Evaporação média mensal (mm) | Evapotranspiração média mensal (mm) | Evapotranspiração média diária (mm) |
|------------------|-------------------------------------|--|--|
| Janeiro | 84,7 | 73,7 | 2,38 |
| Fevereiro | 74,1 | 64,5 | 2,30 |
| Março | 60,0 | 52,2 | 1,68 |
| Abril | 68,6 | 59,7 | 1,99 |
| Mai | 50,2 | 43,7 | 1,41 |
| Junho | 49,3 | 42,9 | 1,43 |
| Julho | 73,3 | 63,8 | 2,06 |
| Agosto | 64,5 | 56,1 | 1,81 |
| Setembro | 83,6 | 72,8 | 2,43 |
| Outubro | 100,5 | 87,4 | 2,82 |
| Novembro | 104,5 | 90,9 | 3,03 |
| Dezembro | 107,4 | 93,5 | 3,02 |

Fonte: Acervo próprio.

Para a bacia do Rio Ijuí, a precipitação média anual resultou em 1.839 mm e a vazão média anual 910 mm, a evapotranspiração real resultou em 929 mm. Como a evaporação média anual do tanque classe A atingiu 1.016 mm, o Kp foi estimado em 0,914. Os resultados da evapotranspiração real diária, em valores médios mensais, são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Evapotranspiração média diária obtida a partir da correção da evaporação do tanque classe A, para a bacia do Rio Ijuí.

| Mês | Evaporação média mensal (mm) | Evapotranspiração média mensal (mm) | Evapotranspiração média diária (mm) |
|------------------|-------------------------------------|--|--|
| Janeiro | 103,81 | 94,9 | 3,06 |
| Fevereiro | 87,55 | 80,0 | 2,86 |
| Março | 79,04 | 72,2 | 2,33 |
| Abril | 72,11 | 65,9 | 2,20 |
| Mai | 60,23 | 55,1 | 1,78 |
| Junho | 55,34 | 50,6 | 1,69 |
| Julho | 70,62 | 64,5 | 2,08 |
| Agosto | 73,41 | 67,1 | 2,16 |
| Setembro | 82,86 | 75,7 | 2,52 |
| Outubro | 99,55 | 91,0 | 2,93 |
| Novembro | 109,06 | 99,7 | 3,32 |
| Dezembro | 121,80 | 111,3 | 3,59 |

Fonte: Acervo próprio.

Para a bacia do Rio Jacuí, a precipitação média anual resultou em 1.678 mm e a vazão média anual 773 mm, e do balanço hídrico entre estas variáveis, a evapotranspiração real resultou em 905 mm. A evaporação média anual do tanque classe A atingiu 1.003 mm, e o Kp foi estimado em 0,902. A evapotranspiração real mensal e a evapotranspiração real diária são apresentadas na tabela 7.

A precipitação média anual obtida para a bacia do Alto Uruguai foi de 1.766 mm e a vazão média anual 909 mm. A evapotranspiração real resultou, então, em 857 mm. A evaporação média anual do tanque classe A atingiu 900 mm, o Kp foi estimado em 0,952. Os resultados da evapotranspiração real diária, em valores médios mensais, são apresentados na tabela 8.

Tabela 7 – Evapotranspiração média diária obtida a partir da correção da evaporação do tanque classe A, para a bacia do Rio Jacuí.

| Mês | Evaporação média mensal (mm) | Evapotranspiração média mensal (mm) | Evapotranspiração média diária (mm) |
|------------------|-------------------------------------|--|--|
| Janeiro | 85,45 | 81,3 | 2,62 |
| Fevereiro | 73,54 | 70,0 | 2,50 |
| Março | 72,55 | 69,1 | 2,23 |
| Abril | 67,83 | 64,6 | 2,15 |
| Mai | 61,91 | 58,9 | 1,90 |
| Junho | 56,42 | 53,7 | 1,79 |
| Julho | 66,96 | 63,7 | 2,06 |
| Agosto | 72,67 | 69,2 | 2,23 |
| Setembro | 75,48 | 71,9 | 2,40 |
| Outubro | 86,14 | 82,0 | 2,65 |
| Novembro | 90,11 | 85,8 | 2,86 |
| Dezembro | 98,36 | 93,6 | 3,02 |

Fonte: Acervo próprio.

Tabela 8 – Evapotranspiração média diária obtida a partir da correção da evaporação do tanque classe A, para a bacia do Alto Uruguai.

| Mês | Evaporação média mensal (mm) | Evapotranspiração média mensal (mm) | Evapotranspiração média diária (mm) |
|------------------|-------------------------------------|--|--|
| Janeiro | 98,94 | 89,2 | 2,88 |
| Fevereiro | 84,82 | 76,5 | 2,73 |
| Março | 75,78 | 68,4 | 2,21 |
| Abril | 71,39 | 64,4 | 2,15 |
| Mai | 58,26 | 52,5 | 1,70 |
| Junho | 54,17 | 48,9 | 1,63 |
| Julho | 68,22 | 61,5 | 1,98 |
| Agosto | 69,56 | 62,7 | 2,02 |
| Setembro | 78,99 | 71,3 | 2,38 |
| Outubro | 97,64 | 88,1 | 2,84 |
| Novembro | 107,55 | 97,0 | 3,23 |
| Dezembro | 121,24 | 109,4 | 3,53 |

Fonte: Acervo próprio.

5.3 Comparação entre as chuvas médias

Os diferentes cenários hipotéticos de chuva média (Cen %) e gerados pelos dados do satélite (Cen TRMM) foram comparados com as chuvas médias geradas pela quantidade total de pluviômetros (Cen Real), que nesta análise foram

considerados como informações de referência. Na figura 20 é apresentado a dispersão entre as chuvas médias dos diferentes cenários.

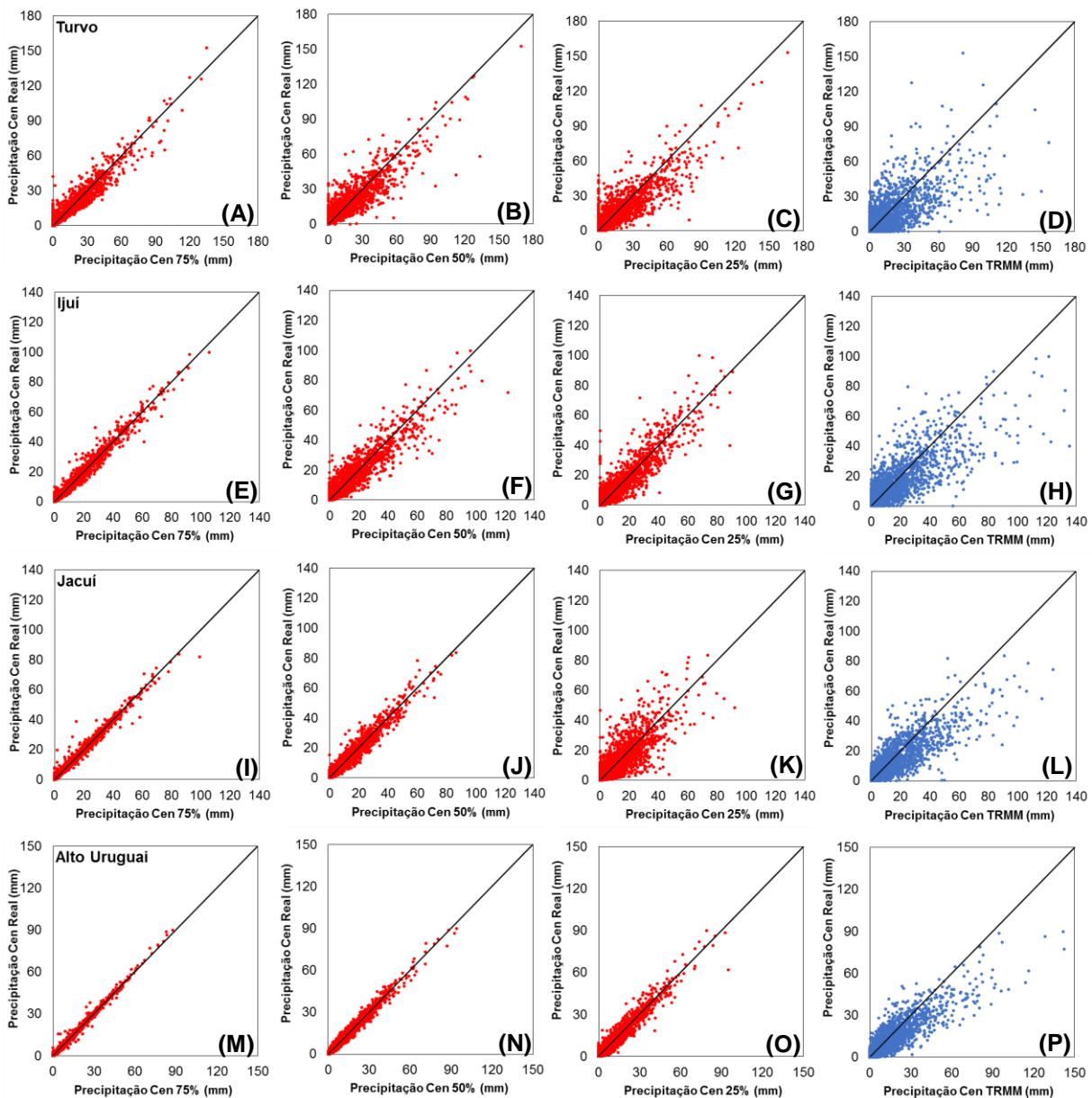


Figura 20 – Dispersão entre as chuvas médias obtidas com todas as estações pluviométricas e os cenários com 75%, 50%, 25% dos pluviômetros e para o TRMM, do rio Turvo (A, B, C e D), Ijuí (E, F, G e H), Jacuí (I, J, K e L), Alto Uruguaí (M, N, O e P), respectivamente.

Fonte: Acervo próprio.

Ao analisar as chuvas médias espacializadas, verifica-se que a dispersão entre os resultados estimados por todos os pluviômetros (Cen Real) e os diferentes cenários (Cen %) hipotéticos aumenta conforme o número de pluviômetros diminui, como pode ser observado com mais clareza na tabela 9. Resultado similar foi encontrado por Xu et al. (2013) que analisaram a precipitação média sobre a bacia do rio Xiangjiang, na China, estimada por diferentes densidades de pluviômetros. Os autores notaram que a margem de erro entre as chuvas médias estimadas por todos os pluviômetros e os cenários diminui conforme há um aumento no número de pluviômetros.

Tabela 9 – Coeficientes de avaliação gerado pela análise das chuvas médias, para os diferentes cenários de monitoramento.

| Bacia | R | R² | Errv (%) |
|---------------------|----------|----------------------|-----------------|
| Turvo | | | |
| Cenário de 75% | 0,97 | 0,94 | 3,03 |
| Cenário de 50% | 0,92 | 0,85 | 4,39 |
| Cenário de 25% | 0,89 | 0,80 | 5,81 |
| TRMM | 0,77 | 0,59 | 15,81 |
| Ijuí | | | |
| Cenário de 75% | 0,99 | 0,98 | 0,90 |
| Cenário de 50% | 0,95 | 0,90 | 0,58 |
| Cenário de 25% | 0,94 | 0,88 | -5,00 |
| TRMM | 0,85 | 0,71 | 7,48 |
| Jacuí | | | |
| Cenário de 75% | 0,99 | 0,99 | 0,29 |
| Cenário de 50% | 0,98 | 0,96 | 1,92 |
| Cenário de 25% | 0,87 | 0,75 | 6,21 |
| TRMM | 0,88 | 0,77 | 15,17 |
| Alto Uruguai | | | |
| Cenário de 75% | 0,997 | 0,99 | -0,60 |
| Cenário de 50% | 0,99 | 0,98 | 0,59 |
| Cenário de 25% | 0,97 | 0,95 | -0,28 |
| TRMM | 0,91 | 0,83 | 15,84 |

Fonte: Acervo próprio.

Do erro de volume, observou-se que os menores erros de volume correspondem à bacia do Alto Uruguai, a qual apresentou menor dispersão entre as chuvas médias dos cenários, como discutido anteriormente, enquanto que os maiores erros de volume foram observados na bacia do rio Turvo, a qual apresentou maior dispersão entre as chuvas médias dos cenários. Na maior parte dos casos, houve superestimativa da precipitação, quando comparada com o cenário Real. O

TRMM superestimou a precipitação em todas as bacias hidrográficas selecionadas em aproximadamente 15%, com exceção da bacia do rio Ijuí, onde este valor foi de aproximadamente 7,5%.

A redução percentual do coeficiente de correlação foi, em média, de 3% (Cen Real - Cen 75%), 8% (Cen Real - Cen 50%), 16% (Cen Real - Cen 25%) e 28% (Cen Real - Cen TRMM), conforme tabela 10. Esse resultado destaca a importância de uma densa rede de pluviômetros para melhor estimativa da chuva média espacializada; também é possível observar que a chuva média obtida com o TRMM foi a que gerou menor qualidade no resultado.

Tabela 10 – Redução dos coeficientes de correlação entre as chuvas médias do Cen Real e os Cen (%) hipotéticos, para a bacia dos rios Turvo, Ijuí, Jacuí e Alto Uruguai.

| Bacia (área) | Redução dos coeficientes de correlação - R (%) | | | |
|--|--|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| | Entre Cen Real - Cen 75% | Entre Cen Real - Cen 50% | Entre Cen Real - Cen 25% | Entre Cen Real - Cen TRMM |
| Turvo (1.540 km ²) | -6% | -15% | -20% | -41% |
| Ijuí (9.450 km ²) | -2% | -10% | -12% | -29% |
| Jacuí (38.700 km ²) | -1% | -4% | -25% | -23% |
| Alto Uruguai (61.900 km ²) | -1% | -2% | -5% | -17% |
| Redução média | -3% | -8% | -16% | -28% |

Fonte: Acervo próprio.

Na bacia do rio Jacuí houve uma considerável redução do coeficiente de correlação entre o Cen Real e o Cen 25%, fugindo do padrão encontrado entre a correlação das chuvas médias do Cen Real e dos demais cenários. O Cen 25% produziu, inclusive, um resultado inferior aquele em que os dados do TRMM são utilizados. A principal suspeita para este resultado é a influência da distribuição espacial dos pluviômetros no Cen 25%, que foi bastante desuniforme. Portanto, as informações de cobertura ou densidade de monitoramento devem vir sempre aliadas às informações de distribuição dos equipamentos e tamanho de área à qual pertence, uma vez que, bacias menores são notoriamente mais sensíveis à escassez de monitoramento.

Quando a área de drenagem das bacias aumentou, a redução do número de pluviômetros resultou, na maior parte dos casos (exceção à bacia do Rio Jacuí), em uma menor dispersão entre as chuvas médias obtidas nos diferentes cenários. Na figura 21, o coeficiente de correlação é apresentado em linha contínua para um mesmo cenário, o que possibilita observar o resultado de acordo com a escala de área de drenagem das bacias.

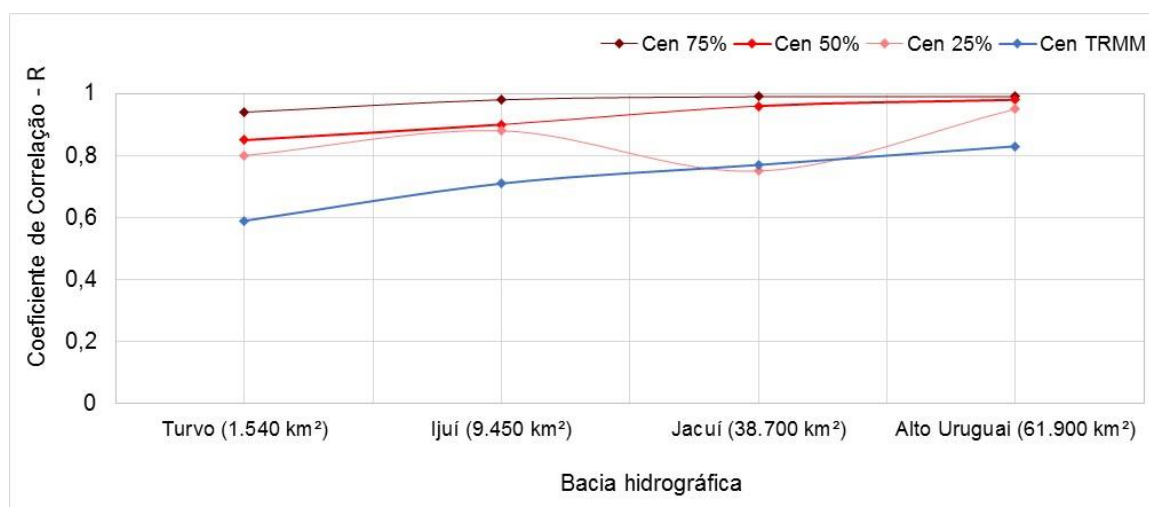


Figura 21 – Comportamento do coeficiente de correlação entre os cenários hipotéticos (Cen %) e o Cen Real, nas diferentes escalas de bacias hidrográficas.

Fonte: Acervo próprio.

Observou-se, também, que as informações acerca da cobertura de monitoramento pluviométrico não apresentaram relação direta com a dispersão entre os dados. Por exemplo, no Cen 25% para a bacia do rio Turvo, a cobertura era de 770 km².estação⁻¹ e o coeficiente de determinação R² de 0,80, enquanto o Cen 25%, para a bacia do Alto Uruguai, contou com uma cobertura de 3.641 km².estação⁻¹, e um R² de 0,95; ou seja, a quantidade de pluviômetro por unidade de área foi consideravelmente reduzida da bacia do rio Turvo para a do Alto Uruguai e, no entanto, o R² se manteve visivelmente superior, indicando uma menor dispersão entre os resultados.

A importância da distribuição espacial regular de pluviômetros foi notória. Por exemplo, no Cen 50%, os pluviômetros estão distribuídos de maneira não-uniforme

na área da bacia do rio Ijuí, comparativamente com o Cen 25% onde a distribuição espacial foi bastante uniforme. Em razão disso, a piora no coeficiente de correlação e determinação foi mínima entre os dois cenários, mesmo com o número de pluviômetros tendo sido reduzidos à metade no Cen 25%.

Para o Cen TRMM, também foi possível observar que com o aumento da área de drenagem das bacias houve redução da dispersão entre as chuvas médias, quando correlacionadas com o Cen Real, apresentando o mesmo padrão de erro dos demais cenários.

Para a bacia do Rio Jacuí, o Cen TRMM produziu melhores resultados quando comparados com o Cen 25%, como pode ser observado nas figuras 20K-L, 21 e 22, que aumentou de 0,75 para 0,77. Esse resultado pode indicar que em condições de elevada escassez de monitoramento pluviométrico, aliada a uma má distribuição de equipamento as estimativas de satélite podem ser mais confiáveis.

Em síntese, a redução entre a correlação entre a chuva média do Cen Real e dos Cen (%) hipotéticos se deu pela redução de pluviômetros, que ocasionou uma não-uniformidade de suas respectivas distribuições, deixando porções de áreas das bacias sem monitoramento pluviométrico, e, em geral, o Cen TRMM apresentou as menores correlações com o Cen Real.

Na bacia do Rio Turvo, a redução do R entre Cen Real e o Cen 75% foi de 6%; entre o Cen 75% e o Cen 50% foi de 9%; e entre o Cen 50% e o Cen 25% foi de 5%. A maior redução de R foi, então, entre o Cen 75% e o Cen 50%, possivelmente porque no cen 50% não há estações na região mais próxima da cabeceira.

Na bacia do Rio Ijuí, a redução do R entre o Cen Real e o Cen 75% foi de 2%; entre o Cen 75% e o Cen 50% foi de 8%; e entre Cen 50% e o Cen 25% foi de 2%. Maior redução de R ocorreu entre o Cen 75% e Cen 50%, possivelmente porque em cen 50% não há estações na região sul da bacia.

Na bacia do Rio Jacuí, a redução do R entre Cen Real e Cen 75% foi de 1%; entre Cen 75% e Cen 50%, 3%; e entre Cen 50% e Cen 25%, 21%. Maior redução ocorreu entre Cen 50% e Cen 25%, possivelmente porque em Cen 25% só tem estações nas regiões de cabeceira.

Na bacia do Alto Uruguai, entre do R entre Cen Real e Cen 75% foi de 1%; entre Cen 75% e Cen 50%, também 1%; e entre Cen 50% e Cen 25%, 3%. Maior redução se deu entre o Cen 50% e Cen 25%, possivelmente porque em Cen 25% não há estações a sudoeste da bacia.

5.4 Modelagem com o WIPH2

A calibração monobjetivo, utilizando a função objetivo do coeficiente de Nash-Sutcliffe, foi a que gerou melhores resultados na calibração, de maneira geral. Sendo assim, foi determinado o uso deste coeficiente para todos os cenários das bacias à título de padronização dos resultados, possibilitando uma melhor comparação entre eles.

Para manter os parâmetros do modelo em valores fisicamente reais para as condições locais das bacias, os limites definidos em cada calibração variaram não só entre as bacias, mas também entre os cenários de uma mesma bacia.

5.4.1 Aplicação do WIPH2 na bacia do Rio Turvo

Para a calibração dos parâmetros do modelo, para a bacia do rio Turvo, considerou-se o período de 22 de março de 1999 a 31 de maio de 2005, e o período de validação entre 01 de janeiro de 2012 e 29 de julho de 2014, conforme figura 22.

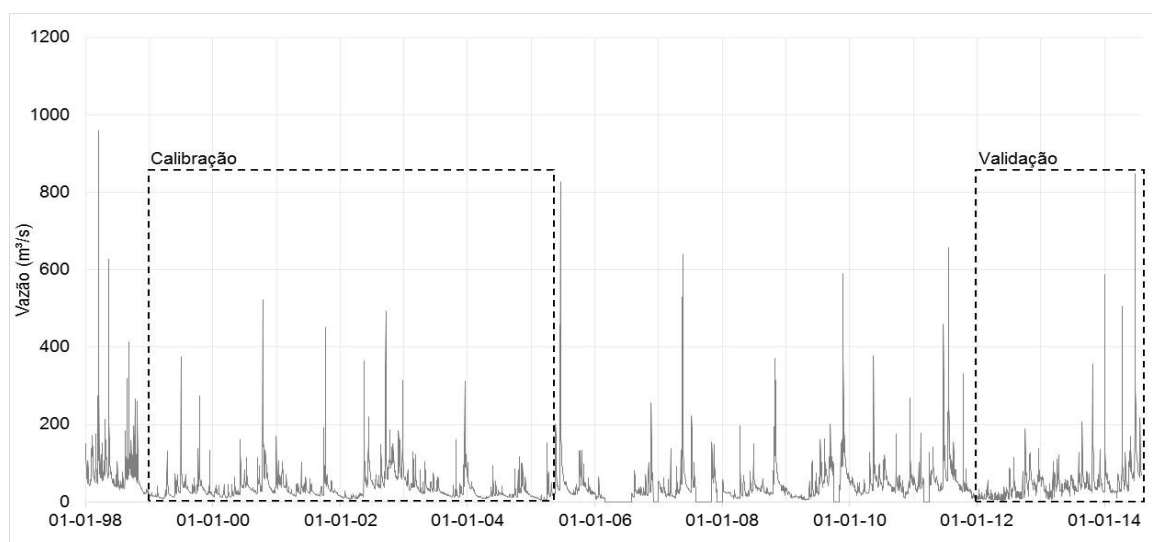


Figura 22 – Série histórica de vazão da estação fluviométrica Três Passos, utilizada como exutório da bacia hidrográfica do rio Turvo.

Fonte: Acervo próprio.

A calibração do WIPH2 foi realizada de maneira independente para cada um dos cinco cenários de chuva média (Cen Real, Cen 75%, Cen 50%, Cen 25% e Cen TRMM). O resultado dos coeficientes de avaliação NS e R são apresentados na tabela 11, tanto para o período da calibração como da validação do modelo. Isso possibilita uma melhor comparação entre os resultados gerados pelos diferentes conjuntos de chuvas médias.

Tabela 11 – Coeficientes de avaliação resultantes das calibrações e validações do modelo WIPH2, para a bacia do Rio Turvo.

| Etapa | Coeficiente de avaliação | Cenário de precipitação | | | | |
|------------|--------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|----------|
| | | Cen Real | Cen 75% | Cen 50% | Cen 25% | Cen TRMM |
| Calibração | R | 0,77 | 0,79 | 0,75 | 0,74 | 0,68 |
| | NS | 0,59 | 0,62 | 0,55 | 0,53 | 0,44 |
| Validação | R | 0,83 | 0,82 | 0,78 | 0,78 | 0,71 |
| | NS | 0,63 | 0,66 | 0,53 | 0,50 | 0,44 |

Fonte: Acervo próprio.

Notou-se que no Cen 75% os resultados das vazões simuladas foram superiores aqueles gerados para o Cen Real, que apresentou coeficiente de avaliação de Nash-Sutcliffe inferior (NS=0,59) ao encontrado para aquele cenário (NS=0,62).

Resultados similares também foram encontrados por Galdino et al. (2014), quando avaliaram a influência do número de pluviômetros utilizados na estimativa da série temporal de chuva média no ajuste do modelo. Os autores notaram que conforme alguns pluviômetros foram desconsiderados no cálculo de chuva média, o modelo apresentou melhora no seu desempenho. Isso se deve, principalmente, pela característica de alta variabilidade espacial da precipitação e a necessidade de se obter um único valor médio representativo de toda a bacia. Além disso, ainda estão associados os erros de leitura do equipamento utilizado para mensuração da precipitação, que afetam a qualidade dos resultados disponíveis.

O Cen 50% (NS=0,55), e Cen 25% (NS=0,53) apresentaram piora no desempenho do modelo, para o período da calibração; no entanto, os resultados

ainda se mostraram adequados já que o coeficiente de NS resultou em valores superiores a 0,5.

O resultado gerado pelas estimativas do satélite TRMM foram inferiores aos gerados pelas informações de pluviômetro, mesmo em comparação com a menor cobertura de pluviômetros em análise (Cen 25%), com coeficiente de NS igual 0,44, tanto para o período da calibração como da validação.

Este resultado era de certa forma esperado devido à área relativamente pequena da bacia do rio Turvo (aproximadamente 1.540 km²) em relação à área dos pixels do satélite (4 pixels de aproximadamente 625 km², totalizando 2.500 km²). Ou seja, a chuva média estimada pelo satélite abrange uma área muito superior à área real da bacia, sendo originada daí, possivelmente, as maiores incertezas em relação aos dados pontuais de pluviômetro.

As figuras 23 e 24 apresentam as simulações das vazões, e as curvas de permanência, respectivamente, geradas para o período da calibração dos parâmetros do modelo WIPH2, considerando os diferentes cenários de chuvas médias. Os resultados gerados para o período das validações, foram incluídos na forma de apêndices (Apêndice B).

Para o período da verificação, ou validação dos parâmetros do modelo, tanto o Cen 75, como o Cen 50% apresentaram coeficientes de avaliação superiores aos gerados pelo período da calibração. Além disso, para todos os cenários, os R obtidos para a validação apresentaram valores superiores aos da calibração, o que não são resultados comumente encontrados.

Analisando a série de vazões, observou-se que no período da validação, embora ocorram eventos de cheia, em geral, eles são de menor frequência e com valores mais próximos à média, quando comparados com o período da calibração, que apresenta vários picos de vazão.

As curvas de permanência, de maneira geral, representaram melhor as vazões mais altas em relação às de base, provavelmente em razão da função objetivo escolhida (coeficiente de Nash-Sutcliffe), que tende a ajustar e produzir melhores resultados para as vazões máximas.

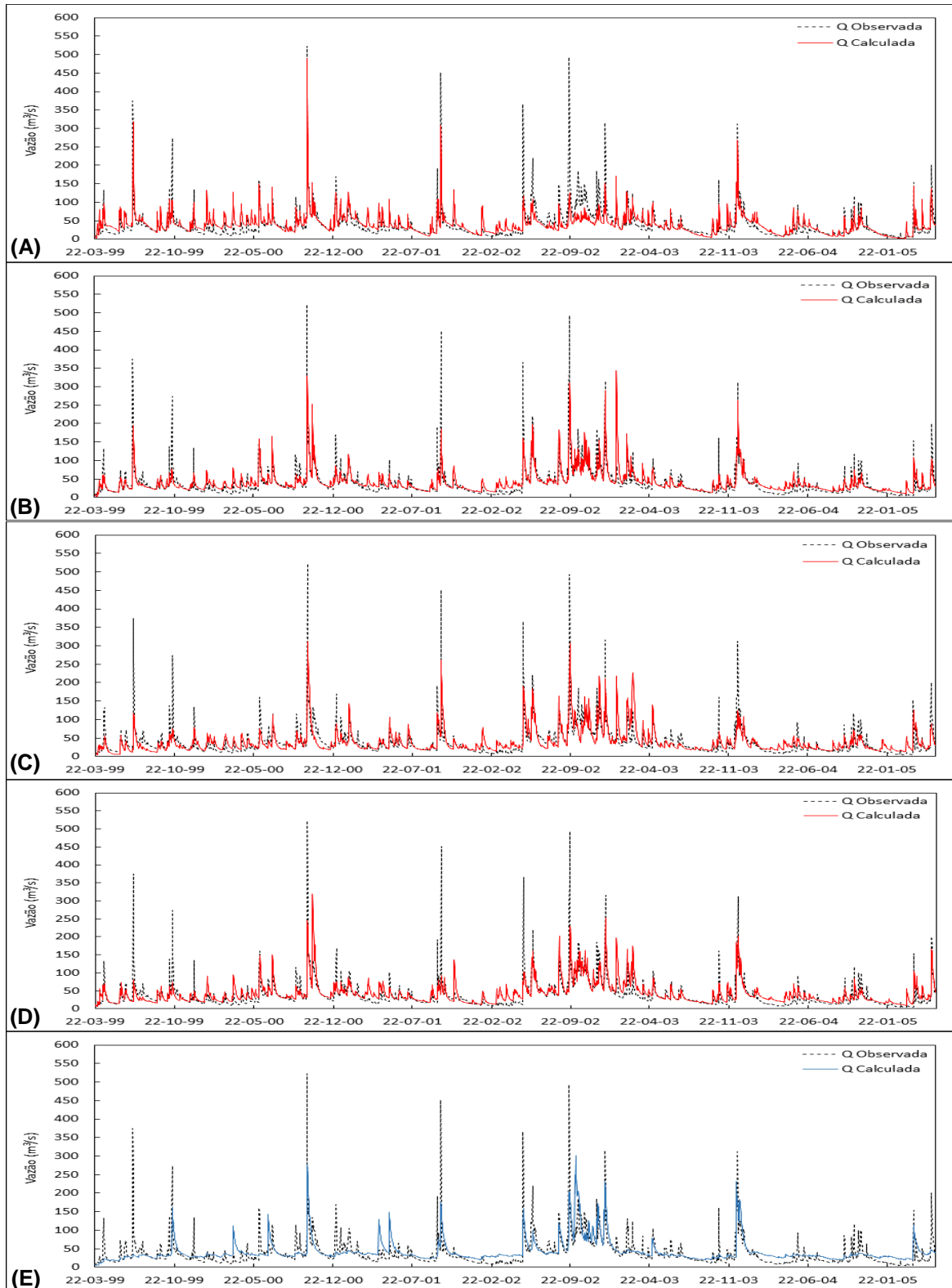


Figura 23 – Hidrogramas das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Turvo, para o período da calibração, referentes **(A)** à condição real de pluviômetros, **(B)** ao cenário com 75%, **(C)** cenário com 50%, **(D)** cenário com 25% e **(E)** aos dados do TRMM.

Fonte: Acervo próprio.

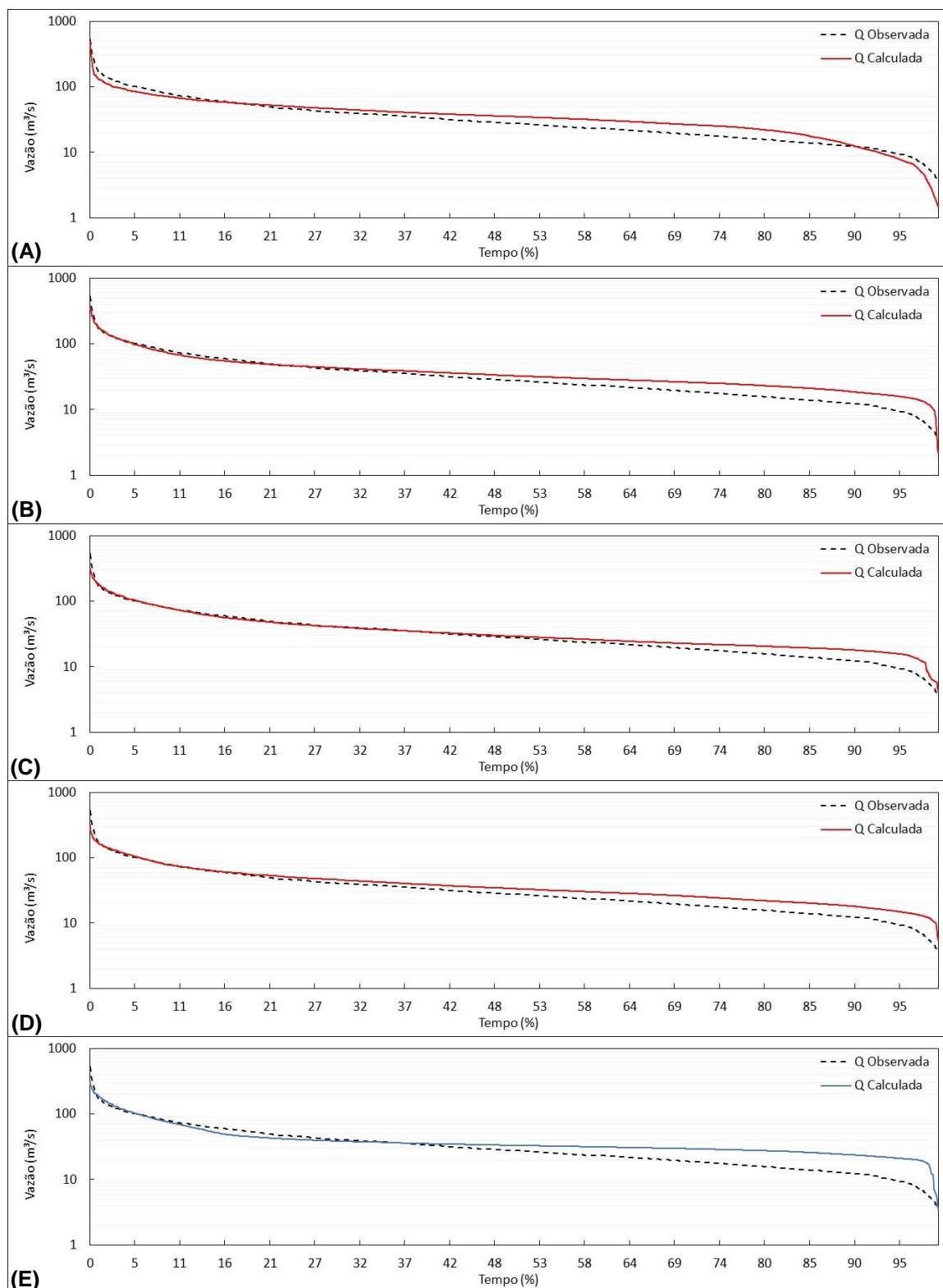


Figura 24 – Curvas de permanência das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Turvo, para o período da calibração, referentes **(A)** à condição real de pluviômetros, **(B)** ao cenário com 75%, **(C)** cenário com 50%, **(D)** cenário com 25% e **(E)** aos dados do TRMM.

Os valores de parâmetros obtidos durante o processo de calibração, para todos os cenários de chuvas médias utilizados, são apresentados na tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros do modelo WIPH2 otimizados para os diferentes cenários de precipitação média, na bacia do rio Turvo.

| Parâmetros | Cenário de precipitação | | | | | Variação dos parâmetros |
|-------------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|----------|-------------------------|
| | Cen Real | Cen 75% | Cen 50% | Cen 25% | Cen TRMM | |
| I_0 (mm.dia ⁻¹) | 100,00 | 122,38 | 196,82 | 135,98 | 180,94 | 22 a 97 % |
| I_b (mm.dia ⁻¹) | 7,54 | 2,65 | 1,31 | 2,63 | 2,62 | -65 a -83 % |
| H (adim) | 0,453 | 0,646 | 0,647 | 0,639 | 0,577 | 27 a 43 % |
| K_s (dia) | 2,12 | 3,68 | 5,88 | 4,72 | 6,94 | 74 a 227% |
| K_{sub} (dia) | 25,28 | 7,20 | 10,00 | 13,62 | 7,34 | -46 a -72 % |
| R_{max} (mm) | 19,99 | 20,00 | 7,21 | 18,10 | 2,96 | 0 a -85% |
| Alfa (adim) | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0 % |

Fonte: Acervo próprio.

Relacionando os parâmetros otimizados em Cen 75%, Cen 50%, Cen 25% e TRMM, com os parâmetros obtidos no Cen Real, notou-se que os valores dos parâmetros em alguns casos aumentaram e em outros diminuíram com relação aos de referência.

O parâmetro referente a infiltração inicial (I_0) apresentou apenas variações positivas, ou seja, o valor de I_0 foi maior para os cenários com 75%, 50%, 25% e TRMM do que para o cenário Real. Variou entre 22 e 97%, sendo a menor acréscimo referente ao I_0 do Cen 75%, que apresentou um valor de 122,38 mm.dia⁻¹, e o maior referente ao Cen 50%, que atingiu 196,82 mm.dia⁻¹.

No entanto, embora o Cen Real seja utilizado como referência, ele não gerou o melhor desempenho do modelo. A melhor simulação da vazão, tanto para o período da calibração como da validação, foi obtida para conjunto de chuva média para o Cen 75%.

Os valores relativamente baixos de I_0 obtidos podem ser explicados pelos tipos de solos presentes na região que, de forma geral, são rasos com alto teor de argila e presença de rochas ainda em decomposição. Estas características dificultam a infiltração da água no solo, tanto inicialmente como em condição de saturação (I_b),

sendo estes últimos mantidos entre 1,31 e 7,54 mm.dia⁻¹. Comparando o cenário de referência com os demais, notou-se que as variações de I_b foram sempre negativas, entre -65 e -85 %, o que indica que os valores encontrados para os outros cenários foram sempre menores.

O parâmetro de velocidade de esvaziamento do reservatório superficial (K_s) foi o mais sensível a mudanças nos cenários de chuva média, chegando a apresentar valores 227% superiores aos de referência. Esse valor superior foi encontrado para a calibração com as médias de precipitação geradas pelas estimativas do satélite.

A capacidade de armazenamento representada pelo R_{max} variou de 2,96 a 20,00 mm, chegando a um valor 85% menor do que o obtido para o cenário Real. Estas variações nos parâmetros são formas de compensar as diferentes médias fornecidas ao modelo e possíveis erros em outras informações de entrada, como, por exemplo, nos dados de evapotranspiração real, que se deu pela estimativa de poucas estações de clima presentes na bacia e seu entorno. O parâmetro *Alfa* não se mostrou sensível a mudança nos dados de entrada de precipitação, mantendo o mesmo valor para todos os cenários.

De maneira geral, o conjunto de parâmetros resultantes da calibração com os dados do satélite TRMM não apresentou nenhuma discrepância em relação aqueles obtidos com dados pontuais de precipitação, mantendo as mesmas variações buscando compensar possíveis erros fornecidos ao modelo. No entanto, sua simulação teve o pior desempenho, apresentando o menor coeficiente de NS dentre os conjuntos de chuva média analisados, como pode ser observado quando se comparam as figuras 23 e 24, entre as simulações com as informações de pluviômetros com a simulação com dados do TRMM.

5.4.2 Aplicação do WIPH2 na bacia do Rio Ijuí

Para a calibração dos parâmetros do WIPH2, para a bacia do Rio Ijuí, considerou-se o período de 24 de fevereiro de 1999 a 31 de março de 2002, e o período de validação ficou compreendido entre 10 de janeiro de 2006 e 21 de setembro de 2007, conforme figura 25.

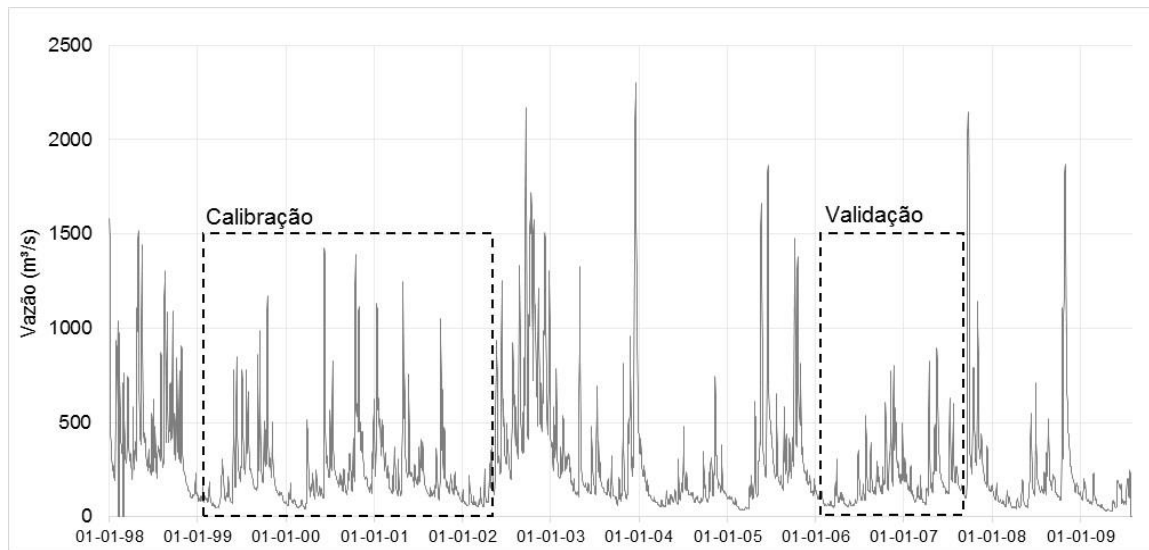


Figura 25 – Série histórica de vazão da estação fluviométrica Ponte Mística, utilizada como exutório da bacia hidrográfica do rio Ijuí.

Fonte: Acervo próprio.

Esta bacia apresentou resultados interessantes em relação aos cenários de monitoramento. O melhor desempenho do modelo WIPH2 se deu quando se utilizou de toda a rede pluviométrica disponível para o período de estudo, com $R = 0,94$ e $NS = 0,87$ (Tabela 13), para o período da calibração, com piora nos resultados conforme a densidade de pluviômetros distribuídos pela bacia diminuiu para os cenários com 75 e 50% dos equipamentos. Já o cenário com 25% dos pluviômetros, a calibração foi de boa qualidade, superior ao demais cenário de monitoramento, apresentando $R = 0,93$ e $NS = 0,86$ na calibração.

Tabela 13 – Coeficientes de avaliação resultantes das calibrações e validações do modelo WIPH2, para a bacia do Rio Ijuí.

| Etapa | Coeficiente de avaliação | Cenário de precipitação | | | | |
|------------|--------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|----------|
| | | Cen Real | Cen 75% | Cen 50% | Cen 25% | Cen TRMM |
| Calibração | R | 0,94 | 0,89 | 0,86 | 0,93 | 0,82 |
| | NS | 0,87 | 0,77 | 0,74 | 0,86 | 0,67 |
| Validação | R | 0,88 | 0,87 | 0,86 | 0,84 | 0,75 |
| | NS | 0,65 | 0,68 | 0,47 | 0,59 | - 0,57 |

Fonte: Acervo próprio.

Este resultado provavelmente tenha sido obtido pela compensação de algum parâmetro no Cen 25%. De acordo com a tabela 10, o Cen 25% previu um volume de chuva 5% menor em relação ao Cen Real, e como consequência deste menor volume de chuva, alguns parâmetros tiveram seu valor alterado, possibilitando gerar o mesmo volume escoado superficialmente.

Provavelmente, a causa do melhor desempenho do Cen 25% foi a distribuição uniforme das estações pluviométricas, com pluviômetros na cabeceira, porção média e exutório da bacia, que geraram resultados superiores aos Cen 50% e 75%, nos quais a distribuição não teve uniformidade. Nesta simulação do modelo, a característica de adequada distribuição dos pluviômetros foi mais importante do que a própria densidade de estações na bacia. Obviamente uma maior densidade de estações de pluviométricas aliadas a uma boa distribuição produzem resultados superiores na representação da precipitação.

As vazões simuladas com os dados do TRMM foram as que apresentaram os piores resultados, dentre os cenários de precipitação avaliados. Tanto para os cenários de precipitação gerados a partir dos dados dos pluviômetros, como para aquele gerado a partir de dados estimados pelo TRMM, foi possível observar que algumas vazões extremas foram igualmente sub ou superestimadas.

Entretanto, as vazões não são efetivamente medidas e sim estimadas por meio de equações, denominadas curvas-chaves, que obviamente possuem R inferior a 1. Sendo assim, por melhor que seja o ajuste destas equações, alguns dados de vazão calculados não serão totalmente fiéis aos dados de vazão reais da bacia, além da própria incapacidade do modelo em reproduzir fielmente o valor observado.

Na figura 26 são apresentadas as simulações de vazões geradas para o período da calibração dos parâmetros do modelo WIPH2, considerando os diferentes conjuntos de chuvas médias obtidos dos pluviômetros, e na figura 27 as curvas de permanência, que se mostraram adequadas para as vazões médias e máximas, com menor qualidade para vazões de base. Possivelmente em razão da função objetivo utilizada para a calibração do modelo (coeficiente de Nash-Sutcliffe), que tende a ajustar e produzir melhores resultados para as vazões máximas.

Os resultados dos hidrogramas e das curvas de permanência, gerados pelo WIPH2 para o período de validação estão apresentados no Apêndice B.

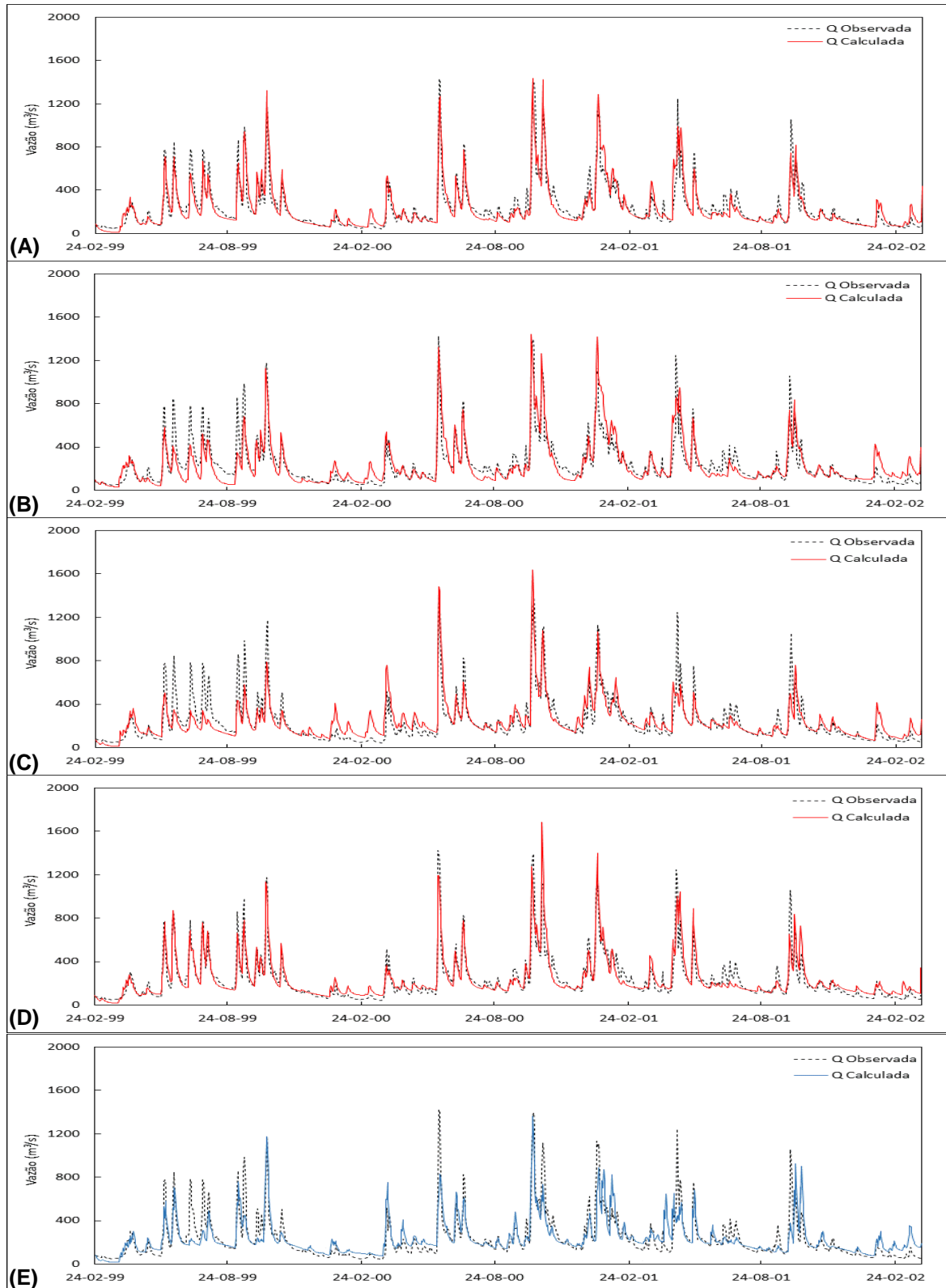


Figura 26 – Hidrogramas das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Ijuí, para o período da calibração, referentes **(A)** à condição real de pluviômetros, **(B)** ao cenário com 75%, **(C)** cenário com 50%, **(D)** cenário com 25% e **(E)** aos dados do TRMM.

Fonte: Acervo próprio.

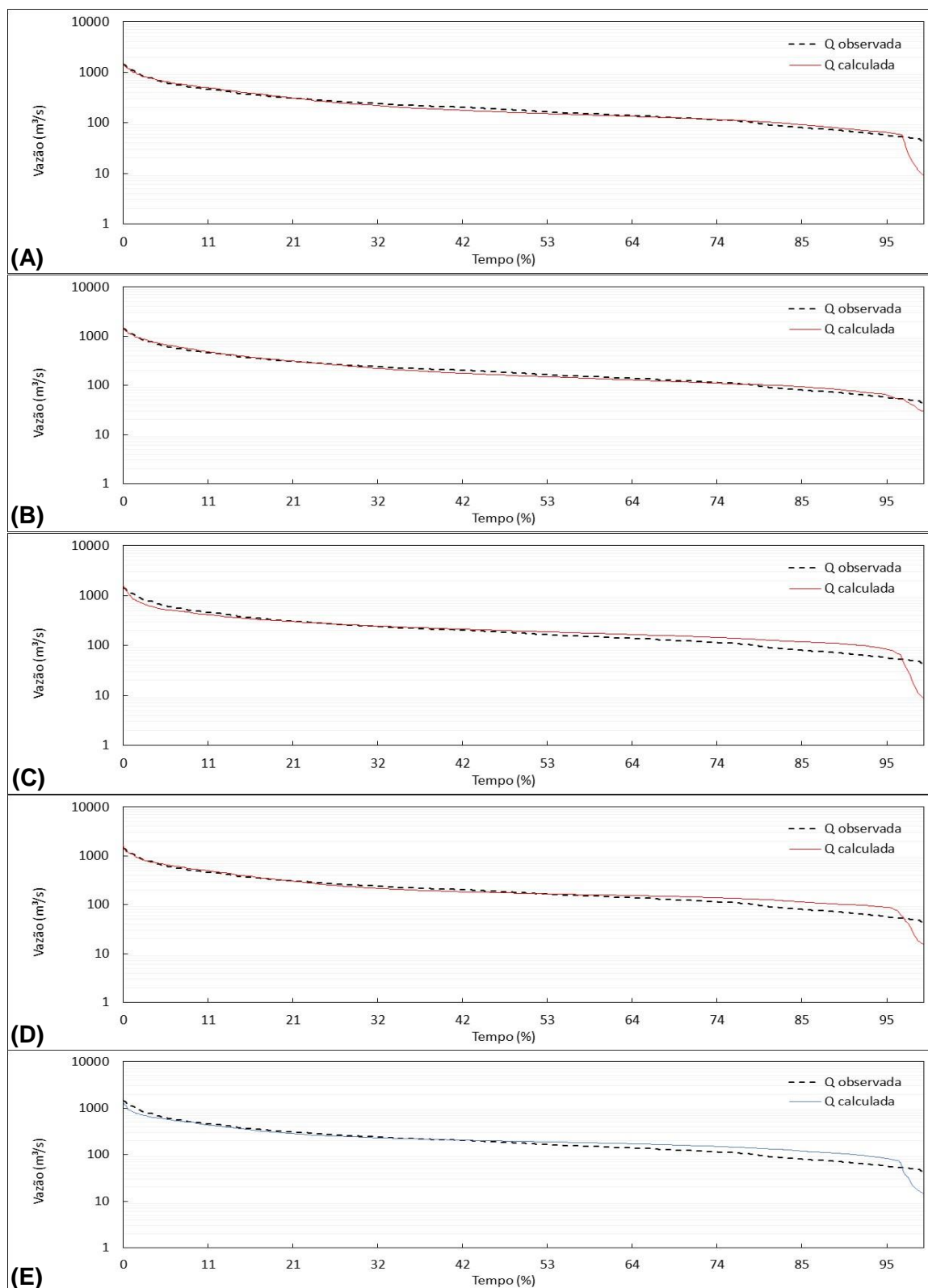


Figura 27 – Curvas de permanência das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Ijuí, para o período da calibração, referentes **(A)** à condição real de pluviômetros, **(B)** ao cenário com 75%, **(C)** cenário com 50%, **(D)** cenário com 25% e **(E)** aos dados do TRMM.

Fonte: Acervo próprio.

Para o período da verificação dos parâmetros do modelo, os coeficientes de avaliação da qualidade do ajuste das vazões apresentaram valores extremamente baixos, como observado na tabela 13. Possivelmente, esse resultado se deu, dentre outros fatores, devido à diferença de umidade entre os períodos de calibração e validação do modelo. A calibração contou com vazões maiores, com muitos picos próximos à $1.500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, com um valor médio de $236 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, enquanto a série de validação apresentou vazões sempre abaixo de $1.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, com uma média de $186 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Como o coeficiente de NS é sensível ao ajuste das vazões de picos, a sua redução para o período da validação pode ser explicada pela menor umidade deste em relação ao outro, que, conseqüentemente, causou a superestimativa das vazões, principalmente para o cenário com dados do TRMM.

Os valores dos parâmetros obtidos a partir da calibração com os diferentes cenários de chuva média, são apresentados na tabela 14.

Tabela 14 – Parâmetros do modelo WIPH2 otimizados para os diferentes cenários de precipitação média, para bacia do Rio Ijuí.

| Parâmetros | Cenário de precipitação | | | | | Variação dos parâmetros |
|-------------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|----------|-------------------------|
| | Cen Real | Cen 75% | Cen 50% | Cen 25% | Cen TRMM | |
| I_0 (mm.dia ⁻¹) | 82,05 | 138,32 | 105,56 | 96,61 | 144,58 | 18 a 76 % |
| I_b (mm.dia ⁻¹) | 1,50 | 1,26 | 2,31 | 1,62 | 2,03 | -16 a 54 % |
| H (adim) | 0,60 | 0,53 | 0,61 | 0,50 | 0,35 | -42 a 02 % |
| K_s (dia) | 4,79 | 6,27 | 4,62 | 4,55 | 3,10 | -05 a 31 % |
| K_{sub} (dia) | 20,42 | 475,09 | 10,00 | 31,68 | 26,09 | -51 a 2.227 % |
| R_{max} (mm) | 19,99 | 9,39 | 12,04 | 14,99 | 14,99 | -53 a -25 % |
| Alfa (adim) | 0,03 | 0,17 | 0,03 | 0,23 | 0,31 | 0 a 667 % |

Fonte: Acervo próprio.

A infiltração inicial (I_0) variou de 82,05 a 144,58 mm.dia⁻¹, atingindo valor entre 18 e 76% superior ao obtido para a calibração para o Cen Real, considerada a informação de referência. De maneira geral, os resultados deste parâmetro foram considerados baixos, pois apesar do solo conter alto teor de argila em profundidade, são profundos e caracterizados por apresentar uma forte drenagem, resultado da

macro-porosidade gerada pela organização estrutural das partículas coloidais do solo (CASTRO, 1996 *apud* SILVA JÚNIOR et al., 2003). O maior valor de I_0 e Alfa ocorreu quando realizada a simulação com dados do TRMM, mas, de maneira geral, os parâmetros otimizados para o Cen TRMM se mantiveram na mesma faixa de valores encontrados para a calibração com dados pontuais, não apresentando nenhum valor discrepante, fora das capacidades reais da bacia, como ocorreu com o valor do parâmetro de propagação do escoamento subterrâneo – K_{sub} , do Cen 75%.

O K_{sub} do Cen 75% apresentou um valor extremamente alto, a fim de manter um bom ajuste, no entanto, fisicamente este parâmetro assumiu valor fora do esperado, já que o tempo médio de propagação do escoamento subterrâneo não está na faixa de 475 dias. Esse valor foi 2.227% superior ao obtido para o cenário Real. Para os demais conjuntos de chuva média, o K_{sub} também apresentou valores altos, uma provável compensação de outros valores incertos.

A capacidade de armazenamento representada pelo R_{max} variou entre 9,39 mm, obtido para o Cen 75%, e 19,99 mm, para o cenário Real. Estas variações nos parâmetros, assim como na bacia do Turvo, podem ser formas de compensar as diferentes informações médias de chuva fornecidas ao modelo e possíveis erros em outras informações de entrada.

5.4.3 Aplicação do WIPH2 na bacia do Rio Jacuí

Para a calibração dos parâmetros do WIPH2, para a bacia do Rio Jacuí, considerou-se o período de 02 de janeiro de 2005 a 31 de dezembro de 2008, e o período de validação entre 24 de julho de 2012 e 29 de julho de 2014, conforme figura 28.

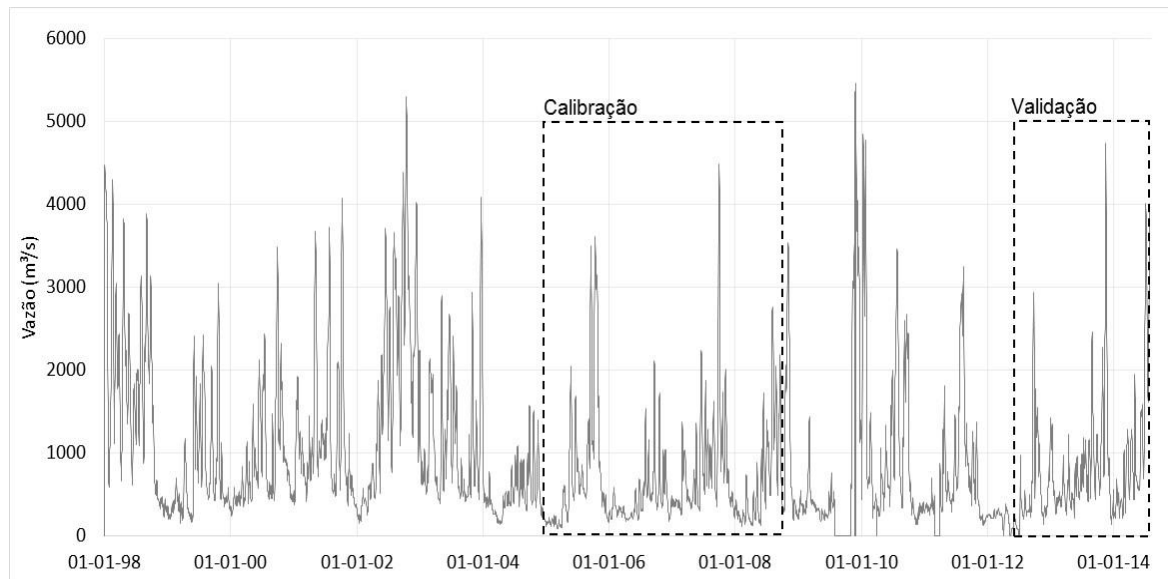


Figura 28 – Série histórica de vazão da estação fluviométrica Rio Pardo, utilizada como exutório da bacia hidrográfica do rio Jacuí.

Fonte: Acervo próprio.

A calibração do modelo WIPH2 foi realizada de maneira independente para cada um dos cinco cenários de chuva média (Cen Real, Cen 75%, Cen 50%, Cen 25% e Cen TRMM). O melhor desempenho do WIPH2 se deu para o Cen Real, com NS de 0,90 e R de 0,95, na calibração. O resultado dos coeficientes de avaliação NS e R reduziram conforme a densidade de pluviômetros distribuídos pela bacia diminuiu para o Cen 75 e 50%, com NS caindo para 0,88 e 0,86, respectivamente (Tabela 15).

Tabela 15 – Coeficientes de avaliação resultantes das calibrações e validações do modelo WIPH2, para a bacia do Rio Jacuí.

| Etapa | Coeficiente de avaliação | Cenário de precipitação | | | | |
|------------|--------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|----------|
| | | Cen Real | Cen 75% | Cen 50% | Cen 25% | Cen TRMM |
| Calibração | R | 0,95 | 0,94 | 0,93 | 0,86 | 0,89 |
| | NS | 0,90 | 0,88 | 0,86 | 0,73 | 0,77 |
| Validação | R | 0,82 | 0,81 | 0,79 | 0,68 | 0,79 |
| | NS | 0,66 | 0,64 | 0,58 | 0,39 | 0,57 |

Fonte: Acervo próprio.

No Cen 25% a redução da qualidade da simulação das vazões foi alta, atingindo um coeficiente de NS de 0,73, mas ainda assim considerado satisfatório. Possivelmente, esta “piora” esteja relacionada à problemas relacionados à precipitação média determinada neste cenário, já que analisando a figura 18 é possível notar que a distribuição de estações pluviométricas é totalmente não-uniforme, localizadas apenas nas áreas de cabeceira.

Para esta bacia, o Cen TRMM produziu melhores resultados quando comparados com os gerados pelo Cen 25%, com R e NS passando de 0,86 e 0,73 para 0,89 e 0,77, respectivamente, no período da calibração. Para o período de verificação essa diferença foi ainda maior, sendo o R de 0,68 e o NS de 0,39, para o Cen 25%, em contraste com os dados do satélite, com R de 0,79 e NS de 0,57.

Os resultados gerados para o Cen 25% e para o Cen TRMM, confirmam a importância da boa distribuição dos pluviômetros na representação da precipitação, indicando que em condições de elevada escassez de monitoramento pluviométrico aliada a uma má distribuição espacial destes equipamentos, é mais confiável a utilização de estimativas de satélite.

As curvas de permanência representaram melhor as vazões máximas em relação às de base, provavelmente em razão da função objetivo escolhida (coeficiente de Nash-Sutcliffe), que tende a ajustar melhor os picos.

No período da validação do modelo houve uma redução considerável na qualidade das simulações de vazões, para todos os cenários de monitoramento. O número de falhas nas séries históricas de vazão e precipitação das estações, tornaram o período de validação/calibração restrito a alguns anos, e por isso, muitas vezes é inviável escolher períodos de umidades próximas, o que provavelmente pode causar a redução da qualidade dos modelos. Para esta bacia a diferença de umidade entre ambos os períodos foi mínima, com vazão média de $723 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para a calibração e $780,85 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para a validação. Mas essa diferença pode ter sido a causa da redução da qualidade; ou até mesmo a diferenças entre os conjuntos de chuva utilizados como informação de entrada.

Na figura 29 são apresentadas as séries de vazões simuladas obtidas das calibrações com os diferentes cenários de precipitação média, e na figura 30, as curvas de permanência geradas pelo WIPH2. Os resultados das simulações e das curvas de permanência para o período da validação constam no Apêndice B.

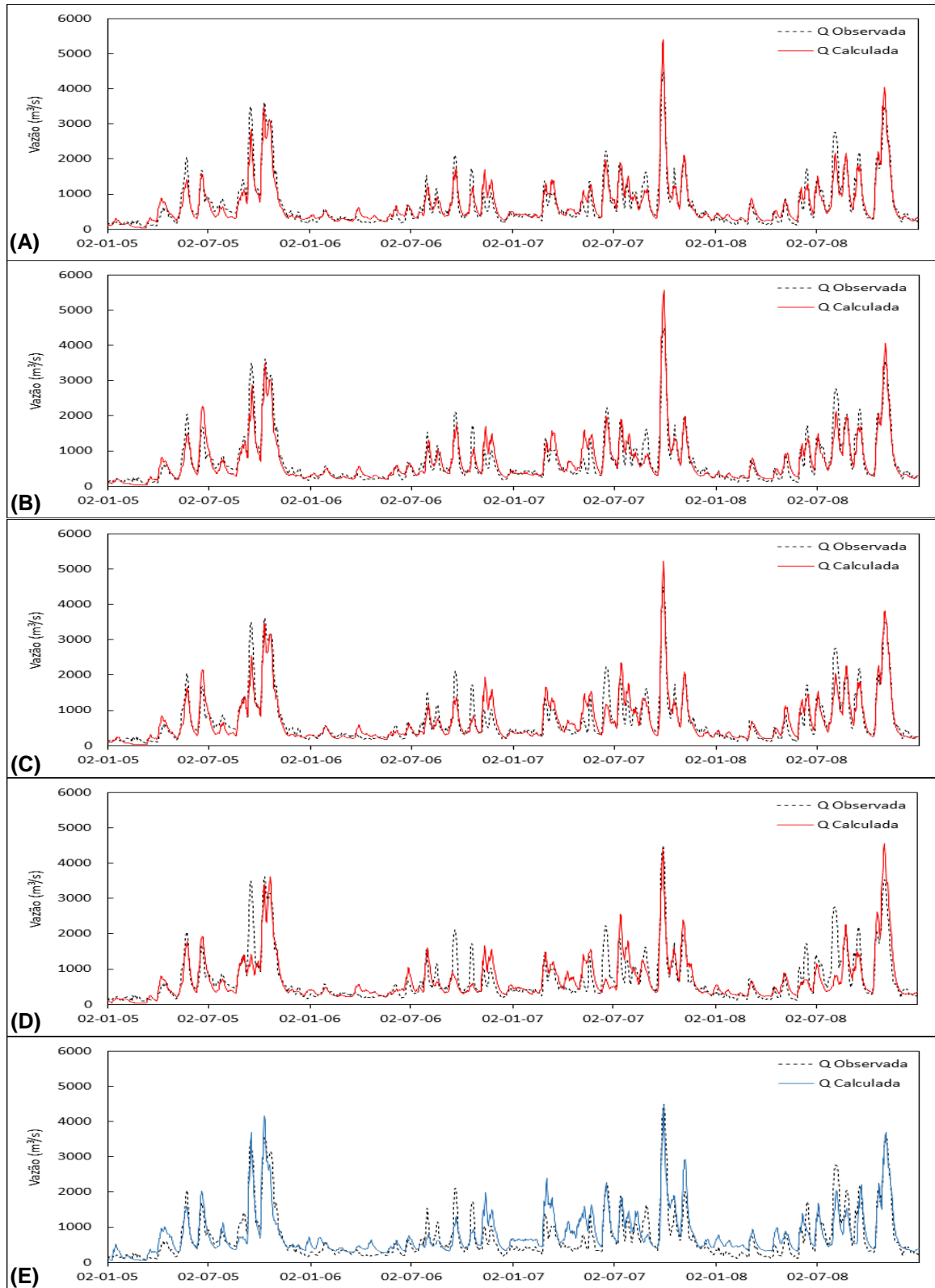


Figura 29 – Hidrogramas das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Jacuí, para o período da calibração, referentes (A) à condição real de pluviômetros, (B) ao cenário com 75%, (C) cenário com 50%, (D) cenário com 25% e (E) aos dados do TRMM.

Fonte: Acervo próprio.

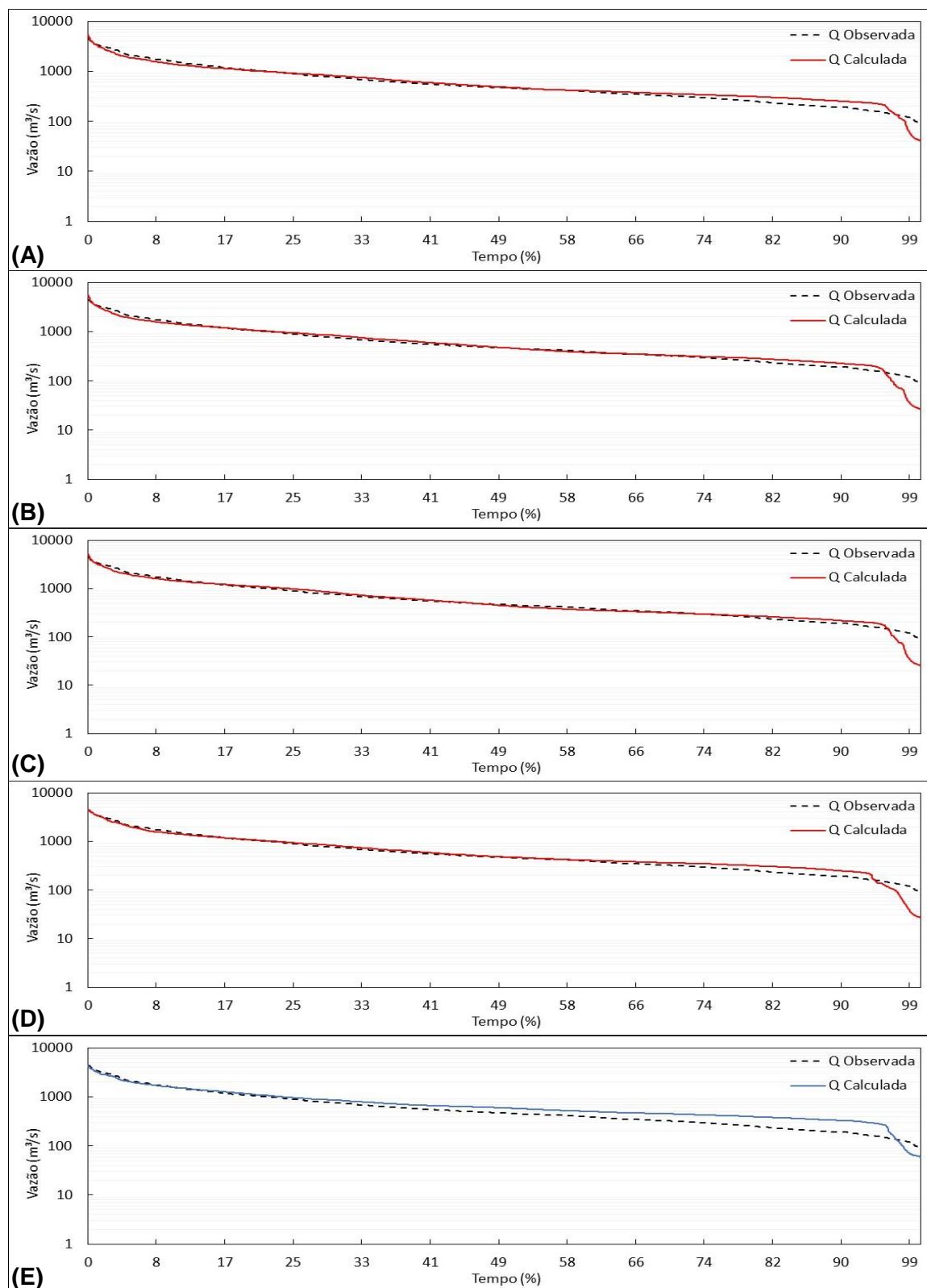


Figura 30 – Curvas de permanência das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Jacuí, para o período da calibração, referentes **(A)** à condição real de pluviômetros, **(B)** ao cenário com 75%, **(C)** cenário com 50%, **(D)** cenário com 25% e **(E)** aos dados do TRMM.

Fonte: Acervo próprio.

Os valores dos parâmetros obtidos a partir da calibração com os diferentes conjuntos de chuva média, para a bacia do rio Jacuí, são apresentados na tabela 16.

Tabela 16 – Parâmetros do modelo WIPH2 otimizados para os diferentes cenários de monitoramento pluviométrico, para bacia do Rio Jacuí.

| Parâmetros | Cenário de precipitação | | | | | Variação dos parâmetros |
|-------------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|----------|-------------------------|
| | Cen Real | Cen 75% | Cen 50% | Cen 25% | Cen TRMM | |
| l_0 (mm.dia ⁻¹) | 159,94 | 144,49 | 112,38 | 114,64 | 182,87 | -30 a 14 % |
| l_b (mm.dia ⁻¹) | 0,70 | 0,69 | 0,59 | 0,78 | 0,98 | -16 a 40 % |
| H (adim) | 0,62 | 0,63 | 0,73 | 0,75 | 0,58 | -06 a 21 % |
| K_s (dia) | 5,69 | 5,98 | 6,05 | 6,13 | 5,69 | -108 a 19 % |
| K_{sub} (dia) | 8,63 | 12,36 | 13,39 | 12,41 | 20,88 | 43 a 142 % |
| R_{max} (mm) | 2,46 | 6,67 | 5,07 | 7,58 | 6,88 | 106 a 208 % |
| Alfa (adim) | 0,28 | 0,39 | 0,16 | 0,16 | 0,01 | -96 a 39 % |

Fonte: Acervo próprio.

O parâmetro l_0 foi um dos parâmetros que menos variou, juntamente com l_b e H, em relação aos diferentes conjuntos de chuva média utilizados como entrada no modelo. Se manteve mais alto nesta bacia do que nas demais bacias escolhidas para análise, com valor entre 112,38 e 182,87 mm.dia⁻¹, e l_b mais baixo, de 0,59 a 0,89 mm.dia⁻¹, para os conjuntos de chuva média utilizados na calibração do modelo WIPH2. Dentre as 4 bacias em análise, esta é a única que não faz parte das sub-bacias do Rio Uruguai, e a que apresenta o tipo de solo e o relevo mais distintos em relação as demais. E este relevo, mais plano, foi possivelmente o responsável por estes valores.

A capacidade de armazenamento representada pelo R_{max} foi o parâmetro que mais variou, com valores entre 2,46 mm para o cenário Real, a 7,58 mm para o Cen 25%, com aumento de 208%. A calibração dos parâmetros a partir dos dados do satélite TRMM foi a que apresentou maior l_0 , mas os parâmetros, de maneira geral, se mantiveram na mesma faixa de valores encontrados para a calibração com dados pontuais, com exceção de K_{sub} e alfa.

5.4.4 Aplicação do WIPH2 na bacia do rio Alto Uruguai

Para a calibração dos parâmetros do WIPH2, para a bacia do Alto Uruguai, considerou-se o período de 05 de junho de 2000 a 28 de fevereiro de 2005, com um pico de vazão atingindo $15.226 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, contando com uma média de $1.700 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ para esse período. A validação contou com as séries históricas compreendidas entre 27 de agosto de 2005 e 08 de setembro de 2009, e a vazão com um valor médio de $1.485 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 31).

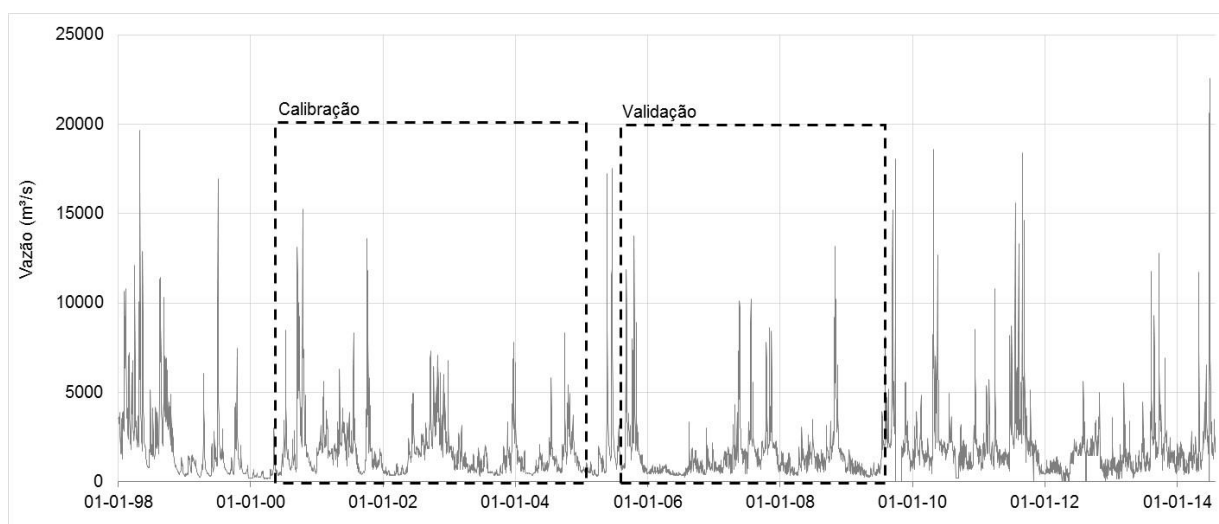


Figura 31 – Série histórica de vazão da estação fluviométrica Iraí, utilizada como exutório da bacia hidrográfica do Alto Uruguai.

Fonte: Acervo próprio.

A calibração dos parâmetros do modelo foi realizada de maneira independente para cada um dos cinco cenários de chuva média (Cen Real, Cen 75%, Cen 50%, Cen 25% e Cen TRMM). O resultado dos coeficientes de avaliação NS e R são apresentados na tabela 17, tanto para o período da calibração como da validação do modelo, o que possibilita uma melhor comparação entre os resultados gerados pelos diferentes conjuntos de chuvas médias.

Tabela 17 – Coeficientes de avaliação resultantes das calibrações e validações do modelo WIPH2, para a bacia do Alto Uruguai.

| Etapa | Coeficiente de avaliação | Cenário de precipitação | | | | |
|------------|--------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|----------|
| | | Cen Real | Cen 75% | Cen 50% | Cen 25% | Cen TRMM |
| Calibração | R | 0,84 | 0,85 | 0,83 | 0,84 | 0,78 |
| | NS | 0,71 | 0,71 | 0,69 | 0,70 | 0,61 |
| Validação | R | 0,76 | 0,75 | 0,72 | 0,76 | 0,62 |
| | NS | 0,54 | 0,53 | 0,49 | 0,55 | 0,06 |

Fonte: Acervo próprio.

O ajuste do modelo para esta bacia se mostrou inferior aos cenários das bacias dos rios Ijuí e Jacuí, o que era esperado devido ao tamanho da bacia do Alto Uruguai e ao tipo do modelo (concentrado). Como pode ser visto na figura 32, a avaliação gráfica dos hidrogramas gerados para as vazões observadas e calculadas não se ajustou nem para as vazões máximas nem para as mínimas, apesar de os coeficientes NS se apresentarem superiores a 0,5.

As curvas de permanência fornecidas pelo WIPH2, não se apresentaram tão ruins quanto os hidrogramas, podendo-se destacar o resultado dos dados gerados pelo TRMM, que mostraram o melhor ajuste das vazões, especialmente para as vazões de base (Figura 33). Os hidrogramas e as curvas de permanência geradas para o período da validação estão apresentadas no Apêndice B.

Estudos anteriores indicaram uma alta heterogeneidade nas características físicas desta bacia, o que provavelmente influenciou o desempenho do modelo concentrado WIPH2 que, apesar da maior praticidade na simulação das vazões, pode não ser aplicável a bacias com alta variabilidade espacial.

Na figura 32 são apresentadas as séries de vazões simuladas obtidas das calibrações com os diferentes cenários de precipitação média, e na figura 33, as curvas de permanência geradas pelo WIPH2. Os resultados das simulações e das curvas de permanência para o período da validação constam no Apêndice B.

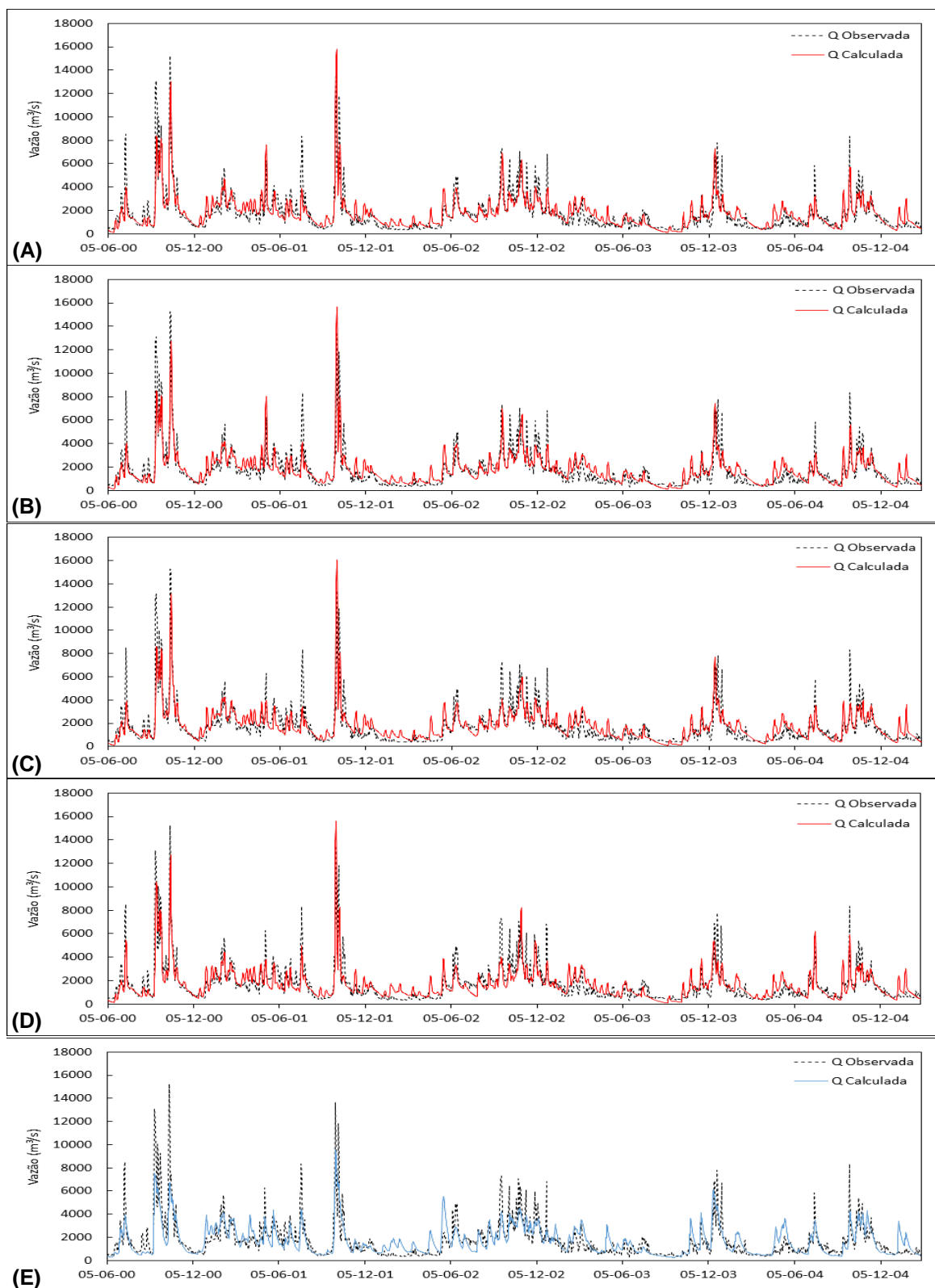


Figura 32 – Hidrogramas das vazões calculadas e observadas na bacia do Alto Uruguai, para o período da calibração, referentes (A) à condição real de pluviômetros, (B) ao cenário com 75%, (C) cenário com 50%, (D) cenário com 25% e (E) aos dados do TRMM.

Fonte: Acervo próprio.

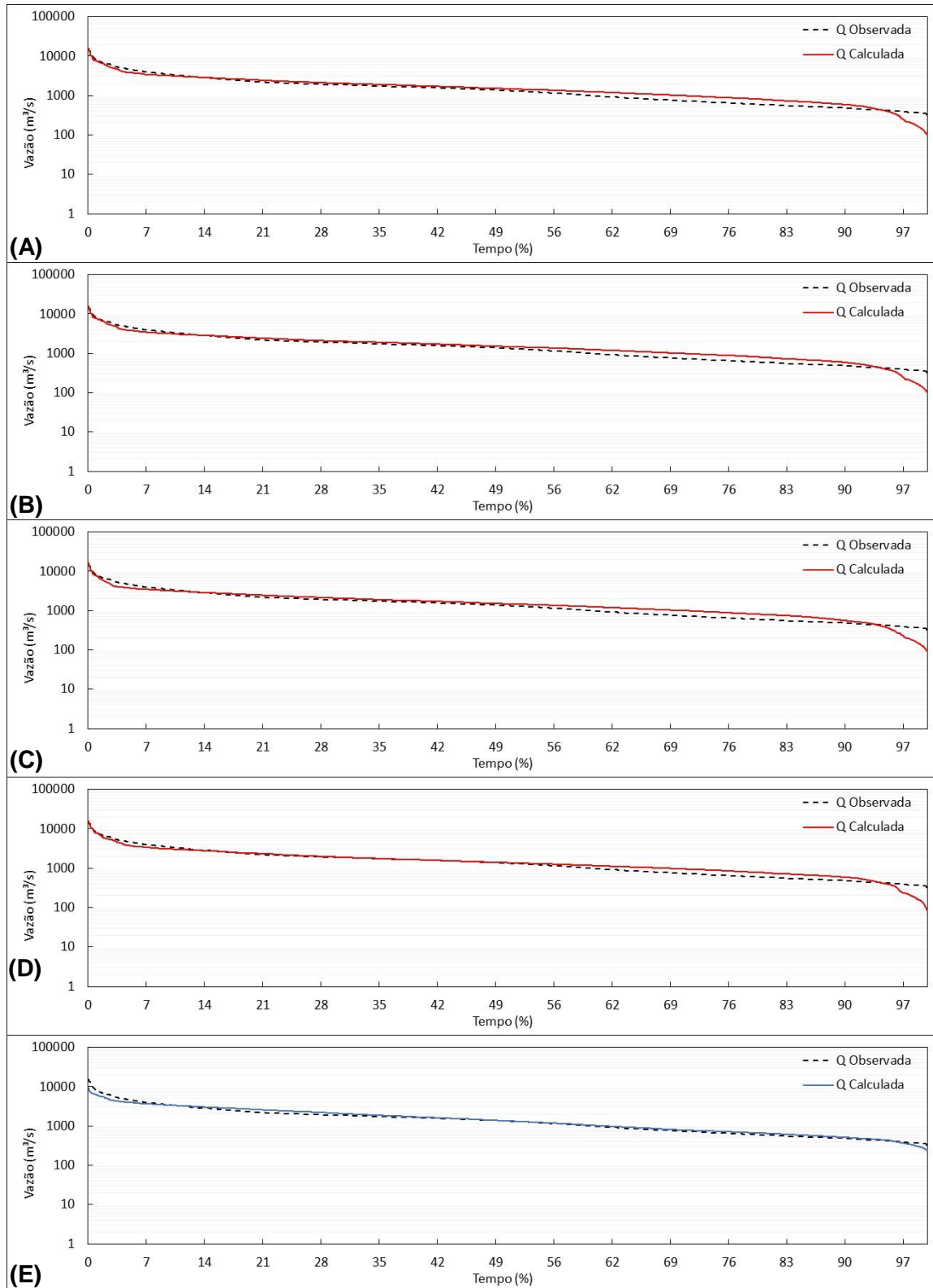


Figura 33 – Hidrogramas das vazões calculadas e observadas na bacia do Alto Uruguai, para o período da calibração, referentes **(A)** à condição real de pluviômetros, **(B)** ao cenário com 75%, **(C)** cenário com 50%, **(D)** cenário com 25% e **(E)** aos dados do TRMM.

Fonte: Acervo próprio.

Além da característica de alta heterogeneidade, a bacia do Alto Uruguai ainda conta com alterações na dinâmica do regime hidrológico local, principalmente causadas pelo barramento dos cursos de água ocasionado pela instalação de inúmeras usinas hidrelétricas. O alto potencial de geração de energia, torna a porção alta do Rio Uruguai a mais propícia para a implantação desta atividade econômica.

Dentre as principais usinas hidrelétricas localizadas na bacia do Alto Uruguai, delimitada neste estudo, destacam-se a Usina Hidrelétrica de Campos Novos (SC), instalada no Rio Canoas, uma das mais altas do mundo, com 202 m de extensão e 592 m de comprimento; Usina Hidrelétrica de Barra Grande (RS-SC), construída no Rio Pelotas; Usina Hidrelétrica de Machadinho (RS-SC), no Rio Pelotas, a 1,2 km a jusante do Rio Inhandava; Usina Hidrelétrica de Itá (RS-SC), que é maior do Rio Grande do Sul, localizada no Rio Uruguai e; Usina Hidrelétrica Foz do Chapecó (RS-SC), com 598 m de extensão e 48 m de altura, localizada no Rio Uruguai, além inúmeras PCH's (Pequena Central Hidrelétrica) localizadas na região.

Os valores dos parâmetros obtidos a partir da calibração com os diferentes cenários de chuva média, para a bacia do Alto Uruguai, são apresentados na tabela 18.

Tabela 18 – Parâmetros do modelo WIPH2 otimizados para os diferentes cenários de monitoramento pluviométrico, para bacia do Alto Uruguai.

| Parâmetros | Cenário de precipitação | | | | | Variação dos parâmetros |
|-------------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|----------|-------------------------|
| | Cen Real | Cen 75% | Cen 50% | Cen 25% | Cen TRMM | |
| I_0 (mm.dia ⁻¹) | 100,01 | 100,00 | 120,46 | 131,06 | 115,04 | 0 a 31 % |
| I_b (mm.dia ⁻¹) | 3,39 | 3,64 | 3,78 | 3,37 | 0,86 | -75 a 12 % |
| H (adim) | 0,247 | 0,252 | 0,183 | 0,194 | 0,044 | -82 a 02 % |
| K_s (dia) | 1,54 | 1,31 | 1,28 | 0,99 | 8,21 | -36 a 433 % |
| K_{sub} (dia) | 12,95 | 12,19 | 11,39 | 9,27 | 58,05 | -28 a 348 % |
| R_{max} (mm) | 19,99 | 19,99 | 19,99 | 19,99 | 14,21 | -29 a 0 % |
| Alfa (adim) | 0,09 | 0,14 | 0,04 | 0,06 | 1,04 | -56 a 1.056 % |

Fonte: Acervo próprio.

O parâmetro I_0 obtido para a condição com 100% das estações pluviométricas foi de 100,01 mm.dia⁻¹, com aumento de até 31%, obtido para o cenário com 25%

das estações. I_b apresentou grande variação, diminuindo seu valor em até 75% (mantendo o Cen Real como informação de referência). De maneira geral, os parâmetros apresentaram alta variabilidade, atingindo aumentos de até 1.056%, para o parâmetro Alfa.

Com exceção do I_b todos os demais parâmetros, obtidos pela calibração com a chuva média do satélite, apresentaram valores mais distantes dos obtidos pelo cenário Real. Além do Alfa, o K_s e o K_{sub} apresentaram valores de 348 e 433%, superiores, respectivamente, aos obtidos com informações de pluviômetros.

Suspeita-se, no entanto, que a falta de adequação do modelo não tem como causa os erros nos dados de entrada de precipitação, mas sim das próprias características da bacia. Sendo assim, não pode-se afirmar que a distorção dos parâmetro está relacionada com a falta de qualidade das estimativas do satélite.

5.5 Efeito de escala na modelagem com dados do TRMM

O intuito do trabalho foi avaliar a precipitação estimada pelo satélite TRMM, em termos de qualidade de vazão simulada, quando utilizada como informação de entrada no modelo concentrado IPH II em sua versão para *Windows*® (WIPH2). As vazões simuladas, por meio dos dados do satélite, foram comparadas com as simuladas a partir de informações pluviométricas obtidas por diferentes distribuição e quantidade de pluviômetros, em diferentes escalas de drenagem de bacias hidrográficas.

Levando-se em consideração a influência da área de drenagem das bacias nos resultados, notou-se que o desempenho do WIPH2, de maneira geral, melhorou conforme houve um aumento da área da bacia até determinada escala, a partir da qual o modelo apresentou redução da qualidade do seu ajuste.

Esta análise fica evidente quando os resultados são apresentados graficamente. Na figura 34, pode-se observar o aumento na qualidade das vazões simuladas no período da calibração, tendo como base numérica o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), para todos os cenários, conforme a área da bacia aumenta de 1.540 km² (bacia do Rio Turvo) para 38.700 km² (bacia do Rio Jacuí).

Para a bacia do Alto Uruguai (61.900 km²), a qualidade da calibração dos parâmetros do WIPH2 foi reduzida para todos cenários, levando-se em consideração o NS. Provavelmente, este resultado foi gerado devido às características heterogêneas desta bacia, que o modelo concentrado WIPH2 não conseguiu representar.

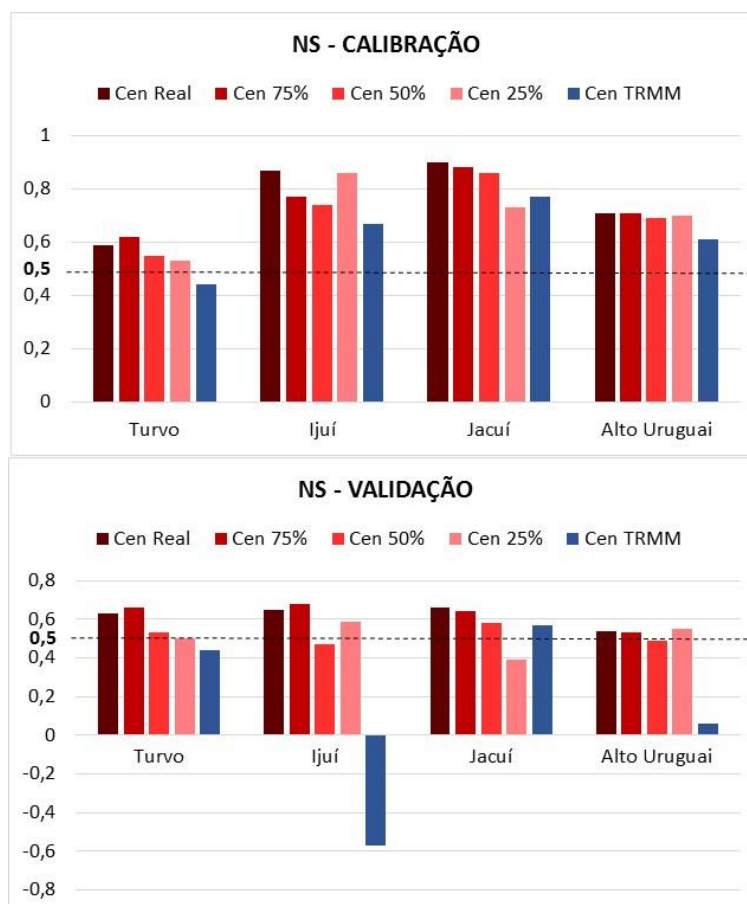


Figura 34 – Comportamento do coeficiente de Nash-Sutcliffe em relação à escala de drenagem das bacias hidrográficas, para o período de calibração e validação do WIPH2.

Fonte: Acervo próprio.

O período da validação não apresentou o mesmo padrão de comportamento, com alguns cenários apresentando NS menor do que 0,5, considerados não aceitáveis, de acordo com Collischonn (2006). Esses comportamentos foram anteriormente mostrados e discutidos em função da diferença de umidade entre o

período da calibração e validação dos parâmetros do WIPH2, e/ou erros nos dados das chuvas médias espacializadas nos cenários com baixa quantidade e má distribuição de pluviômetros pela área.

Quando se analisa o coeficiente de correlação (R), esse resultado fica ainda mais nítido para o período da calibração (Figura 35), em que os cenários apresentaram um aumento no R, em termos médios entre os cenários de uma mesma bacia, até a bacia do Rio Jacuí, com decréscimo para a bacia do Alto Uruguai. Para o período da validação desta mesma figura, o R do cenário TRMM apresentou o mesmo comportamento observado para a calibração, mas em termos médios entre todos os cenários de uma mesma bacia, o coeficiente decaiu a partir da bacia do Rio Ijuí.

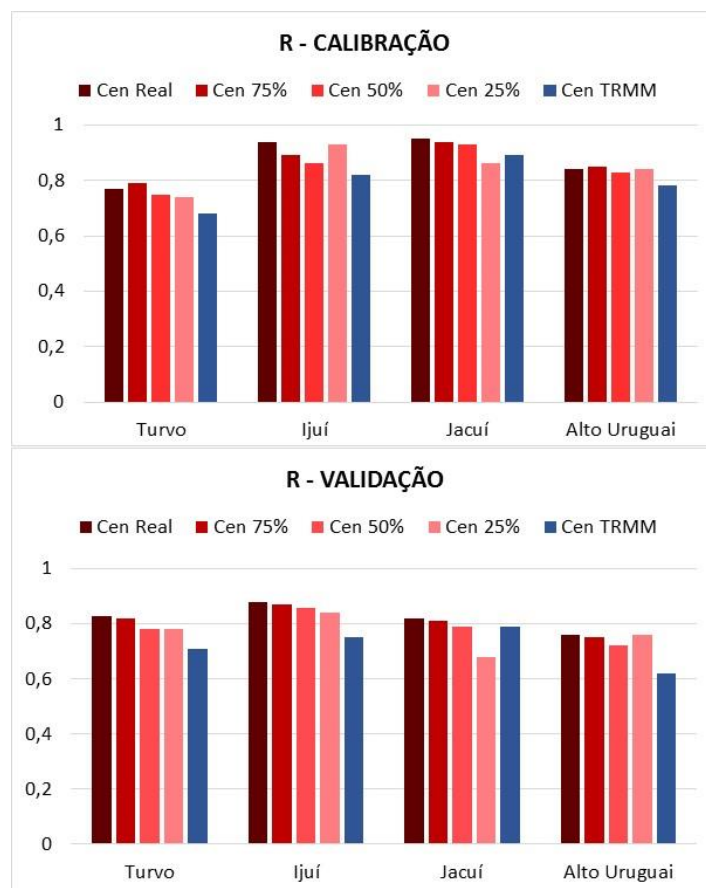


Figura 35 – Comportamento do coeficiente de correlação em relação à escala de drenagem das bacias hidrográficas, para o período de calibração e validação do WIPH2.

A bacia do Alto Uruguai teve seus coeficientes de avaliação reduzidos, em relação às bacias dos rios Ijuí e Jacuí, apesar de ser a que contava com maior área de drenagem. A provável causa desta redução dos coeficientes NS e R foi a dificuldade que o modelo tem em representar bacias com características físicas heterogêneas. Como o WIPH2 é um modelo concentrado, ele apresenta dificuldade em se ajustar para bacias de grande variabilidade, o que é esperado em grandes bacias.

Avaliando especificamente as estimativas do satélite TRMM, percebe-se que a qualidade das simulações aumentou conforme houve um aumento da área da bacia. Comparando os coeficientes de NS entre as bacias dos rios Turvo, Ijuí e Jacuí percebe-se que houve uma melhora nos resultados, quando se fez uso das estimativas do satélite. Notou-se, então, que conforme alteraram-se as escalas das bacias (para áreas maiores), as estimativas do TRMM se tornaram mais fiéis aos dados reais (com exceção da validação do Cen TRMM para a bacia do Rio Ijuí, que superestimou os picos, resultando em um NS com valor negativo).

Para a bacia do Alto Uruguai, o uso das estimativas de precipitação do TRMM como informação de entrada no modelo WIPH2 gerou valores próximos dos obtidos para os outros cenários, no período da calibração. Entretanto, em comparação com as outras bacias, notou-se uma tendência diferente da observada até então, reduzindo o valor do NS, mesmo apresentando a maior área de drenagem dentre as bacias.

Na validação dos parâmetros, para a bacia do Alto Uruguai, as estimativas do satélite obtiveram o pior resultado. No entanto, a falta de adequação do modelo não foi causada pela falta de qualidade dos dados do TRMM, mas sim pela incompatibilidade das características dessa bacia com esse modelo, do tipo concentrado.

De maneira geral, notou-se que os resultados obtidos pela calibração/validação com dados do satélite TRMM foram piores do que praticamente todos os cenários com 25% dos pluviômetros (exceção para a bacia do Jacuí). Sendo assim, mesmo em condição de alta escassez de monitoramento em solo, ainda assim os resultados dos pluviômetros foram superiores na simulação da vazão.

A partir dos resultados dos coeficientes de avaliação fornecidos pelo modelo WIPH2 (Tabela 19), ajustou-se equações por meio de gráficos que relacionam a área de drenagem da bacia hidrográfica com o coeficiente de Nash-Sutcliffe (Figura

36), e com o coeficiente de correlação (Figura 37), obtidos pela calibração dos parâmetros do modelo, quando utilizadas as estimativas do satélite TRMM.

Tabela 19 – Coeficiente de avaliação do modelo WIPH2, para as diferentes escalas de bacias, utilizando-se das estimativas do satélite TRMM.

| Coeficiente de avaliação | Cen TRMM | | | |
|--------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|---|
| | Turvo (1.540 km ²) | Ijuí (9.450 km ²) | Jacuí (38.700 km ²) | Alto Uruguai (61.900 km ²) |
| R | 0,68 | 0,82 | 0,89 | 0,78 |
| NS | 0,44 | 0,67 | 0,77 | 0,61 |

Fonte: Acervo próprio.

A equação ajustada para os coeficientes NS e R foi do tipo polinomial de ordem 2, capaz de representar 90% e 92% dos dados, respectivamente. Apesar disso, a utilização dessas equações é limitada, visto que os valores máximos atingíveis são, aproximadamente, 0,8 para o coeficiente NS e 0,9 para o R.

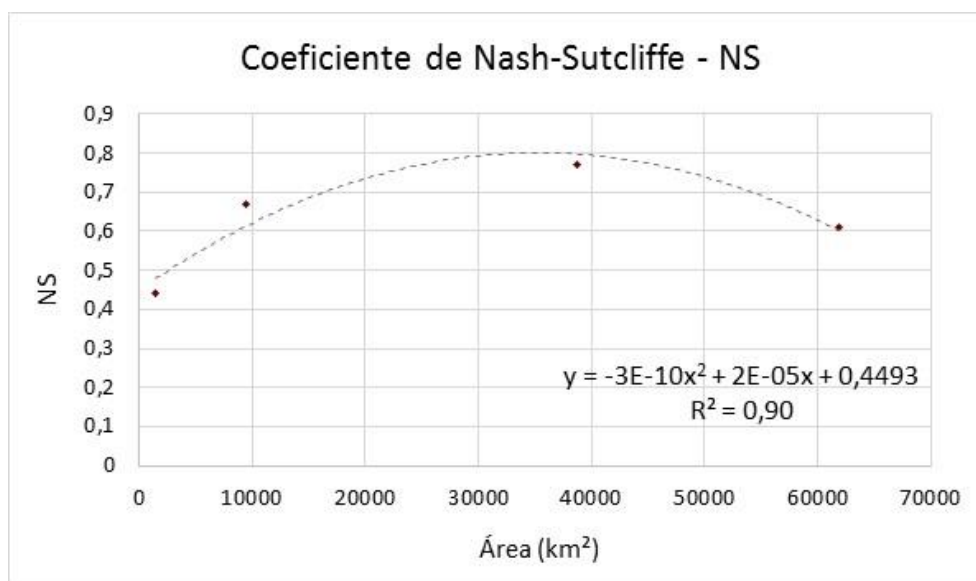


Figura 36 – Relação entre a área de drenagem da bacia e o coeficiente de Nash-Sutcliffe obtido da calibração com dados estimados pelo satélite TRMM.

Fonte: Acervo próprio.

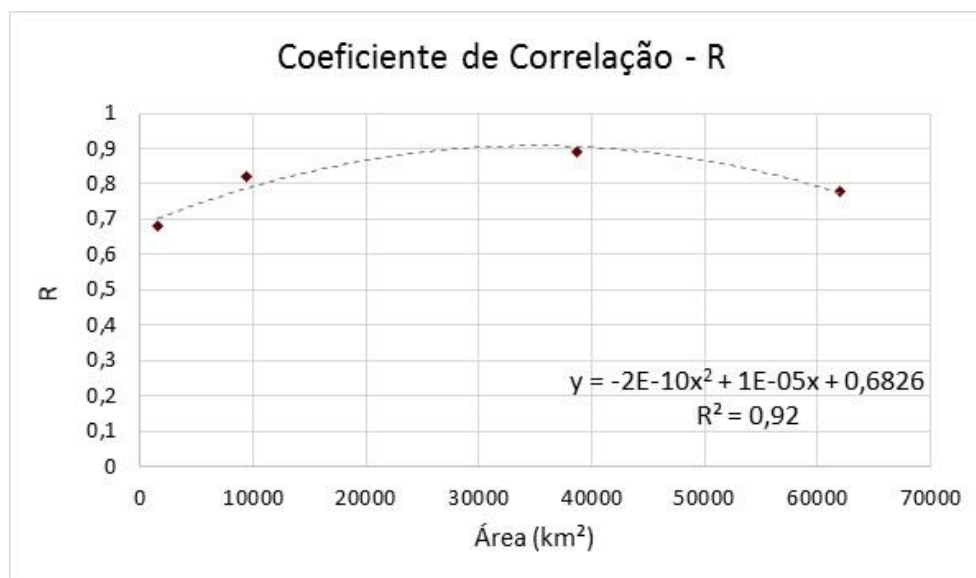


Figura 37 – Relação entre a área de drenagem da bacia e o coeficiente de correlação obtido da calibração com dados estimados pelo satélite TRMM.

Fonte: Acervo próprio.

A partir das equações ajustadas, buscou-se a escala de área a partir da qual as estimativas do satélite produzem resultados aceitáveis no modelo WIPH2, com NS mínimo de 0,5, de acordo com Collischonn (2006) e Moriasi et al. (2007). Como resposta, chegou-se em áreas entre 2.640 e 64.027 km², aproximadamente, entre as quais as estimativas do satélite TRMM produzem resultados considerados aceitáveis no desempenho deste modelo, de acordo com estes autores. Provavelmente, abaixo de 2.640 km² as estimativas do TRMM não forneceria bons resultados na obtenção da chuva média espacializada, e acima de 64.027 km² o desempenho do modelo ficaria limitado à variabilidade das bacias. Considerando o coeficiente de correlação, resultados superiores a 0,5 são obtidos utilizando-se de bacias com áreas de até 61.217 km², aproximadamente.

É importante ressaltar que as equações foram obtidas com apenas 4 observações e, apesar da medida descritiva de qualidade do ajuste (R^2) ser de boa qualidade, para um ajuste de maior confiabilidade seriam necessárias mais observações que correlacionassem outras escalas de áreas de drenagem com o coeficiente de NS obtido pelo modelo WIPH2.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Utilizar estimativas de precipitação estimadas por satélite são, de forma geral, alternativas utilizadas em países em que as informações mensuradas em solo são escassas, realidade de muitos países em desenvolvimento. Neste trabalho, foi analisada a qualidade destas estimativas e se elas podem realmente se inferir como alternativa para locais em que faltam monitoramentos em solo, e qual a resposta quando utilizadas como variável de entrada em modelos hidrológicos chuva-vazão do tipo concentrado.

Em uma primeira análise, realizada para quatro bacias hidrográficas localizadas na região sul do Brasil (bacias dos rios Turvo, Ijuí, Jacuí e Alto Uruguai), simulando diferentes cenários de coberturas pluviométricas observou-se que as estimativas de precipitação fornecidas pelo satélite TRMM apresentaram consistência com a precipitação média. Em geral, essas estimativas aumentaram suas correlações com as informações de pluviômetros, conforme houve um aumento da área de drenagem da bacia hidrográfica. A melhor correlação entre a precipitação estimada e a monitorada foi obtida a partir dos dados do TRMM, acumulados entre as 12 e as 9 horas UTC, de um determinado dia correlacionados com os dados pluviométricos do dia posterior em todas as bacias analisadas.

Verificou-se, para as quatro bacias simuladas com os diferentes cenários de rede de pluviômetros, que em condições de elevada escassez de monitoramento pluviométrico, aliada a uma má distribuição de equipamento pela área, é mais confiável a utilização de estimativas de satélite para a determinação da chuva média espacializada. A partir dos resultados, constatou-se que as estimativas do TRMM podem ser consideradas como boa fonte de dados, com erro de volume na ordem de 7,5% (Rio Ijuí) a 15% (bacias dos rios Turvo, Jacuí e Alto Uruguai).

Erros desta ordem de grandeza também são encontrados nas informações obtidas pelos pluviômetros, o que afeta a qualidade dos resultados disponíveis, de acordo com Pinheiro et al. (2014). Estes erros podem nas medidas de precipitação podem ser causados por diversos fatores, (MOLINI et al., 2005; SEVRUKA. et al., 2009), dentre eles o vento, umedecimento do funil, evaporação, retenção e 'splash' da gota (DEVINE; MEKIS, 2008), ou ainda o simples erro na leitura do pluviômetro. Devine e Mekis, (2008) obtiveram erros médios de precisão de 14,6% nos

pluviômetros de balança, e 0,2 nos manuais. Braga e Fernandes (2007) avaliaram, em laboratório, a precisão da medição efetuada com diferentes tipos de pluviômetros automáticos de balança e encontraram erros médios variando entre 2,2 e 63%, sendo os maiores erros observados para chuvas intensas.

Vale destacar que quando se utiliza estimativas de precipitação fornecidas por satélite, normalmente elas são comparadas com informações de pluviômetros que, de acordo com o exposto, nem sempre condizem com o que realmente ocorreu na área. Obviamente os pluviômetros geram informações de alta precisão quando são bem distribuídos pela área, não apresentam nenhum defeito, as leituras feitas por hidrometristas experientes, e, preferencialmente, se forem manuais.

Uma vantagem identificada nas estimativas do satélite TRMM, além dos baixos custos de aquisição e processamento dos dados, é o menor número de falhas observadas na série temporal, sobre as bacias escolhidas, consideradas insignificantes, quando comparadas com as falhas dos dados mensuradas em solo, que chegaram a atingir meses. Assim, mesmo que com alguma imprecisão na estimativa da precipitação, o TRMM poderia ser utilizado com subsídio para o preenchimento de falhas em séries históricas.

Foi utilizado o modelo IPH II na versão para *Windows*® para avaliar a qualidade das vazões geradas (em um modelo hidrológico chuva-vazão do tipo concentrado), a partir da precipitação média determinada com dados estimados pelo do TRMM, comparativamente à vazão gerada com diferentes cenários de cobertura pluviométrica.

Neste sentido, verificou-se que, em geral, as precipitações estimadas pelo TRMM produziram melhoras no coeficiente de avaliação (NS e R) das vazões, à medida em que houve um aumento da área de drenagem da bacia hidrográfica. Em locais com boa cobertura de monitoramento pluviométrico, as estimativas de satélite produziram resultados inferiores aqueles gerados por informações mensuradas em solo; já em locais onde a escassez de equipamentos é acentuada e/ou sua distribuição é não-uniforme, a utilização de estimativas de satélite se mostrou mais confiável, chegando a resultados visivelmente superiores.

O modelo WIPH2 mostrou-se adequado para a simulação das bacias selecionadas, com ressalvas à aplicação na bacia do Alto Uruguai. Observou-se que, em alguns casos, mesmo que a precipitação média estimada pelo TRMM possuísse maior incerteza com relação aos demais cenários (Cen Real, Cen 75%,

Cen 50% e Cen 25%), o modelo conseguiu compensar a deficiência desta informação, por meio da alteração de parâmetros, dentro de limites considerados aceitáveis para as características das bacias hidrográficas.

Da relação entre a área da bacia hidrográfica e os coeficientes de avaliação (NS e R) obtidos para a calibração, com dados do satélite, chegou-se a equações polinomiais de ordem 2, que permitem estimar a área da bacia a partir da qual a simulação das vazões, com o modelo WIPH2, são consideradas aceitáveis.

Diante dos resultados obtidos pelos diversos estudos sobre as estimativas de precipitação do satélite TRMM e da constatação da sua boa qualidade foi lançada a Missão GPM (*Global Precipitation Measurement*), que é uma parceria co-liderada pela NASA e a JAXA, que irá fornecer informações de observações globais de precipitação, com cobertura entre as latitudes 65° N-S em intervalos de 3 horas (NASA, 2015c). Esta missão é composta por uma rede internacional de satélites que compõem a “*GPM Constellation Status*”, que inclui o satélite GPM Core Observatory, lançado em 27 de fevereiro de 2014 (NASA, 2015d).

Como recomendações a futuros trabalhos sugere-se:

- Testar outros interpoladores para a obtenção das informações de precipitação média espacial obtidas por pluviômetros, pois o IDW, apesar de muito utilizado, não foi comparado com outros interpoladores para verificar se ele era o mais adequado para as bacias em análise. Utilizar, por exemplo, o método de interpolação de *Kriging*, que vem se destacando em relação aos demais;
- Testar outras condições de distribuição (outros cenários para uma mesma quantidade de pluviômetros pela área) e sua influência nos resultados do IPH II ou outros modelos hidrológicos concentrados. Para isso, poderia ser utilizado o método de Monte Carlo, que geraria os cenários disponíveis para cada densidade; ou apenas para o cenários com 25% das estações disponíveis, devido às limitações computacionais, já que a metodologia requer considerável espaço de memória.
- Utilizar as informações da bacia do Alto Uruguai em outro modelo hidrológico, o que possibilitaria confirmar, ou não, se a causa da falta de ajuste das vazões calculadas foi a alta heterogeneidade das características físicas desta bacia. Possivelmente tal problema seria resolvido ao fazer uso de um modelo distribuído;

- Utilizar o modelo IPH II com informações de estimativas do TRMM em outras escalas de bacias hidrográficas, além das analisadas neste trabalho. Isso permitiria ampliar as relações entre área e coeficiente de avaliação do modelo, validar a equação logarítmica encontrada neste trabalho ou ajustar outra que melhor se adeque. Especificamente neste trabalho relacionou-se a área de drenagem da bacia com o coeficiente de Nash-Sutcliffe, mas também poderiam adotar outra função objetivo, buscando o melhor desempenho do modelo especificamente para vazão de máxima ou de mínima;
- Realizar esta mesma análise com informações de precipitação estimadas por outros satélites que, preferencialmente, estejam ainda ativos, visando não só constatar a qualidade dos dados como também utilizá-los em problemas práticos, utilizando, por exemplo, informações do GPM.

REFERÊNCIAS

ANA. Agência Nacional de Águas. **Sistema de informações hidrológicas**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 15 fev. 2015.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper**, No. 56. *FAO, Rome*, v. 300 n. 9, 1998. 174 p.

AMORIM, R. C. F. **Espacialização de variáveis meteorológicas combinando informações de imagens de satélites com técnicas de interpolação para o estado de Minas Gerais**. 2009. 103 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2009.

BAJRACHARYA, S. R.; PALASH, W.; SHRESTHA, M. S.; KHADGI, V. R.; DUO, C.; DAS, P. J.; DORJI, C. Systematic Evaluation of Satellite-Based Rainfall Products over the Brahmaputra Basin for Hydrological Applications. **Advances in Meteorology**. 2014a.

BAJRACHARYA, S. R., SHRESTHA, M. S., & SHRESTHA, A. B. Assessment of high-resolution satellite rainfall estimation products in a stream flow model for flood prediction in the Bagmati basin, Nepal. **Journal of Flood Risk Management**. 2014b.

BARRETT, E. C. The Estimation of Monthly Rainfall from Satellite Data. **Monthly Weather Review**, v. 98, n. 4, p. 322-327. 1970.

BELTRAME, L. F. S. (coord.). **Consistência de Dados Hidrológicos da Bacia Hidrográfica do Alto Uruguai, Sub-Bacia 75**. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, 2000.

BRAGA, S. M.; FERNANDES, C. V. S. Performance de sensores de precipitação do tipo 'tippingbucket' (báscula): um alerta para a ocorrência de erros. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 12, n. 1, p. 197-204, 2007.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Caderno da Região Hidrográfica do Uruguai**. Secretaria de Recursos Hídricos. Brasília, DF, 2006.

BRAVO, J. M.; ALLASIA, D. G.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C. E. M. Avaliação Visual e Numérica da Calibração do Modelo Hidrológico IPH II com Fins Educacionais. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 17., 2007, São Paulo. **Anais...**São Paulo: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2007.

BRAVO, J. M.; ALASSIA, D. G. P.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C. E. M. **WIN_IPH2: Modelo IPH2 para Windows**. Manual de conceitos do WIN_IPH2 Versão 1.0. Porto Alegre: 2006.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. **Precipitação**. In: TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 4 ed. Porto Alegre: ed. ABRH e Editora da UFRGS, 2013.

CARVALHO, J. R. P. de; ASSAD, E. D.; PINTO, H.S. Interpoladores Geoestatísticos na Análise da Distribuição Espacial da Precipitação Anual e de sua Relação com Altitude. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1235-1242, 2012.

CEMET RS. Centro Estadual de Meteorologia – RS. **Caracterização das condições climáticas, meteorológicas e de produção agrícola da região de Santa Rosa**. Nota Técnica nº 06 – Cemet RS, 2012.

CHEVALLIER, P. **Aquisição e Processamento de Dados**. In: TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 4 ed. Porto Alegre: ed. ABRH e Editora da UFRGS, 2013.

CLARKE, R. T.; BUARQUE, D. C. Statistically combining rainfall characteristics estimated from remote-sensed and rain gauge data sets in the Brazilian Amazon-Tocantins Basins. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v.118, n. 14, p.7467-7480, 2013.

CONTI, G. N. **Estimativa da Precipitação através de Técnicas de Sensoriamento Remoto: Estudo de caso para o estado do Rio Grande do Sul**. 2002. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: 2002.

COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Desempenho do satélite TRMM na estimativa de precipitação sobre a bacia do Paraguai superior. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 59, n. 1, p. 93-99, 2007.

COLLISCHONN, B.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. **Journal of Hydrology**, v. 360, n.1, p. 207-216, 2008.

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

COLLISCHONN, W; TUCCI, C. E. M. Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 3, p. 27-39, 2003.

COLLISCHONN, B. **Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído**. 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: 2006.

DEVINE, K. A.; MEKIS, É. Field accuracy of canadian rain measurements. **Atmosphere Ocean**. v. 46, n. 2, p. 213-227, 2008.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. Crop water requirements. **Irrigation and drainage paper**, No. 24. Roma: FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 1977, 144 p.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water resources research**, v. 28, n. 4, p. 1015-1031, 1992.

DANELICHEN, V. H. M.; MACHADO, N. G.; SOUZA, M. C.; BUIDES, M. S. TRMM Satellite Performance in Estimating Rainfall Over the Midwest Region of Brazil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 12, p 22-31, 2013.

ECKHARDT, K.; FOHRER, N.; FREDE, H. G. Automatic Model Calibration. **Hydrological Processes**, v. 19, n. 3, p. 651-658, 2005.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Satélites de Monitoramento**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2013. Disponível em: <<http://www.sat.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 18 dez. 2014.

_____. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 3.ed, 2013.

FEKETE, B. M.; VÖRÖSMARTY, C. J.; ROADS, J. O.; WILLMOTT, C. J. Uncertainties in precipitation and their impacts on runoff estimates. **Journal of Climate**, v. 17, n. 2, p 294-304, 2004.

FENSTERSEIFER, C. A. **Qualidade das Estimativas de Precipitações Derivadas de Satélites na Bacia do Alto Jacuí – RS**. 2013. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria: 2013.

FEPAM. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler. **U30 - TURVO/SANTA ROSA/SANTO CRISTO**. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/bacia_uru_turvo.asp>. Acesso em: 08 set. 2015a.

_____. **QUALIDADE AMBIENTAL**. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade_jacui/jacui.asp>. Acesso em: 09 set. 2015b.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

GALDINO, C. H. P. A.; BRAVO, J. M.; GUTIERREZ, J. C. T. Influência da estimativa da série temporal de chuva na calibração multi-objetivo do modelo IPH II. Anais... XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Natal, 2014.

GERMANO, A.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. Estimativa dos parâmetros do modelo IPH II para algumas bacias urbanas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.3, n. 4, p. 103-120, 1998.

GONÇALVES, L. S. **Relações intensidade-duração-frequência com base em estimativas de precipitação por satélite**. 2011. 110 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados históricos**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 15 fev. 2015.

JAXA. Japan Aerospace Exploration Agency. **Outline of TRMM Instruments**. Disponível em: <http://www.eorc.jaxa.jp/TRMM/about/mechanism/main_e.htm>. Acesso em: 19 dez. 2014.

JIMÉNEZ, K. Q.; COLLISCHONN, W. Método de combinação de dados de precipitação estimados por satélite e medidos em pluviômetros para a modelagem hidrológica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 1, p. 202-217, 2015.

KIDD, C.; LEVIZZANI, V. Status of satellite precipitation retrievals. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 4, p. 1109-1116, 2011.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MOLLERI, G. S. F.; RUDORFF, F. M. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Curitiba: Organic Trading, 2006.

KRAKAUER, N. Y.; PRADHANANG, S. M.; LAKHANKAR, T.; JHA, A. K. Evaluating satellite products for precipitation estimation in mountain regions: A case study for Nepal. **Remote Sensing**, v. 5, n. 8, p. 4107-4123, 2013.

KUMMEROW, C.; SIMPSON, J.; THIELE, O.; BARNES, W.; CHANG, A. T. C.; STOCKER, E.; ADLER, R. F.; HOU, A.; KAKAR, R.; WENTZ, F.; ASHCROFT, P.; KOZU, T. HONG, Y.; OKAMOTO, K.; IGUCHI, T.; KUROIWA, H.; IM, E.; HADDAD, Z.; HUFFMAN, G.; FERRIER, B.; OLSON, W. S.; ZIPSER, E.; SMITH, E. A.; WILHEIT, T. T.; NORTH, G. KRISHNAMURTI, T.; NAKAMURA, K. The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after Two Years in Orbit. **Journal of Applied Meteorology**, vol. 39, n. 12, pp. 1965-1982, 2000.

LEIVAS, J.; ANDRADE, R.; VICTORIA, D.; TORRESAN, F.; BOLFE, E.; BARROS, T. Monitoramento da Seca Ocorrida em 2012 no Nordeste Brasileiro a Partir dos Dados do SPOT-Vegetation e TRMM. In: Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, 6., 2012, Aracaju. **Anais...** Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros e Universidade Federal de Sergipe (UFS), 2012.

LOU, R. F. **Modelagem Hidrológica Chuva-vazão e Hidrodinâmica Aplicada na Bacia Experimental do Rio Piabanha/RJ**. 2010. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010.

MAIDMENT, D. R. **Handbook of hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1993.

MARCUZZO, F. F. N.; ANDRADE, L. R.; MELO, D. C. R. Métodos de Interpolação Matemática no Mapeamento de Chuvas do Estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 4, p. 793-804, 2011.

MARINHO FILHO, G. M.; ANDRADE, R. S.; ZUKOWSKI Jr, J. C.; MAGALHÃES FILHO, L. L. Modelos Hidrológicos: Conceitos E Aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 35-47, 2012.

MATOS, J. P.; PORTELA, M. M.; JUÍZO, D. Uma Forma Alternativa de Enfrentar a Escassez de Dados na Bacia do Rio Zambeze com Vista à Calibração de Modelos Hidrológicos. **Recursos Hídricos**, v. 35, n. 1, 2014.

MINE, M. R. M. **Método determinístico para minimizar o conflito entre gerar energia e controlar cheias**. 1998. 146 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: 1998.

MOLINI, A.; LANZA, L.G.; BARBERA, P. Improving the accuracy of tipping-bucket rain records using disaggregation techniques. **Atmospheric Research**. v. 77, n. 1-4, p. 203-217, 2005.

MORAES, B. C.; DA COSTA, J. M. N.; DA COSTA, A. C. L.; COSTA, M. H. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Acta Amazônica**, v. 35, n. 2, p. 207-214, 2005.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

NASA. National Aeronautic and Space Administration. **Rainfall Archives**. Disponível em: <http://disc2.nascom.nasa.gov/Giovanni/tovas/TRMM_V7.3B42.2.shtml>. Acesso em: 20 nov. 2014a.

_____. **NASA Facts: TRMM Instruments**. Disponível em <http://trmm.gsfc.nasa.gov/overview_dir/instrumentfacts.html>. Acesso em: 26 nov. 2014b.

_____. **TRMM Comes to an End after 17 Years**. Disponível em: <<http://pmm.nasa.gov/trmm/mission-end>>. Acesso em: 06 jul. 2015a.

_____. **Mission update 6/16/2015.** Disponível em: <<http://pmm.nasa.gov/trmm>>. Acesso em: 24 set. 2015b.

_____. **The TRMM and GPM Missions.** Disponível em: <<http://pmm.nasa.gov/waterfalls/science/trmm-gpm-missions>>. Acesso em: 13 nov. 2015c.

_____. **GPM Mission Concept.** Disponível em: <<http://pmm.nasa.gov/GPM>>. Acesso em: 13 nov. 2015d.

NICHOLSON, S. E.; SOME, B., MCCOLLUM, J.; NELKIN, E.; KLOTTER, D.; BERTE, Y.; DIALLO, B. M.; GAYE, I.; KPABEBA, G.; NDIAYE, O.; NOUKPOZOUNKOU, J. N.; TANU, M. M.; THIAM, A.; TOURE A. A.; TRAORE, A. K. Validation of TRMM and Other Rainfall Estimates with a High-Density Gauge Data set for West Africa. Part II: Validation of TRMM Rainfall Products. **Journal of Applied Meteorology**. v. 42, n.10, p. 1355-1368, 2003

NÓBREGA, R. S.; SOUZA, E. P; GALVÍNCIO, J. D. Análise da Estimativa de Precipitação do TRMM em uma Sub-bacia da Amazônia Ocidental. **Revista de Geografia**, v. 25, n. 1, p. 6-20, 2008a.

NÓBREGA, R. S.; SOUZA, E. P; SOUSA, F. A. S. Análise da Utilização de Dados do Satélite TRMM em um Modelo Hidrológico Semidistribuído na Bacia do Rio Jamari (RO). **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 01, n. 01, p. 47-61, 2008b.

OLIVEIRA, F. A. **Procedimentos para aprimorar a regionalização de vazões: estudo de caso da bacia do Rio Grande.** 2008.173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. F.; DELGADO, R. C.; GOIS, G.; LANNES, A.; DIAS, F. O.; SOUZA, J. C.; SOUZA, M. Análise da Precipitação e sua Relação com Sistemas Meteorológicos em Seropédica, Rio de Janeiro. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 2, p. 140-149, 2014.

OUALLOUCHE, F.; LAZRI, M.; AMEUR, S.; BRUCKER, J. M.; SAHAR, M. Infrared and Microwave Image Fusion for Rainfall Detection over Northern Algeria. **I. J. Image, Graphics and Signal Processing**, v. 6, p. 11-18, 2014.

LOUDIN, L.; PERRIN, C.; MATHEVET, T.; ANDRÉASSIAN, V.; MICHEL, C. Impact of biased and randomly corrupted inputs on the efficiency and the parameters of watershed models. **Journal of Hydrology**, v. 320, n. 1, p. 62-83, 2006.

PINHEIRO, A.; DÖRING, J.; KAUFMANN, V.; LEÃO, J. S.; NASCIMENTO, M. Acurácia na medição da altura de precipitação em pluviômetros de Bâscula. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 16, n. 1, p 38-44, 2014.

POTIER, G. C. **Classificação das nuvens**. In: POTIER, G. C. et al. Física dos Raios & Engenharia de Proteção. 2 ed. Porto Alegre: Editora Universitária da PUC-RS, 2010.

ROMILLY, T. G.; GEBREMICHAEL, M. Evaluation of satellite rainfall estimates over Ethiopian river basins. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 5, p. 1505-1514, 2011.

ROSSATO, M. **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia**. 2011. 240 f. Tese. (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: 2011.

SALIO, P.; HOBOUCHIAN, M. P.; SKABAR, Y. G.; VILA, D. Evaluation of high-resolution satellite precipitation estimates over southern South America using a dense rain gauge network. **Atmospheric Research**, v. 163, p. 146-161, 2015.

SANTOS, I. dos; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F de C. **Hidrometria Aplicada**. Curitiba: Editora do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001.

SCADUTO, L. C. N. **Desenvolvimento e avaliação do desempenho de sistema óptico aplicado a sensoriamento remoto orbital**. 2008. 231 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008

SCHUMACHER, C.; HOUZE JR, R. A.; KRAUCUNAS, I. The tropical dynamical response to latent heating estimates derived from the TRMM precipitation radar. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 61, n. 12, p. 1341-1358, 2004.

SCIVITTARO, W. B.; Castro, N. M. R.; Louzada, J. A. S. Murliki, J. D. **Demanda Hídrica e Eficiência de Irrigação pelo Arroz: Efeito da Altura da Lâmina de Água**. Comunicado Técnico 238 – EMBRAPA: Pelotas, 2010.

SEMA. Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **Relatório Anual sobre a Situação dos Recursos Hídricos no Estado do Rio Grande do Sul – Ano 2009/2010**. Porto Alegre, 2012.

_____. Disponível em <<http://www.sema.rs.gov.br/>>. Acesso em: 08 de set. 2015.

SEVRUKA, B.; ONDRÁS, M.; CHVÍLAC, B. The WMO precipitation measurement intercomparisons. **Atmospheric Research**. v. 92, n. 3, p. 376-380, 2009.

SHIMABUKURO, Y. E.; MAEDA, E. E.; FORMAGGIO, A. R. Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas aplicados ao estudo dos recursos agrônômicos e florestais. **Revista Ceres**, v. 56, n. 4, p. 399-409, 2009.

SILVA, F. D. S.; PEREIRA FILHO, A. J.; HALLAK, R. Classificação de sistemas meteorológicos e comparação da precipitação estimada pelo radar e medida pela rede telemétrica na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 3, p. 292-307, 2009.

SILVA JÚNIOR, O. B.; BUENO, E. O.; TUCCI, C. E. M.; CASTRO, N. M. R. Extrapolação espacial na regionalização da vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 21-37, 2003.

SILVA, V. S. V. **Estimativa de precipitação pontual em diferentes escalas para uso em modelo concentrado chuva-vazão**. 2011. 133 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) –Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: 2011.

SILVA, V. S. V.; PEDROLLO, O. C.; CASTRO, N. M. R.; LUCCHESI, L. V. Estudo de regionalização por transferência de parâmetros do Modelo IPH II na bacia do Rio Ijuí/RS. **REGA**, v. 10, n. 2, p. 65-75, 2013.

SORRIBAS, M. V. **Simulação da dinâmica de carbono em bacias hidrográficas**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

TASSI, R.; BRAVO, J. M.; MELLER, A.; COLLISCHONN, W. Avaliação do Impacto de Diferentes Funções Objetivo na Calibração Automática do Modelo Hidrológico IPH II. In: Congresso Latino-americano de Hidráulica, 22., 2006, Ciudad Guayana, Venezuela. **Anais...**Ciudad Guayana, 2006.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4 ed. Porto Alegre: ed. ABRH e Editora da UFRGS, 2013.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2 ed. Porto Alegre: ed. ABRH e Editora da UFRGS, 2005.

TUCCI, C. E. M.; SÁNCHEZ J.; LOPES, M. O. S. Modelo IPH II de simulação precipitação-vazão na bacia: alguns resultados. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, 4., 1981, Fortaleza. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1981.

VIANA, D. R.; FERREIRA, N. J.; CONFORTE, J. C. (2010). Avaliação das Estimativas de Precipitação 3B42 e 3B43 do Satélite TRMM na Região Sul do Brasil. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 16., 2010, Belém. **Anais...** Belém: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2010.

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

WANIELISTA, M.; KERSTEN, R.; EAGLIN, R. **Hydrology: water quantity and quality control**. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.

WOLDEMESKEL, F. M.; SIVAKUMAR, B.; SHARMA, A. Merging gauge and satellite rainfall with specification of associated uncertainty across Australia. **Journal of Hydrology**, v. 499, p. 167-176, 2013.

WOLFF, D. B.; MARKS, D. A.; AMITAI, E.; SILBERSTEIN, D. S.; FISHER, B. L.; TOKAY, A.; WANG, J.; PIPPITT, J. L. Ground Validation for the tropical rainfall measuring mission (TRMM). **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 22, n. 4, p. 365-380, 2005.

XU, H.; XU, C.Y.; CHEN, H.; ZHANG, Z.; LI, L. Assessing the influence of rain gauge density and distribution on hydrological model performance in a humid region of China. **Journal of Hydrology**, v. 505, p. 1-12, 2013.

YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Multi-objective global optimization for hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v. 204, n. 1, p. 83-97, 1998.

ZULKAFI, Z.; BUYTAERT, W.; ONOF, C.; MANZ, B.; TARNAVSKY, E.; LAVADO, W.; GUYOT, J. L. A Comparative Performance Analysis of TRMM 3B42 (TMPA) Versions 6 and 7 for Hydrological Applications over Andean – Amazon River Basins. **Journal of Hydrometeorology**, v. 15, n. 2, p. 581-592, 2014.

ZÚÑIGA, R.; MUÑOZ, E.; ARUMÍ, J.L. Estudio de los procesos hidrológicos de la cuenca del Río Diguillín. **Obras y Proyectos**, v. 11, p. 69-78, 2012.

APÊNDICES

Apêndice A – Estações pluviométricas, climatológicas e fluviométricas das bacias dos rios Turvo, Ijuí, Jacuí e Alto Uruguai, com suas coordenadas de localização e altitudes nas quais se encontram

Tabela 20 – Estações pluviométricas, climatológicas e fluviométrica, utilizadas para a obtenção das informações hidrológicas, na bacia do Rio Turvo.

| Código (ANA) | Nome | Latitude | Longitude | Altitude (m) |
|--------------------------------|----------------------|-----------------|------------------|---------------------|
| Estações Pluviométricas | | | | |
| 2753009 | TRÊS PASSOS | -27,4514 | -53,9250 | 450 |
| 2753016 | MIRAGUAI | -27,5008 | -53,6925 | 502 |
| 2753025 | CAMPO NOVO | -27,6875 | -53,8019 | 475 |
| 2753007 | SANTO AUGUSTO | -27,8519 | -53,7764 | 520 |
| 2754014 | SÃO MARTINHO | -27,7028 | -53,9731 | 448 |
| 2853035 | NOVA RAMADA | -28,0667 | -53,6833 | 533 |
| 2753015 | PALMEIRA DAS MISSÕES | -27,9133 | -53,3108 | 610 |
| Estações Climatológicas | | | | |
| 2753005 | PALMEIRA DAS MISSÕES | -27,8833 | -53,4333 | 634 |
| 2853022 | PANAMBI (PINDORAMA) | -28,2833 | -53,5000 | 470 |
| Estação Fluviométrica | | | | |
| 74470000 | Três Passos | -27,3922 | -53,8808 | 240 |

Tabela 21 – Estações pluviométricas, climatológicas e fluviométrica, utilizadas para a obtenção das informações hidrológicas, na bacia do Rio Ijuí.

(continua)

| Código (ANA) | Nome | Latitude | Longitude | Altitude (m) |
|--------------------------------|----------------------|-----------------|------------------|---------------------|
| Estações Pluviométricas | | | | |
| 2853003 | CONCEIÇÃO | -28,4561 | -53,9717 | 160 |
| 2853010 | PASSO FAXINAL | -28,2894 | -53,7794 | 200 |
| 2853023 | CONDOR | -28,2256 | -53,4703 | 440 |
| 2853033 | SANTA BÁRBARA DO SUL | -28,3883 | -53,2586 | 500 |
| 2853034 | PANAMBI | -28,3444 | -53,5417 | 480 |
| 2853035 | NOVA RAMADA | -28,0667 | -53,6833 | 533 |

(Continuação)

| Código (ANA) | Nome | Latitude | Longitude | Altitude (m) |
|--------------------------------|----------------------|-----------------|------------------|---------------------|
| Estações Pluviométricas | | | | |
| 2853040 | MAUÁ | -28,1792 | -53,8578 | 256 |
| 2854006 | PASSO VIOLA | -28,2111 | -54,6031 | 160 |
| 2854014 | SANTO ÂGELO – IPAGRO | -28,3036 | -54,2625 | 275 |
| 2854018 | JÓIA | -28,6492 | -54,1133 | 314 |
| 2853028 | ANDERSON CLAYTON | -28,6578 | -53,6058 | 440 |
| 2953030 | TUPANCIRETÃ | -29,0856 | -53,8192 | 469 |
| 2854001 | BOA VISTA | -28,1111 | -53,9931 | 447 |
| 2854015 | PONTE MÍSTICA | -28,1814 | -54,7383 | --* |
| 2854013 | SÃO BERNARDO | -28,9053 | -54,065 | 530 |
| 2753015 | PALMEIRA DAS MISSÕES | -27,9133 | -53,3108 | 610 |
| 2854003 | GIRUA | -28,0542 | -54,3614 | 400 |
| 2854005 | PASSO MAJOR ZEFERINO | -28,7336 | -54,6478 | 160 |
| Estações Climatológicas | | | | |
| 2753005 | PALMEIRA DAS MISSÕES | -27,8833 | -53,4333 | 634 |
| 2853022 | PANAMBI (PINDORAMA) | -28,2833 | -53,5000 | 470 |
| 2854007 | SANTO ÂNGELO | -28,3000 | -54,2667 | 289 |
| 2854011 | SÃO LUIZ GONZAGA | -28,4000 | -54,9667 | 245 |
| 2853005 | CRUZ ALTA | -28,6244 | -53,6117 | 432 |
| Estação Fluviométrica | | | | |
| 75320000 | PONTE MÍSTICA | -28,1813 | -54,7383 | 160 |

* Sem informação.

Tabela 22 – Estações pluviométricas, climatológicas e fluviométrica, utilizadas para a obtenção das informações hidrológicas, na bacia do Rio Jacuí.

(continua)

| Código (ANA) | Nome | Latitude | Longitude | Altitude (m) |
|--------------------------------|----------------|-----------------|------------------|---------------------|
| Estações Pluviométricas | | | | |
| 2852004 | AULER | -28,8039 | -52,3817 | 700 |
| 2852006 | CARAZINHO | -28,2933 | -52,7242 | 570 |
| 2852007 | COLÔNIA XADREZ | -28,1892 | -52,7458 | 593 |
| 2852009 | DEPOSITO | -28,8272 | -53,5022 | 600 |
| 2852016 | MARAU | -28,4531 | -52,1975 | 580 |
| 2852024 | PULADOR | -28,2933 | -52,5550 | 600 |

(continuação)

| Código (ANA) | Nome | Latitude | Longitude | Altitude (m) |
|--------------------------------|----------------------|-----------------|------------------|---------------------|
| Estações Pluviométricas | | | | |
| 2852031 | VILA TRÊS PASSOS | -28,4667 | -52,3667 | 510 |
| 2852050 | NÃO-ME-TOQUE | -28,4553 | -52,8158 | 491 |
| 2852053 | SOLEDADE | -28,8131 | -52,5114 | 641 |
| 2852054 | SELBACH | -28,6322 | -52,9358 | 381 |
| 2853014 | SANTA CLARA DO INGAI | -28,7289 | -53,1853 | 390 |
| 2853015 | TRÊS CAPÕES | -28,8264 | -53,5022 | 350 |
| 2853026 | CHAPADA | -28,0586 | -53,0661 | 450 |
| 2853028 | ANDERSON CLAYTON | -28,6578 | -53,6058 | 440 |
| 2853033 | SANTA BÁRBARA DO SUL | -28,3883 | -53,2586 | 500 |
| 2853034 | PANAMBI | -28,3444 | -53,5417 | 480 |
| 2853037 | CAMPINAS | -28,4908 | -53,1047 | 400 |
| 2952003 | BOTUCARAI | -29,7128 | -52,8900 | 80 |
| 2952034 | CANDELÁRIA | -29,6694 | -52,7903 | 40 |
| 2952035 | HERVEIRAS | -29,4539 | -52,6325 | 450 |
| 2953007 | COLONINHA | -29,1942 | -52,9522 | 440 |
| 2953008 | DONA FRANCISCA | -29,6244 | -53,3519 | 25 |
| 2953030 | TUPANCIRETÃ | -29,0856 | -53,8192 | 469 |
| 2953037 | PASSO SÃO LOURENÇO | -30,0089 | -53,0150 | 20 |
| 2954033 | BOM RETIRO | -29,9897 | -54,4886 | --* |
| 3052012 | SERRA DOS PEDROSAS | -30,6253 | -52,8400 | 400 |
| 3052016 | PANTANO GRANDE | -30,1983 | -52,3725 | 40 |
| 3052017 | BARRAGEM CAPANÉ | -30,1869 | -52,9133 | 68 |
| 3053004 | PASSO DO ROCHA | -30,2325 | -53,9933 | --* |
| 3053010 | PASSO DO CAÇÃO | -30,9611 | -53,4886 | 120 |
| 3053017 | PASSO DOS FREIRES | -30,4353 | -53,7125 | 200 |
| 3053018 | IRAPUAZINHO | -30,4872 | -53,1183 | 120 |
| 3053020 | SÃO SEPÉ MONTANTE | -30,1936 | -53,5644 | 60 |
| 3053021 | BARRO VERMELHO | -30,1406 | -53,1589 | 100 |
| 3053022 | CAÇAPAVA DO SUL | -30,5194 | -53,4917 | 420 |
| 3053024 | VILA NOVA | -30,3425 | -53,8803 | 240 |
| 3053028 | PASSO DOS ENFORCADOS | -30,8542 | -53,5933 | --* |
| 3054018 | SÃO GABRIEL | -30,3575 | -54,3181 | 120 |
| 3054019 | IBARE | -30,7744 | -54,2247 | --* |
| 3054020 | RS-473 | -30,4806 | -54,1983 | 190 |
| 3054021 | CERRO BATOVI | -30,5633 | -54,4492 | 223 |

(continuação)

| Código (ANA) | Nome | Latitude | Longitude | Altitude (m) |
|--------------------------------|---------------------|-----------------|------------------|---------------------|
| Estações Climatológicas | | | | |
| 2853022 | PANAMBI (PINDORAMA) | -28,2833 | -53,5000 | 470 |
| 2852020 | PASSO FUNDO | -28,2258 | -52,4033 | 684 |
| 2853005 | CRUZ ALTA | -28,6244 | -53,6117 | 432 |
| 2953017 | SANTA MARIA | -29,7242 | -53,7200 | 95 |
| 3052002 | CACHOEIRA DO SUL | -30,0333 | -52,8833 | 73 |
| 3052005 | ENCRUZILHADA DO SUL | -30,5436 | -52,5236 | 428 |
| Estação Fluviométrica | | | | |
| 85900000 | RIO PARDO | -29,9947 | -52,3772 | 2,89 |

* Sem informação.

Tabela 23 – Estações pluviométricas, climatológicas e fluviométrica, utilizadas para a obtenção das informações hidrológicas, na bacia do Alto Uruguai.

(continua)

| Código (ANA) | Nome | Latitude | Longitude | Altitude (m) |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------|------------------|---------------------|
| Estações Pluviométricas | | | | |
| 2650019 | LEBON REGIS | -26,9017 | -50,6592 | 1000 |
| 2650032 | SANTA CECÍLIA | -26,9675 | -50,4217 | --* |
| 2651001 | CAMPINA DA ALEGRIA | -26,8733 | -51,7964 | 1000 |
| 2651022 | SANTO AGOSTINHO | -26,6086 | -51,8817 | 1250 |
| 2651036 | QUILOMETRO 30 | -26,7758 | -51,2628 | 1133 |
| 2651040 | PONTE SERRADA | -26,9206 | -51,9281 | 1000 |
| 2651052 | SALTO VELOSO | -26,9067 | -51,4097 | 1000 |
| 2652000 | ABELARDO LUZ | -26,5561 | -52,3308 | 760 |
| 2652001 | BONITO | -26,9525 | -51,9281 | 600 |
| 2652002 | MARATA | -26,5836 | -52,6403 | 550 |
| 2652021 | JARDINÓPOLIS | -26,7361 | -52,9003 | 360 |
| 2652031 | SÃO LOURENÇO DO OESTE | -26,4003 | -52,8956 | 720 |
| 2652034 | PORTO FAE NOVO | -26,8192 | -52,7353 | 360 |
| 2652045 | PRAINHA DO OURO VERDE | -26,7553 | -52,3272 | 680 |
| 2653001 | CAMPO ERÊ - EMPASC | -26,4439 | -53,0819 | 920 |
| 2653003 | MODELO | -26,7753 | -53,0464 | 530 |
| 2653007 | SAUDADES | -26,9289 | -53,0075 | 280 |
| 2749009 | RIO BONITO | -27,7039 | -49,8472 | 900 |
| 2749031 | VILA CANOAS | -27,8042 | -49,78 | 900 |
| 2749035 | BOCAINA DO SUL | -27,7464 | -49,945 | 900 |

(continuação)

| Código (ANA) | Nome | Latitude | Longitude | Altitude (m) |
|--------------------------------|------------------------------|-----------------|------------------|---------------------|
| Estações Pluviométricas | | | | |
| 2750001 | CAMPO BELO DO SUL | -27,8989 | -50,7536 | 980 |
| 2750005 | LAGES | -27,8083 | -50,3283 | 937 |
| 2750007 | PAINEL | -27,9222 | -50,0992 | 1196 |
| 2750008 | PASSO CARU | -27,5417 | -50,8569 | 720 |
| 2750009 | PASSO MAROMBAS | -27,3339 | -50,7533 | 829 |
| 2750010 | PONTE ALTA DO NORTE | -27,1611 | -50,4689 | 980 |
| 2750011 | PONTE ALTA DO SUL | -27,4819 | -50,385 | 880 |
| 2750012 | PONTE DO RIO ANTINHAS | -27,3453 | -50,4358 | 940 |
| 2750020 | SÃO JOSÉ DO CERRITO | -27,6617 | -50,5783 | 920 |
| 2750021 | CABECEIRA RIBEIRÃO CAETANO | -27,1411 | -50,2644 | 900 |
| 2750022 | PONTE ALTA DO NORTE - CIFSUL | -27,1208 | -50,4567 | --* |
| 2751001 | ANITA GARIBALDI | -27,6922 | -51,1294 | 800 |
| 2751004 | JOAÇABA | -27,1717 | -51,5003 | 560 |
| 2751006 | PAIM FILHO | -27,7125 | -51,7378 | 600 |
| 2751007 | SANANDUVA | -27,9828 | -51,7836 | 687 |
| 2751011 | IRANI | -27,0511 | -51,9122 | 1040 |
| 2751012 | CAPINZAL | -27,3422 | -51,6083 | 498 |
| 2751015 | BARRACÃO | -27,6786 | -51,4547 | 754 |
| 2751017 | CLEMENTE ARGOLO | -28,0058 | -51,4544 | 950 |
| 2751018 | MARCELINO RAMOS | -27,4647 | -51,9031 | 420 |
| 2751021 | JABORÁ | -27,1728 | -51,7439 | --* |
| 2751022 | IRAKITAN | -27,1458 | -51,0389 | 1000 |
| 2751025 | PINHAL DA SERRA | -27,8908 | -51,1836 | 990 |
| 2752005 | CONCORDIA | -27,3144 | -51,9933 | 600 |
| 2752006 | EREBANGO | -27,8542 | -52,3047 | 763 |
| 2752017 | ITATIBA DO SUL | -27,3889 | -52,4544 | 350 |
| 2752021 | GAURAMA | -27,5872 | -52,0933 | 800 |
| 2753006 | PALMITOS | -27,0644 | -53,1569 | 400 |
| 2753026 | PLANALTO | -27,3083 | -53,0483 | 545 |
| 2849009 | BOM JARDIM DA SERRA | -28,3397 | -49,6214 | 1200 |
| 2849021 | URUBICI | -28,0072 | -49,5922 | 853 |
| 2849023 | DESPRAIADO | -28,3692 | -49,8078 | 1080 |
| 2849035 | SILVEIRA | -28,6264 | -49,9339 | 1200 |
| 2850004 | COXILHA RICA | -28,1522 | -50,4408 | 930 |
| 2850006 | INVERNADA VELHA | -28,4494 | -50,2964 | 850 |

(continuação)

| Código (ANA) | Nome | Latitude | Longitude | Altitude (m) |
|--------------------------------|-------------------------|-----------------|------------------|---------------------|
| Estações Pluviométricas | | | | |
| 2850008 | PASSO SOCORRO | -28,2108 | -50,7586 | 640 |
| 2850024 | PASSO DO HONORATO | -28,3944 | -50,5756 | 691 |
| 2850025 | SOCORRO | -28,2869 | -50,8333 | 811 |
| 2850026 | SANTANA | -28,2628 | -50,7608 | 872 |
| 2850027 | PELOTINHAS | -28,2883 | -50,6431 | 719 |
| 2850028 | VACAS GORDAS | -28,0200 | -50,7822 | 719 |
| 2851020 | PASSO DAS PEDRAS | -28,2558 | -51,8622 | 750 |
| 2851043 | ESMERALDA | -28,0592 | -51,1881 | 974 |
| 2851050 | CAPÃO DO CEDRO | -28,0878 | -51,5444 | 805 |
| 2852046 | TAPEJARA | -28,0575 | -51,9961 | 672 |
| 2852052 | CAMPO DO MEIO | -28,3264 | -52,0536 | 750 |
| 2753004 | LINHA CESCOP | -27,8117 | -53,0278 | 350 |
| 2753014 | LIBERATO SALZANO | -27,5992 | -53,0714 | 378 |
| 2852007 | COLÔNIA XADREZ | -28,1892 | -52,7458 | 593 |
| 2852024 | PULADOR | -28,2933 | -52,5550 | 600 |
| Estações Climatológicas | | | | |
| 2652006 | XANXERE | -26,8500 | -52,4000 | 820 |
| 2750005 | LAGES | -27,8083 | -50,3283 | 937 |
| 2750016 | FRAIBURGO | -27,0500 | -50,9333 | 1145 |
| 2751002 | UHE C. NOVOS BARRAMENTO | -27,3833 | -51,2156 | 960 |
| 2752016 | CHAPECÓ | -27,0903 | -52,6353 | 679 |
| 2753003 | IRÁÍ | -27,1889 | -53,2533 | 247 |
| 2849014 | SÃO JOAQUIM | -28,2744 | -49,9306 | 1408 |
| 2850011 | VACARIA | -28,5167 | -50,9500 | 1050 |
| 2851014 | LAGOA VERMELHA | -28,2219 | -51,5125 | 842 |
| 2849013 | ORLEANS | -28,3333 | -49,3333 | 156 |
| 2850001 | BOM JESUS | -28,6686 | -50,4419 | 1048 |
| 2852020 | PASSO FUNDO | -28,2258 | -52,4033 | 684 |
| Estação Fluviométrica | | | | |
| 74100000 | IRÁÍ | -27,1736 | -53,2292 | 200 |

* Sem informação.

Apêndice B – Hidrogramas e curvas de permanência das vazões calculadas e observadas gerados para o período de validação do modelo WIPH2.

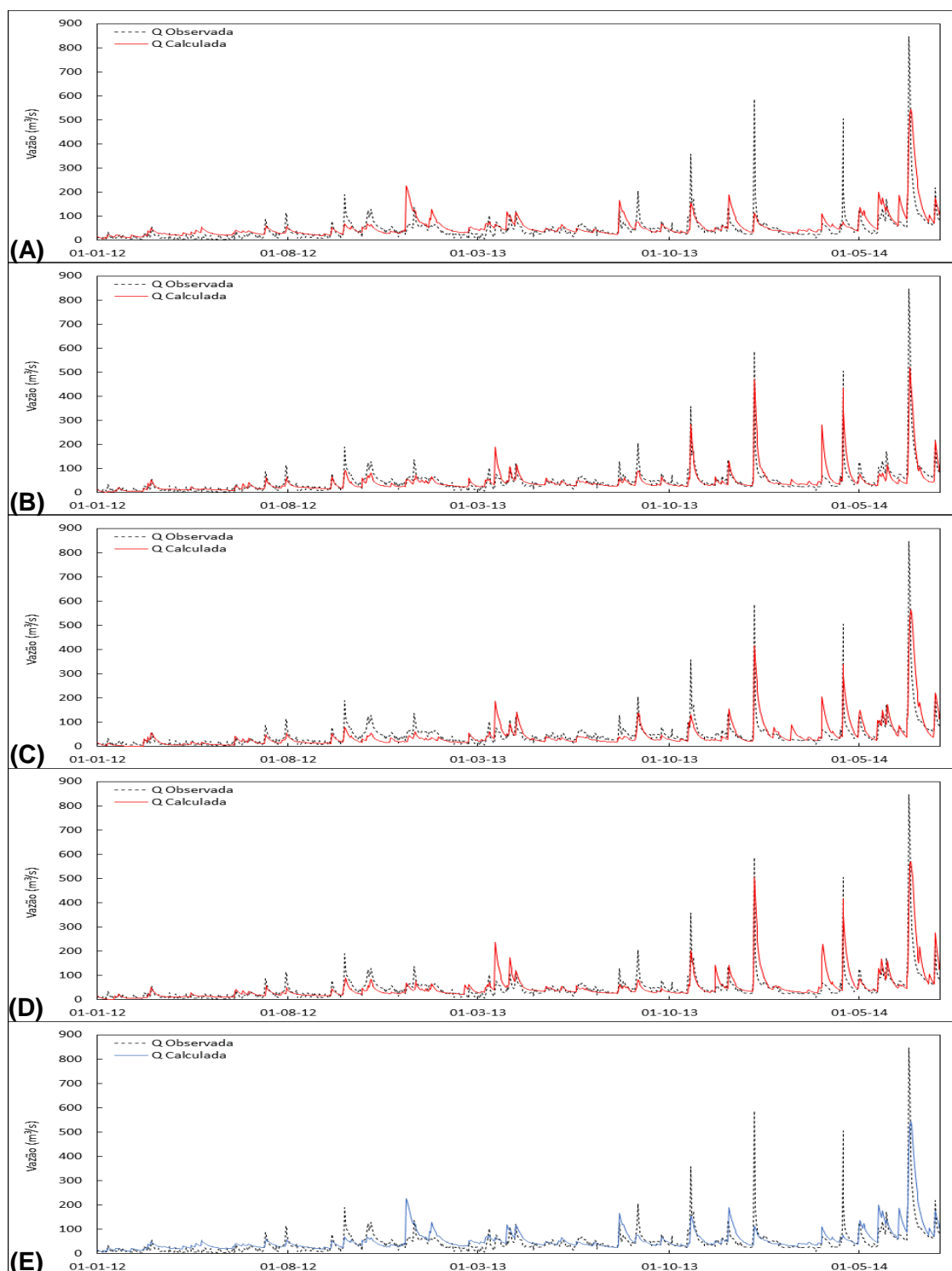


Figura 38 – Hidrogramas das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Turvo, para o período da validação, referentes (A) à condição real de pluviômetros, (B) ao cenário com 75%, (C) cenário com 50%, (D) cenário com 25% e (E) aos dados do TRMM.

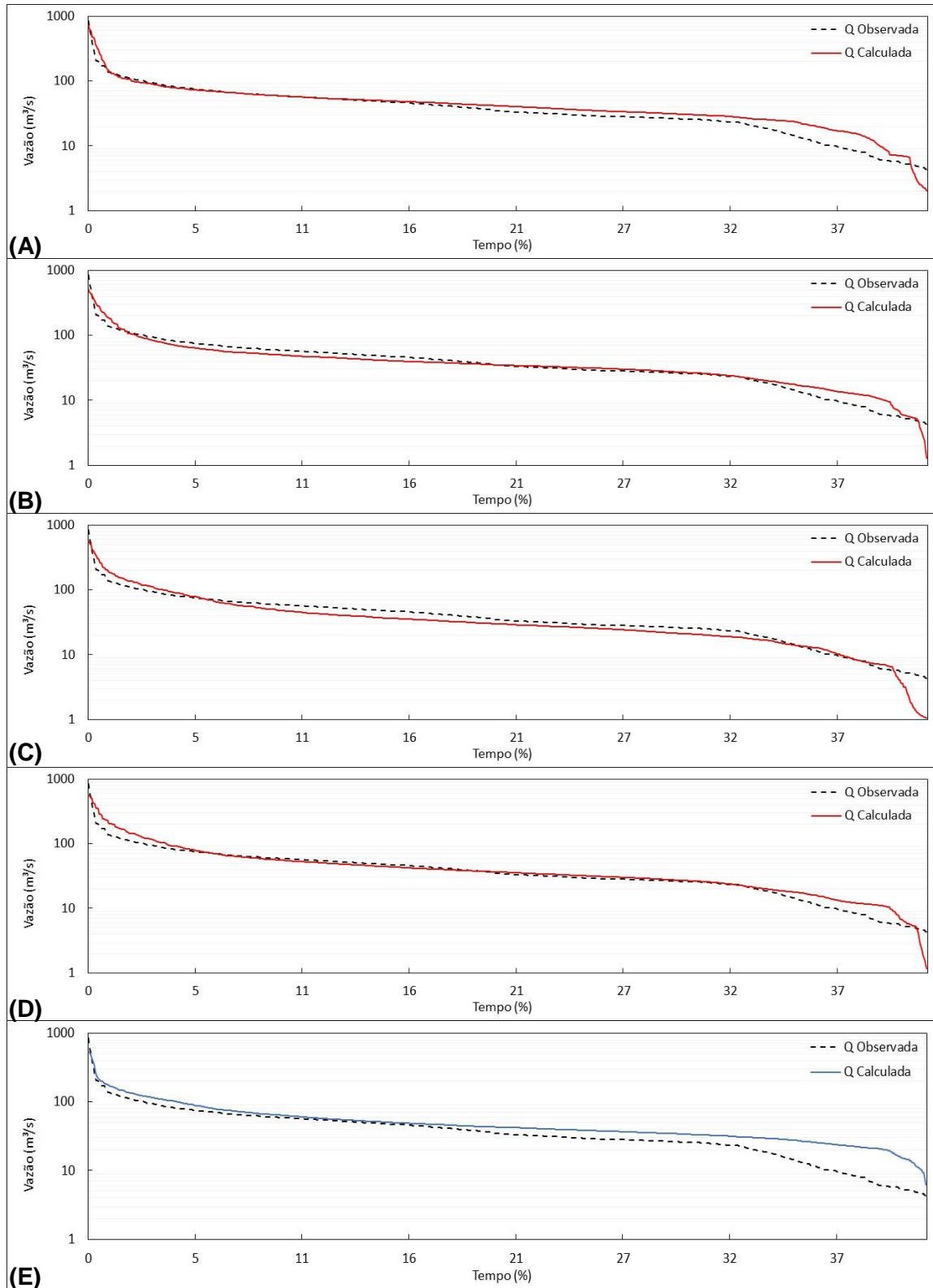


Figura 39 – Curvas de permanência das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Turvo, para o período da validação, referentes **(A)** à condição real de pluviômetros, **(B)** ao cenário com 75%, **(C)** cenário com 50%, **(D)** cenário com 25% e **(E)** aos dados do TRMM.

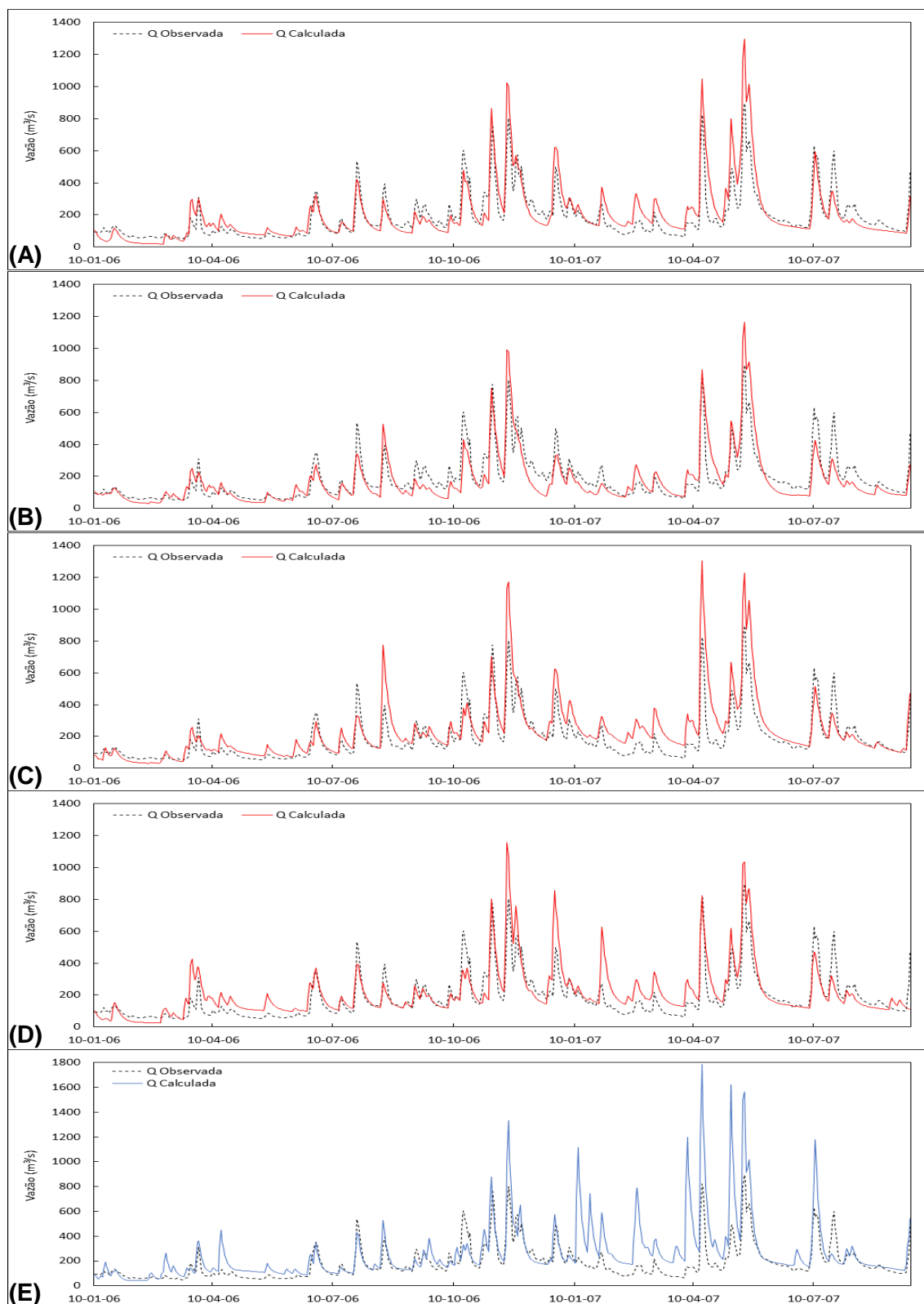


Figura 40 – Hidrogramas das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Ijuí, para o período da validação, referentes (A) à condição real de pluviômetros, (B) ao cenário com 75%, (C) cenário com 50%, (D) cenário com 25% e (E) aos dados do TRMM.

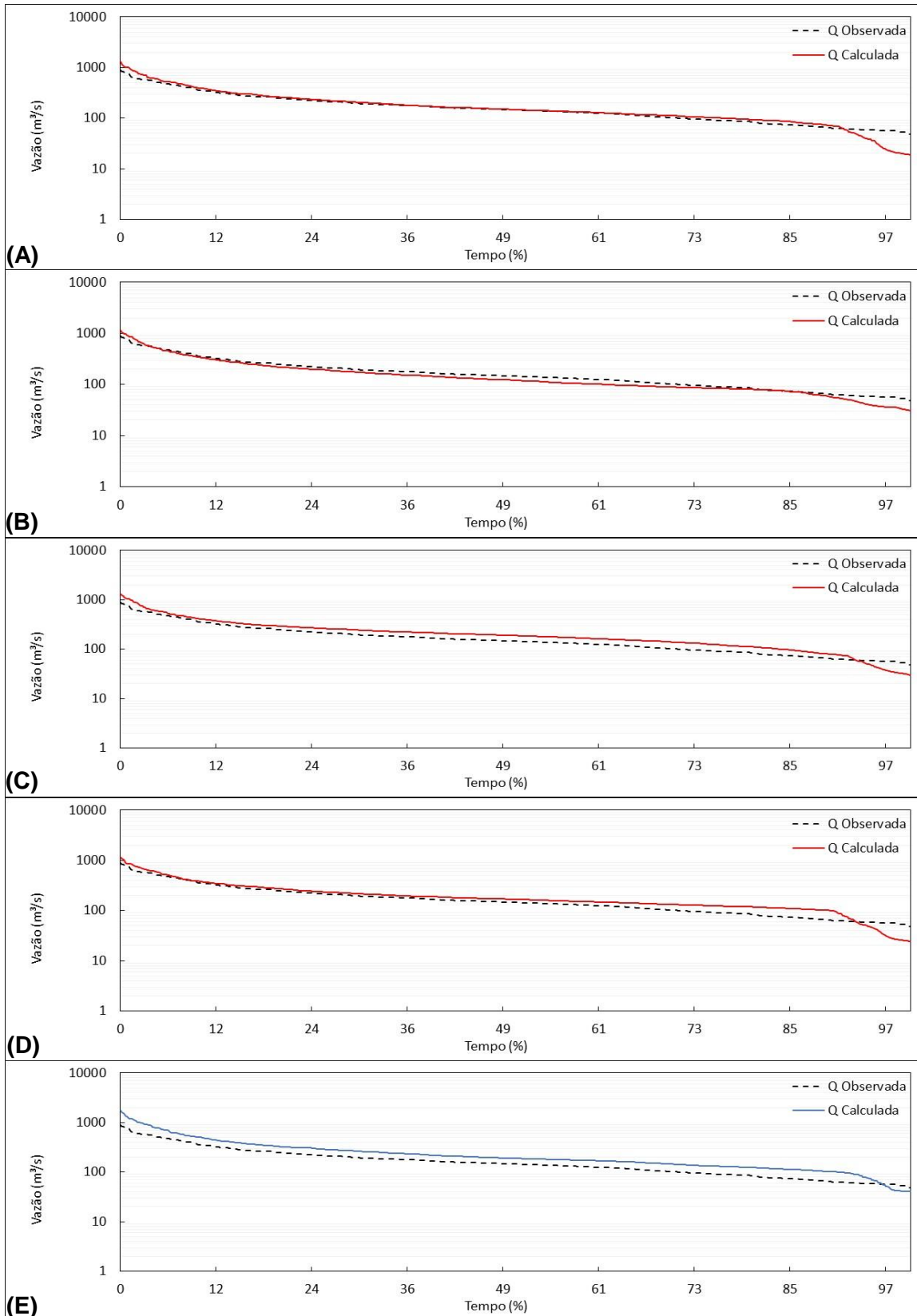


Figura 41 – Curvas de permanência das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Ijuí, para o período da validação, referentes **(A)** à condição real de pluviômetros, **(B)** ao cenário com 75%, **(C)** cenário com 50%, **(D)** cenário com 25% e **(E)** aos dados do TRMM.

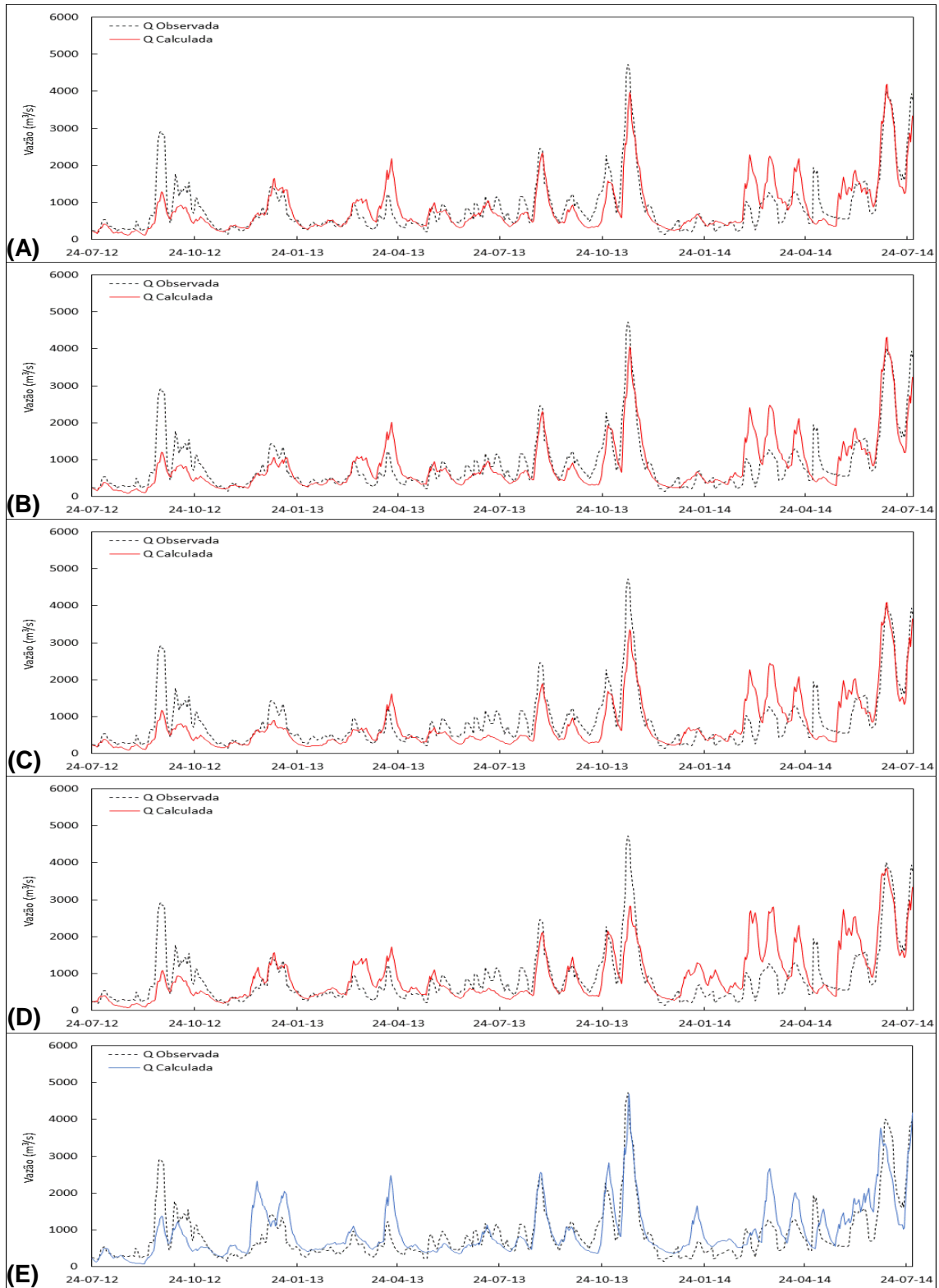


Figura 42 – Hidrogramas das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Jacuí, para o período da validação, referentes (A) à condição real de pluviômetros, (B) ao cenário com 75%, (C) cenário com 50%, (D) cenário com 25% e (E) aos dados do TRMM.

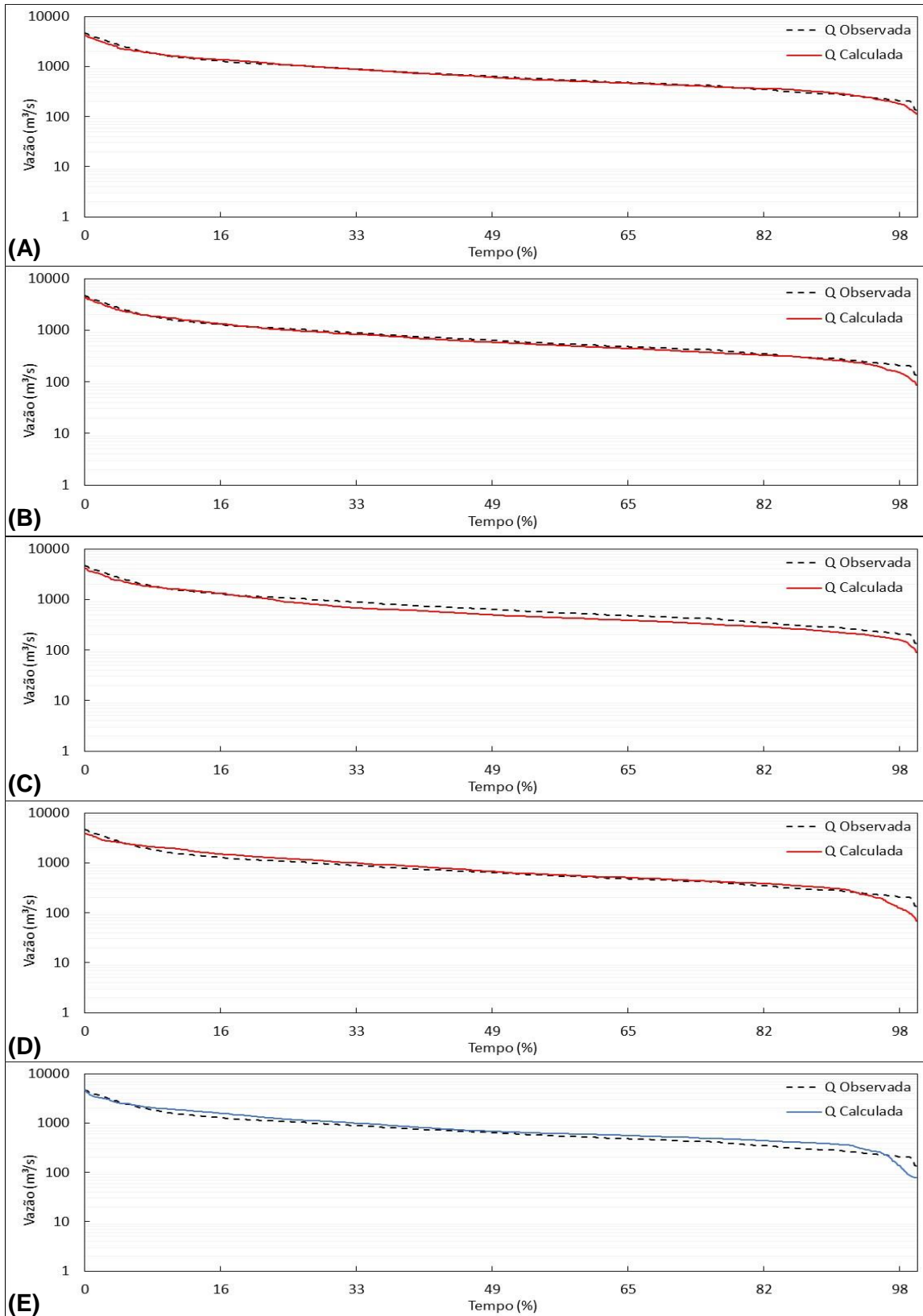


Figura 43 – Curvas de permanência das vazões calculadas e observadas na bacia do Rio Jacuí, para o período da validação, referentes **(A)** à condição real de pluviômetros, **(B)** ao cenário com 75%, **(C)** cenário com 50%, **(D)** cenário com 25% e **(E)** aos dados do TRMM.

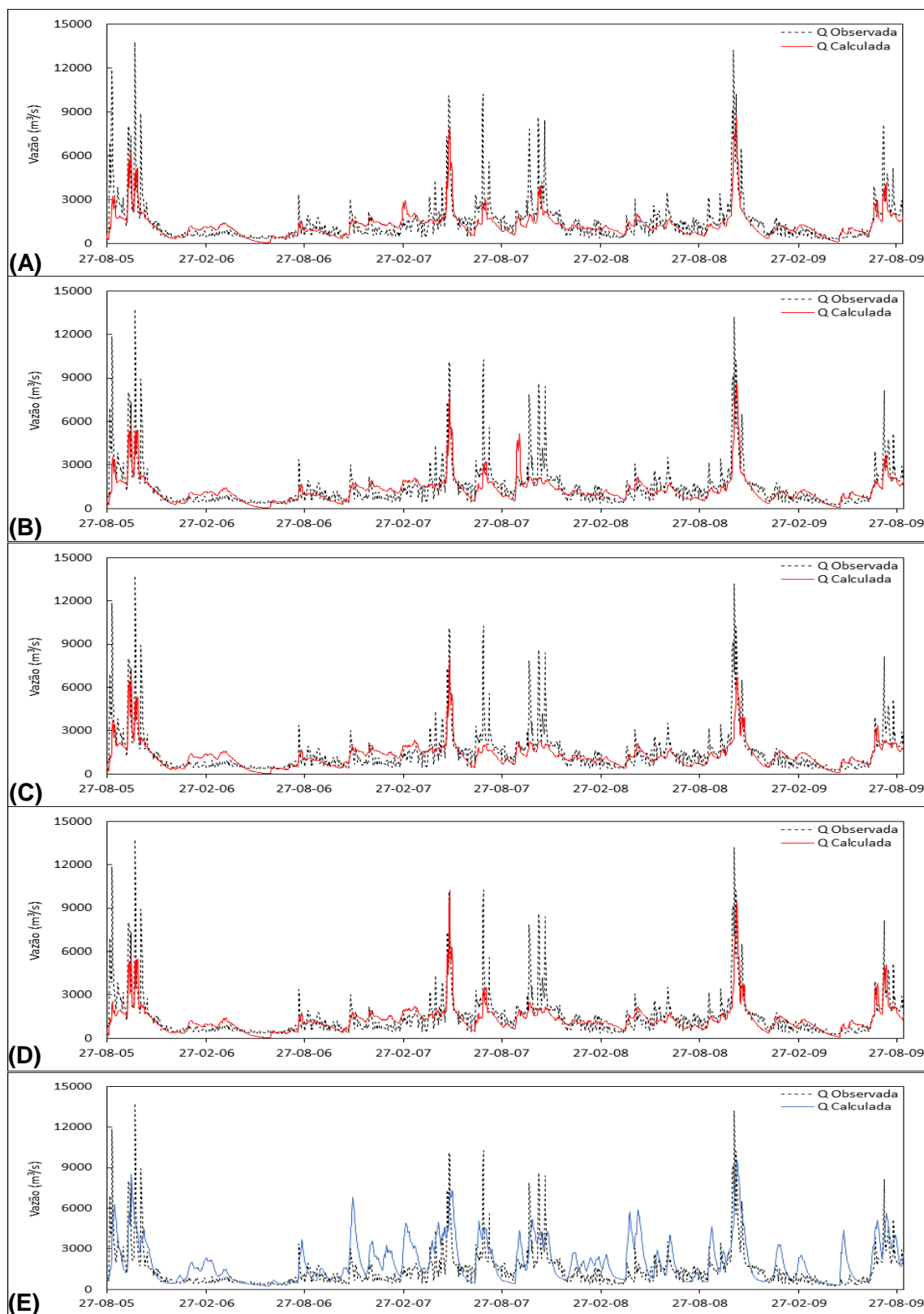


Figura 44 – Hidrogramas das vazões calculadas e observadas na bacia do Alto Uruguai, para o período da validação, referente **(A)** à condição real de pluviômetros, **(B)** ao cenário com 75%, **(C)** cenário com 50%, **(D)** cenário com 25% e **(E)** aos dados do TRMM.

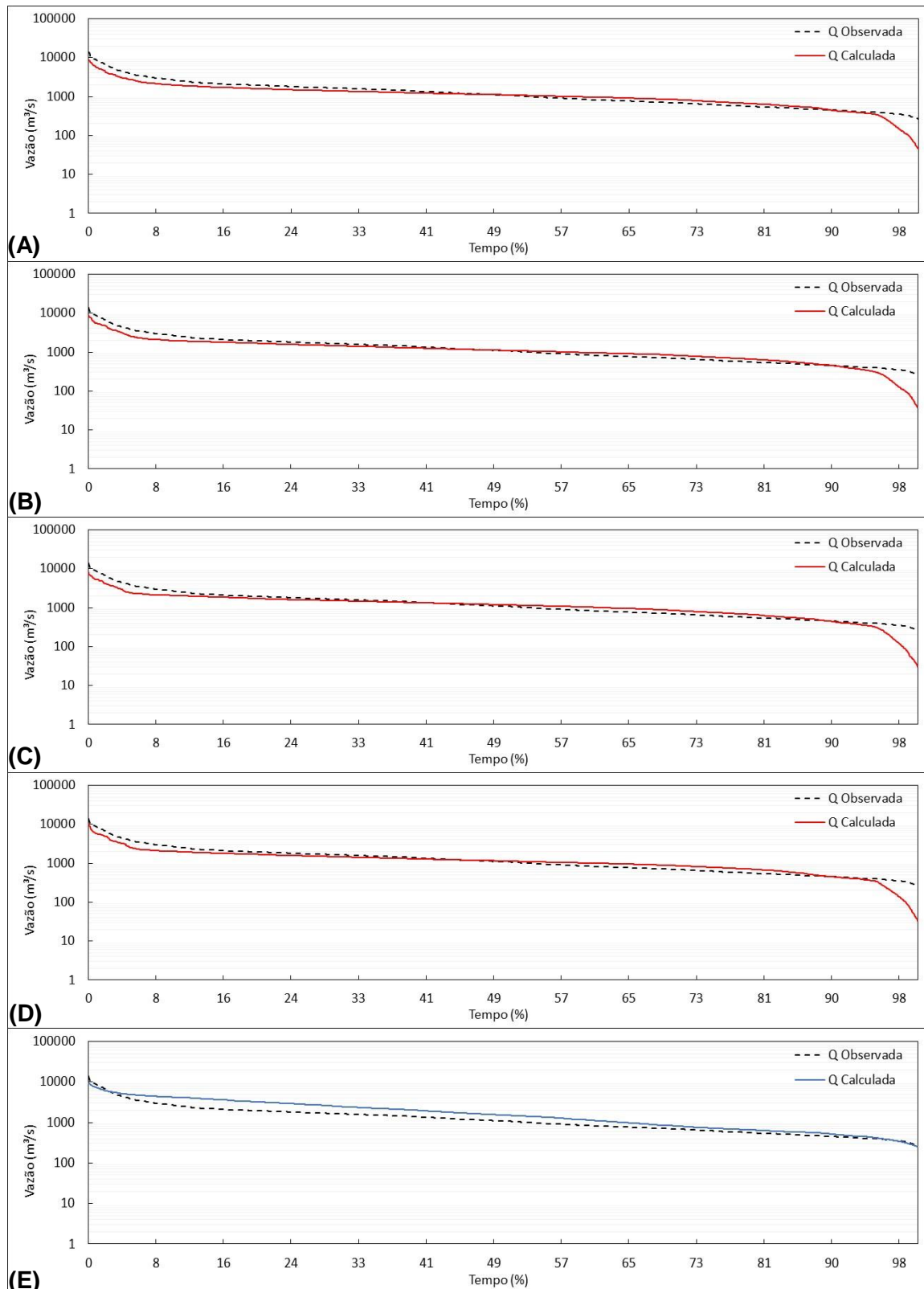


Figura 45 – Curvas de permanência das vazões calculadas e observadas na bacia do Alto Uruguai, para o período da validação, referente (A) à condição real de pluviômetros, (B) ao cenário com 75%, (C) cenário com 50%, (D) cenário com 25% e (E) aos dados do TRMM.