

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Instituto de Pesquisas Hidráulicas
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Karena Quiroz Jiménez

**PREVISÃO DE VAZÃO USANDO ESTIMATIVAS DE
PRECIPITAÇÃO POR SATÉLITE E
ASSIMILAÇÃO DE DADOS**

Porto Alegre, RS - Brasil
2017

Karena Quiroz Jiménez

Previsão de vazão usando estimativas de precipitação por satélite e assimilação de dados

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Orientador: Prof, Dr. Walter Collischonn

CIP - Catalogação na Publicação

QUIROZ JIMENEZ, KARENA
PREVISÃO DE VAZÃO USANDO ESTIMATIVAS DE
PRECIPITAÇÃO E ASSIMILAÇÃO DE DADOS / KARENA QUIROZ
JIMENEZ. -- 2017.
180 f.
Orientador: WALTER COLLISCHONN.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2017.

1. Precipitação estimada por satélite. 2. Modelo
hidrológico distribuído. 3. Assimilação de dados. 4.
Transferência de vazões. 5. Previsão de vazões. I.
COLLISCHONN, WALTER, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

*Dedicado para mis dos amores mi
esposo Jorge Luis y nuestra amada
hija Micaela*

Karena Quiroz Jiménez

Previsão de vazão usando estimativas de precipitação por satélite e assimilação
de dados

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento
Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para
obtenção do título de Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Data de aprovação: 05 de outubro de 2017

Banca Examinadora:

Prof.Dr. Julio Kuroiwa Zevallos (FIC/UNI)

Prof. Dr.Otto Corrêa Rotunno Filho (COPPE/UFRJ)

Prof. Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva (IPH/UFRGS)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por me outorgar a bolsa de estudos de Doutorado que possibilitou a minha total dedicação aos meus estudos.

Ao Professor Walter Collischonn pelas orientações realizadas durante a execução deste trabalho. Agradeço à banca examinadora, os professores Julio Kuroiwa, Otto Corrêa e Rodrigo Paiva pela crítica e revisão ao meu trabalho.

Agradeço, em geral, a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) pelos ensinamentos brindados.

Agradeço aos meus colegas do grupo de pesquisa de Hidrologia de Grande Escala (HGE) em especial a Juan Martin, Fernando, Margarita, Diogo, Mino, Paulo, Katiucia e Ayan a todos eles obrigada por compartilhar os conhecimentos e pela amizade.

Aos meus amigos e colegas peruanos Ada, Sly e Billy pela ajuda constante e pela amizade.

Agradeço aos meus pais Victor e Celia pelo esforço e sacrifício que fizeram para me dar educação.

Agradeço de maneira especial a Jorge Luis por ser um apoio constante neste longo caminho.

RESUMO

Neste estudo, trata-se de avaliar fontes de precipitação baseadas em estimativas por satélite e técnicas de assimilação de dados para previsão de vazões por meio do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH. A insuficiente representatividade espacial dos pluviômetros torna difícil a correta representação dos campos de precipitações. Por outro lado, as estimativas de satélite, embora forneçam uma descrição espacial mais consistente, são potencialmente menos acuradas. Sendo assim, procura-se utilizar métodos que combinem os dados de ambas as fontes para gerar um campo de precipitação mais consistente. Neste trabalho, implementaram-se dois modelos de combinação pluviômetro-satélite, CHUVSAT e MERGEHQ, através de uma metodologia de interpolação. Por outro lado, as técnicas de assimilação de dados acoplados aos modelos de previsão hidrológica são também de interesse neste estudo, pois minimizam as incertezas associadas ao processo de calibração de parâmetros, às variáveis de estado e dados de entrada do modelo hidrológico. Para esse propósito, escolheu-se a bacia do rio Tocantins e implementou-se particularmente a técnica de assimilação de dados de tipo sequencial chamado na literatura de filtro de partículas, conjuntamente com o método de filtro Kalman por conjunto e o método de assimilação AsMGB atualmente acoplado ao modelo MGB-IPH. O estudo mostra que a precipitação combinada utilizada como dado de entrada na simulação hidrológica permitiu reproduzir adequadamente os hidrogramas observados para o período de calibração e validação. Já para o caso das vazões resultantes, durante a etapa de previsão, a precipitação combinada mostrou-se com melhor desempenho em termos estatísticos que os métodos sem combinar, sobretudo após 24 horas de antecedência. Finalmente, a técnica de assimilação de dados por filtro de partículas conseguiu absorver os erros da simulação melhorando as medidas de desempenho na etapa de previsão sendo superior ao modelo de previsão sem considerar assimilação.

Palavras-Chave: Precipitação estimada por satélite; modelo hidrológico; previsão de vazões, assimilação de dados.

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate precipitation sources based on satellite estimates and data assimilation techniques for prediction of flows by means of the distributed hydrological model MGB-IPH. The insufficient spatial availability of rain gauges makes difficult to represent precipitation fields appropriately. In contrast, satellite estimates, although providing a more consistent spatial description, are potentially less accurate. Thus, raingauge satellite merging methods that combine data from both sources to generate a more consistent precipitation field are used herein. For this purpose, two models namely CHUVSAT and MERGEHQ were implemented using an interpolation technique. On the other hand, data assimilation techniques coupled with hydrological forecasting models are also assessed in this study. The assimilation process minimizes the uncertainties associated with the parameter calibration procedure, variable state and hydrological input data. In this manner, the sequential data assimilation technique namely particle filter in conjunction with the Kalman filter method and the assimilation method AsMGB, which is currently coupled to the MGB-IPH model, were implemented and applied to the Tocantis basin. The obtained results showed that the combined precipitation used as input data in the hydrological simulation allowed reproducing adequately the observed hydrograms for the periods of calibration and validation. In the case of the resulting flows during the forecast stage, the merging precipitation was shown to perform better in statistical terms than the uncombined methods, especially after 24 hours in advance. Finally, the data assimilation technique by particle filter was able to absorb all simulation errors, improving the performance measures in the forecasting stage, thus being superior to the forecasting model without considering assimilation.

Keywords: Raingauge satellite merging; hydrological modeling; streamflow forecasting, data assimilation.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Lista de produtos de precipitação por satélite atualmente disponíveis.....	16
Tabela 3.1 Valores máximos e mínimos dos parâmetros envolvidos no método de interpolação CHUVSAT.....	37
Tabela 3.2 Produtos de precipitação observada, por satélite e combinadas que foram usadas durante a simulação e previsão hidrológica.....	43
Tabela 3.3 Variáveis de estado do modelo hidrológico MGB-IPH que formam parte do processo de assimilação de dados do tipo sequencial.....	52
Tabela 4.1 Fração em área total e porcentagem das URHs da bacia do Rio Tocantins.	65
Tabela 4.2 Postos fluviométricos com vazão diária sobre a bacia do rio Tocantins.	67
Tabela 4.3 Postos climatológicos para a bacia do rio Tocantins.	69
Tabela 4.4 Valores das estatísticas de todos os postos fluviométricos para todas as fontes de precipitação em análises diária sobre a bacia do rio Tocantins, para o período de simulação de 1998-2006.....	79
Tabela 4.5 Estações fluviométricas de vazão na bacia do rio Tocantins.....	82
Tabela 4.6 Estações com usinas hidrelétricas na bacia do rio Tocantins.	83
Tabela 4.7 Valores estatísticos em postos fluviométricos durante a calibração para o período de Janeiro/2008 - Junho/2012.....	98
Tabela 4.8 Valores estatísticos em locais com usinas durante a calibração para o período de Janeiro/2008 - Junho/2012.....	98
Tabela 4.9 Valores estatísticos em postos fluviométricos durante a verificação para o período de Julho/2012 - Junho/2013.....	102
Tabela 4.10 Valores estatísticos em locais com usinas durante a verificação para o período de Julho/2012 - Junho/2013.	102
Tabela 4.11 Valores de coeficiente de Nash-Sutcliffe para o período de 2009-2011 em função à precipitação observada em locais com usina hidrelétrica assimilando nas estações Lajeado e Estreito com a técnica de assimilação AsMGB.....	120
Tabela 4.12 Valores de coeficiente de Nash-Sutcliffe em função à precipitação observada em estações fluviométricas no lado leste (sudeste e nordeste) da bacia do rio Tocantins com a técnica de assimilação AsMGB.....	122

Tabela 4.13 Resultados dos parâmetros de assimilação PF e EnKF para a bacia do rio Tocantins.	128
Tabela 4.14 Valores de variação média do erro quadrático médio (Δ_{rms}), raiz do erro quadrático médio (EQMR) e Nash Sutcliffe (NS) das vazões para os locais com usinas usando PF, EnKF e AsMGB.....	129
Tabela 4.15 Valores de variação média do erro quadrático médio (Δ_{rms}), raiz do erro quadrático médio (EQMR) e Nash Sutcliffe (NS) das vazões para as estações fluviométricas assimilando nas estações de Lajeado e Estreito PF, EnKF e AsMGB.....	130

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Hidrograma esquematizando a previsão de vazão na seção de um rio.	7
Figura 2.2 Precipitação acumulada (mm.ano ⁻¹) para o ano 2015 sobre América do Sul para três produtos de precipitação por satélite: (a) IMERG, (b) TRMM, (c) MERGE (d) NOAA CPC.	17
Figura 2.3 Exemplo de campos de precipitação observado por pluviômetros e estimado por satélite na bacia do rio Tocantins no Brasil. Lado esquerdo: valores de precipitação pontual medido por telemetria do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Lado direito: campo de precipitação por satélite do produto TRMM 3B42RT.	18
Figura 2.4 Exemplo de uma bacia transfronteiriça representado pelo rio Madeira. Lado esquerdo: valores pontuais de precipitação obtidos pela Agência Nacional de Águas (ANA). Lado direito: campo de precipitação por satélite do produto TRMM 3B42RT.	19
Figura 3.1 Diagramas de fluxo que descreve a metodologia proposta.	32
Figura 3.2. Representação esquemática da metodologia de CHUVSAT com os pluviômetros (representados pelo símbolo ◦) e com os valores de chuva por satélite (representadas pelo símbolo +).	36
Figura 3.3 Diagrama de fluxo que descreve a técnica de combinação de precipitação CHUVSAT para calcular os parâmetros α , β , γ , δ	38
Figura 3.4 Diagrama de fluxo que descreve a técnica de combinação de precipitação CHUVSAT.	39
Figura 3.5- Ilustração do esquema da análise objetiva de Barnes. Fonte: Extraído de Rozante <i>et al.</i> (2010).	41
Figura 3.6 Diagrama de fluxo que descreve a técnica de combinação de precipitação MergeHQ.	42
Figura 3.7 Diagrama esquemático de previsão de modelo recursivo e correção por filtragem para técnica de filtro de partícula. Extraído de Xu <i>et al.</i> , (2017).	48
Figura 3.8 Diagrama de fluxo que descreve o método de Assimilação de dados por filtro de Partículas. Baseado de Moradkani <i>et al.</i> (2005a).	50
Figura 3.9 Diagrama de fluxo da rotina de reamostragem por meio de <i>Sampling Importance Resampling</i> (SIR). Extraído de Moradkani <i>et al.</i> (2005a).	51
Figura 3.10 Esquema de transferência de informação de vazão analisando as fontes de precipitação observada.	56

Figura 3.11 Esquema de transferência de informação de vazão analisando com diferentes técnicas de assimilação.	56
Figura 4.1 Localização da bacia do rio Tocantins.	60
Figura 4.2 Altimetria em metros da bacia do rio Tocantins.	61
Figura 4.3 Localização das estações climáticas sobre a bacia do rio Tocantins. Fonte: ANA.	62
Figura 4.4 Discretização da bacia do rio Tocantins em mini-bacias e sub-bacias para aplicação do modelo hidrológico distribuído.	64
Figura 4.5 Mapa de unidades de resposta hidrológica (URH) ou blocos da bacia hidrográfica do rio Tocantins.	66
Figura 4.6 Localização das estações fluviométricas com dados diários obtidas pela Agência Nacional de Águas (ANA).	68
Figura 4.7 Valores dos parâmetros do método de interpolação CHUVSAT sobre o período de calibração diário para a bacia do rio Tocantins.	70
Figura 4.8 Valores dos pesos referente aos postos pluviométricos e de grade de satélite.	71
Figura 4.9 Campos de precipitação na bacia do rio Tocantins para os dias 1/01/2006 e 25/02/2006; lado esquerdo: com base aos postos pluviométricos da ANA; intermédio: TRMM-3B42RT; lado direito: CHUVSAT.	72
Figura 4.10 Chuva média diária sobre a sub-bacia da Ponte Paranã (30.000 km ²) para três fontes de chuva ANA, TRMM e CHUVSAT. Acima: Etapa de calibração; Abaixo: Etapa de verificação.	73
Figura 4.11 Chuva média anual sobre as mini-bacias da discretização do modelo hidrológico para as fontes de chuva ANA, TRMM, CHUVSAT para o período de 2000-2006.	74
Figura 4.12 Comparação dos hidrogramas de vazões diárias observados e calculados, durante o período de 15/09/2004 a 15/09/2006 para quatro estações fluviométricas, com as três fontes de precipitação sobre a bacia do rio Tocantins.	75
Figura 4.13 Comparação dos hidrogramas de vazões diários observados e calculados, durante o período de 15/9/2004 a 30/9/2006, para quatro estações fluviométricas, para as fontes de precipitação MERGE e MergeHQ sobre a bacia do rio Tocantins.	76
Figura 4.14 Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) em função da área de drenagem para a bacia do rio Tocantins.	77
Figura 4.15 Coeficientes estatísticos médios classificados por área de drenagem sobre a bacia do rio Tocantins a) Nash-Sutcliffe, b) Erro no volume.	80
Figura 4.16 Distribuição das estações telemétricas de precipitação horária na bacia do rio Tocantins.	81

Figura 4.17 Distribuição das estações fluviométricas e locais com usinas hidrelétricas na bacia do rio Tocantins com dados horários.....	82
Figura 4.18 Representação esquemática da metodologia de CHUVSAT para simulação horária.....	84
Figura 4.19 Superfície de valores da função objetivo do método de interpolação CHUVSAT para a região da bacia do rio Tocantins.	85
Figura 4.20 Superfície de valores dos parâmetros do método de interpolação CHUVSAT para a região da bacia do rio Tocantins.	85
Figura 4.21 Campos de precipitação sobre a região do rio Tocantins para o dia 3/Janeiro/2012 12:00 para a precipitação TELEMETRIA, 3B42RT1h (SATELITE), MERGEHQ e CHUVSAT.....	88
Figura 4.22 Campos de precipitação sobre a região do rio Tocantins para o dia 6/janeiro/2012 21:00 para a precipitação TELEMETRIA, 3B42RT1h (SATELITE), MERGEHQ e CHUVSAT.....	89
Figura 4.23 Campos de precipitação sobre a região do rio Tocantins para o dia 7/janeiro/2012 03:00 para a precipitação TELEMETRIA, 3B42RT1h (SATELITE), MERGEHQ e CHUVSAT.....	90
Figura 4.24 Campos de precipitação sobre a região do rio Tocantins para o dia 3/Janeiro/2012 15:00 para a precipitação TELEMETRIA, 3B42RT1h (SATELITE), MERGEHQ e CHUVSAT.....	91
Figura 4.25 Campos de precipitação sobre a região do rio Tocantins para o dia 10/Janeiro/2013 04:00 para a precipitação TELEMETRIA, 3B42RT1h (SATELITE), MERGEHQ e CHUVSAT.	92
Figura 4.26 Distribuição espacial da precipitação média anual para o período de 2008-2013 derivado das quatro fontes de precipitação considerada para a intercomparação (TELEMETRIA, MERGEHQ, CHUVSAT, 3B42RT1h e 3B41RT. P_{max} , P_{min} e $P_{média}$ representa a precipitação média anual máxima, mínima e média, respectivamente sobre a bacia do rio Tocantins.	94
Figura 4.27 Precipitação média mensal calculado para o período de janeiro/2008 – dezembro/2013 para as sub-bacias UHE Estreito, UHE Peixe Angical, Ponte Paranã e Farinha usando cinco fontes de precipitação TELEMETRIA, CHUVSAT, MERGEHQ, 3B42RT1h e 3B41RT.	95
Figura 4.28 Coeficientes estatísticos de Nash-Sutcliffe e erro relativo de vazão em função da área de drenagem sobre a bacia do rio Tocantins durante o período de calibração dos parâmetros do modelo hidrológico.	99
Figura 4.29 Coeficiente estatísticos médios de Nash - Sutcliffe, Nash-Sutcliffe para logaritmos e erro relativo de volume durante a etapa de calibração classificado por área de drenagem sobre a bacia do rio Tocantins.	100

Figura 4.30 Coeficientes estatísticos de Nash-Sutcliffe e Erro de volume em função da área de drenagem sobre a bacia do rio Tocantins durante o período de verificação dos parâmetros do modelo hidrológico.....	103
Figura 4.31 Coeficientes estatísticos médios de Nash - Sutcliffe, Nash-Sutcliffe para logaritmos e erro relativo no volume durante a etapa de verificação classificado por área de drenagem em postos fluviométricos sobre a bacia do rio Tocantins.	104
Figura 4.32 Hidrogramas para a estação Ponte Paranã calculados pelo modelo hidrológico MGB-IPH usando como dados de entrada a precipitação observada por TELEMETRIA, CHUVSAT, MERGEHQ, 3B42RT1h e 3B41RT (ordenados de cima para abaixo).....	106
Figura 4.33 Hidrogramas calculados para a estação Fazenda Areia calculados pelo modelo hidrológico MGB-IPH usando como dados de entrada a precipitação observada por TELEMETRIA, CHUVSAT, MERGEHQ, 3B42RT1h e 3B41RT (ordenados de cima para abaixo).....	107
Figura 4.34 Hidrogramas calculados para a estação Fazenda Santana calculados pelo modelo hidrológico MGB-IPH usando como dados de entrada a precipitação observada por TELEMETRIA, CHUVSAT, MERGEHQ, 3B42RT1h e 3B41RT (ordenados de cima para abaixo).....	108
Figura 4.35 Hidrogramas calculados para a estação Porto Real calculados pelo modelo hidrológico MGB-IPH usando como dados de entrada a precipitação observada por TELEMETRIA, CHUVSAT, MERGEHQ, 3B42RT1h e 3B41RT (ordenados de cima para abaixo).....	109
Figura 4.36 Hidrogramas calculados para a estação Jatoba calculados pelo modelo hidrológico MGB-IPH usando como dados de entrada a precipitação observada por TELEMETRIA, CHUVSAT, MERGEHQ, 3B42RT1h e 3B41RT (ordenados de cima para abaixo).....	110
Figura 4.37 Hidrogramas calculados para a estação Farinha calculados pelo modelo hidrológico MGB-IPH usando como dados de entrada a precipitação observada por TELEMETRIA, CHUVSAT, MERGEHQ, 3B42RT1h e 3B41RT (ordenados de cima para abaixo).....	111
Figura 4.38 Hidrogramas calculados para a estação São Salvador calculados pelo modelo hidrológico MGB-IPH usando como dados de entrada a precipitação observada por TELEMETRIA, CHUVSAT, MERGEHQ, 3B42RT1h e 3B41RT (ordenados de cima para abaixo).....	113
Figura 4.39 Hidrogramas calculados para a estação Peixe Angical gerados pelo modelo hidrológico usando como dados de entrada a precipitação observada por telemetria, CHUVSAT, MERGEHQ, 3B42RT1h e 3B41RT.	114
Figura 4.40 Hidrogramas calculados para a estação Lajeado calculados pelo modelo hidrológico MGB-IPH usando como dados de entrada a precipitação observada	

por TELEMETRIA, CHUVSAT, MERGEHQ, 3B42RT1h e 3B41RT (ordenados de cima para abaixo).....	115
Figura 4.41 Hidrogramas calculados para a estação Estreito calculados pelo modelo hidrológico MGB-IPH usando como dados de entrada a precipitação observada por TELEMETRIA, CHUVSAT, MERGEHQ, 3B42RT1h e 3B41RT (ordenados de cima para abaixo).....	116
Figura 4.42. Estações assimiladas e não assimiladas para a análise de transferência das vazões na bacia do rio Tocantins.....	117
Figura 4.43 Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe para o período de 2009-2011 nos locais com usinas da bacia do rio Tocantins para as diferentes fontes de precipitação observada assimilando nas estações Lajeado e Estreito.....	119
Figura 4.44 Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe para o período de 2009-2011 nas estações fluviométricas de rio da Palma, Fazenda Areia, Ponte Paranã e Fazenda Santana da bacia do rio Tocantins para as diferentes fontes de precipitação observada assimilando nas estações Lajeado e Estreito.	121
Figura 4.45 Estações para assimilação e verificação para determinação de parâmetros do método de assimilação de dados por filtro de Partículas (PF) e filtro Kalman por conjunto (EnKF)	124
Figura 4.46 Resultados de teste de sensibilidade para determinar os parâmetros do modelo de perturbação da precipitação e o número de partículas para filtro de partículas (PF). Variação média do da raiz do erro quadrático médio para estações consideradas na assimilação (pontos com estrela) e verificação (pontos em círculos) em função do tamanho do conjunto (N), erro relativo da precipitação (E ; %), decorrelação espacial (τx , °) e decorrelação temporal (τt , horas).	126
Figura 4.47 Resultados de teste de sensibilidade para determinar os parâmetros do modelo de perturbação da precipitação e o número de partículas para filtro Kalman por conjunto (EnKF). Variação média da raiz do erro quadrático médio para estações consideradas na assimilação (pontos com estrela) e verificação (pontos em círculos) em função do tamanho do conjunto (N), erro relativo da precipitação (E ; %), decorrelação espacial (τx , °) e decorrelação temporal (τt , horas).	127
Figura 4.48 Raiz do erro quadrático médio (EQMR) e coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) para o período de 2009-2011 nos locais com usinas da bacia do rio Tocantins assimilando em Lajeado e Estreito.	128
Figura 4.49 Raiz do erro quadrático médio e coeficiente de eficiência de Nash Sutcliffe nas estações fluviométricas rio da Palma, Fazenda Areia, Ponte Paranã e Fazenda Santana.....	129
Figura 4.50 Hidrogramas de vazão ($m^3 \cdot s^{-1}$) e erro relativo das vazões (%) para São Salvador em assimilação e com assimilação EnKF e PF assimilando nas estações Lajeado e Estreito.....	131

Figura 4.51 Hidrogramas de vazão ($m^3.s^{-1}$) e Erro relativo (%) para Peixe Angical sem assimilação e com assimilação EnKF e PF assimilando nas estações Lajeado e Estreito.....	131
Figura 4.52 Hidrogramas de vazão ($m^3.s^{-1}$) e Erro relativo (%) para Lajeado no período de 2009-2011 sem assimilação e com assimilação EnKF e PF.....	132
Figura 4.53 Hidrogramas de vazão ($m^3.s^{-1}$) e Erro relativo (%) para Estreito no período de 2009-2011 sem assimilação e com assimilação EnKF e PF.....	133
Figura 4.54 Série de vazões naturalizadas marcando o período de análise para previsão com AsMGB durante Jan/2013 até Mar/2014 nos locais com usinas no curso principal do rio Tocantins.....	134
Figura 4.55 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para a estação Serra da Mesa usando chuva perfeita em linha contínua e chuva zero em linha tracejada.....	135
Figura 4.56 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para a estação Cana Brava usando chuva perfeita em linha contínua e chuva zero em linha tracejada.....	136
Figura 4.57 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para a estação São Salvador usando chuva perfeita em linha contínua e chuva zero em linha tracejada.....	136
Figura 4.58 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para a estação Peixe Angical usando chuva perfeita em linha contínua e chuva zero em linha tracejada.....	137
Figura 4.59 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para a estação Lajeado usando chuva perfeita em linha contínua e chuva zero em linha tracejada.....	138
Figura 4.60 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para a estação Estreito usando chuva perfeita em linha contínua e chuva zero em linha tracejada.....	139
Figura 4.61 Hidrogramas da previsão de vazão com horizonte de previsão de 336 horas (14 dias) para estações com usinas em Serra da Mesa, Cana Brava, São Salvador, Peixe Angical, Lajeado e Estreito.....	141
Figura 4.62 Série de vazões naturalizadas para a análise de previsão com PF e EnKF durante o período de Dez/2012 até Maio/2013 nos locais com usinas no curso principal do rio Tocantins.....	142
Figura 4.63 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para Serra de Mesa usando assimilação de dados PF, EnKF e AsMGB.....	143
Figura 4.64 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para Cana Brava usando assimilação de dados PF, EnKF e AsMGB.....	144

Figura 4.65 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para El Salvador usando assimilação de dados PF, EnKF e AsMGB.	144
Figura 4.66 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para Peixe Angical usando assimilação de dados PF, EnKF e AsMGB.	145
Figura 4.67 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para Lajeado usando assimilação de dados PF, EnKF e AsMGB.	145
Figura 4.68 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para Estreito usando assimilação de dados PF, EnKF e AsMGB.	146
Figura 4.69 Hidrogramas da previsão de vazão com as técnicas de assimilação PF, EnKF e AsMGB, para locais com usinas em Serra da Mesa, Cana Brava, São Salvador, Peixe Angical, Lajeado e Estreito.	147
Figura 4.70 Série de vazões naturalizadas para a análise de previsão com PF e EnKF durante o período de Dez/2013 até Março/2014 nos locais com usinas no curso principal do rio Tocantins.	148
Figura 4.71 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para El Salvador usando assimilação de dados PF, EnKF e AsMGB.	149
Figura 4.72 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para Peixe Angical usando assimilação de dados PF, EnKF e AsMGB.	149
Figura 4.73 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para Estreito usando assimilação de dados PF, EnKF e AsMGB.	150
Figura 4.74 Hidrograma assimilando pelas técnicas de filtro de Partículas (PF) e filtro Kalman por conjunto (EnKF) em Estreito para a previsão de dezembro/2013...	152
Figura 4.75 Hidrograma assimilando pelas técnicas de filtro de Partículas (PF) e filtro Kalman por conjunto (EnKF) em Estreito para a previsão de março/2014.	153
Figura 4.76 Hidrograma de previsão para o evento de Março/2014 assimilando com filtro de Partículas (PF) e com filtro Kalman por conjunto (EnKF) no Estreito.	154

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Considerações Gerais	1
1.2	Justificativa e objetivos	4
1.3	Organização do Trabalho.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Conceitos gerais de previsão hidrológica	5
2.2	Medição da precipitação.....	7
2.2.1	Precipitação utilizando pluviômetros	8
2.2.2	Precipitação estimada por satélite.....	10
2.2.3	Produtos de precipitação por satélite	13
2.3	Precipitação por satélite na hidrologia.....	18
2.4	Precipitação por satélite em sistemas de previsão de curto prazo	24
2.5	Métodos de assimilação de dados nos sistemas de previsão de curto prazo	26
3	METODOLOGIA.....	31
3.1	Introdução.....	31
3.2	Modelo hidrológico distribuído	33
3.3	Métodos de combinação de precipitação.....	34
3.3.1	Método CHUVSAT	34
3.3.2	Método MERGEHQ	40
3.4	Alternativas para a precipitação observada	43
3.5	Assimilação de dados por filtro de partículas.....	44
3.5.1	Reamostragem para filtro de partículas	46
3.6	Acoplamento de assimilação de dados por filtro por Partículas.....	52
3.6.1	Perturbação na precipitação.....	52
3.6.2	Incertezas na observação	53

3.6.3	Determinação dos parâmetros de assimilação	54
3.7	Alternativas para a precipitação prevista	54
3.8	Análise de transferência da informação	55
3.9	Medidas de desempenho estatístico na etapa de simulação e previsão hidrológica	57
4	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	59
4.1	Introdução	59
4.2	Descrição geral da área de estudo	59
4.3	Aspectos Fisiográficos	61
4.4	Pre-processamento para o modelo hidrológico MGB-IPH	62
4.4.1	Discretização da bacia hidrográfica	63
4.4.2	Tipos de solo e Uso do solo	64
4.5	Simulação hidrológica diária	66
4.5.1	Dados observados	66
4.5.2	Estimativa da Precipitação pelo método CHUVSAT	69
4.5.3	Resultados da simulação hidrológica diária	74
4.6	Simulação hidrológica horária	81
4.6.1	Dados observados	81
4.6.2	Métodos de combinação de precipitação	83
4.6.3	Análise dos campos de precipitação	93
4.6.4	Resultados da simulação hidrológica horária	96
4.7	Assimilação de dados e análise de transferência da informação	117
4.7.1	Transferência das vazões com AsMGB	118
4.7.2	Transferência das vazões com PF, EnKF e AsMGB	123
4.8	Previsão de vazão	133
4.8.1	Previsão de vazões para diferentes fontes de precipitação	134
4.8.2	Previsão de vazões aplicando técnicas de assimilação PF, EnKF e AsMGB	142

5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	155
	ANEXOS.....	173

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

As previsões hidrológicas em uma bacia hidrográfica proporcionam uma estimativa das ocorrências futuras de vazão ou do nível de água na seção de um rio com um tempo de antecedência. As previsões podem ser requeridas em uma ampla faixa de aplicações. Por exemplo, perdas de vida e de propriedade podem ser reduzidas com o conhecimento antecipado da vazão dos rios e das áreas inundadas. As previsões hidrológicas também podem permitir melhorar a eficiência da operação em reservatórios e em outras estruturas de controle.

Previsões hidrológicas são, normalmente, obtidas através de modelos hidrológicos, e seus resultados dependem da variabilidade natural das variáveis de estado, da capacidade estrutural do modelo, da calibração dos parâmetros e dos dados de entrada (Vrugt *et al.*, 2005; Pauwels e De Lannoy, 2009). A precipitação é, possivelmente, a variável de entrada mais importante, porque determina os fluxos e variáveis de estado nos modelos hidrológicos (Nijssen e Lettenmaier, 2004). Em função desse aspecto, aprimorar o desempenho das previsões de vazão passa, muitas vezes, por melhorar a qualidade das estimativas de precipitação, especialmente envolvendo o caso de eventos extremos.

Nos últimos anos, surgiu o interesse pela estimativa de precipitação por satélite, pois essa forma de estimativa pode fornecer dados de precipitação em locais pouco monitorados por redes de estações pluviométricas. Com o desenvolvimento de novos sensores a bordo de satélites meteorológicos, as estimativas de precipitação por satélite podem agora fornecer precipitação em tempo quase real em escalas de 3 horas e até de 30 minutos. Esses dados tem potencial para analisar variações sub-diárias de eventos de inundação extrema (Hong *et al.*,

2010). Contudo pesquisas de avaliação da precipitação estimada por satélite reportam diferenças significativas quando esses dados são utilizados em modelos hidrológicos em varias bacias do mundo (Quiroz, 2009; Quiroz, 2011; Fotopoulus *et al.*, 2010; Fotopoulus *et al.*, 2011; Harris *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2017; Akhtar *et al.*, 2009; entre outros).

Algumas pesquisas abordam a integração de dados de pluviômetros e de satélite por meio de técnicas de interpolação, levando assim a um melhor ajuste entre as vazões simuladas e observadas. Por exemplo, existem os trabalhos de Jongjin *et al.* (2016), Manz *et al.* (2016), Chiang *et al.* (2007), Gebregiorgis e Hossain (2013), Jiang *et al.* (2012), entre outros, onde essas técnicas de interpolação têm sido aplicadas para comparar vazões máximas previstas. No entanto, pesquisas relacionadas ao uso da precipitação combinada como dado de entrada nos sistemas de previsão em tempo real, são mais escassas (Fan *et al.*, 2014 e Paiva *et al.*, 2013). Nesse sentido, considera-se de interesse neste trabalho conhecer de forma quantitativa as vantagens da utilização da precipitação por satélite em combinação com pluviômetros para a análise de previsão de vazões em tempo real.

Assim como é de interesse diminuir os erros nos dados de entrada, corrigir as condições iniciais da previsão, para realizar previsões hidrológicas mais confiáveis é outro assunto a pesquisar aqui. Métodos empíricos (ou heurísticos) de assimilação ou modelos autorregressivos são utilizados para corrigir as saídas dos modelos hidrológicos. Em Paz *et al.* (2007), Collischonn *et al.* (2005), Meller *et al.*, (2013), Fan *et al.*, (2016) são trabalhos aplicando métodos heurísticos para corrigir descargas em rios para grandes bacias. Nos últimos anos, técnicas avançadas de assimilação de dados do tipo sequencial vêm sendo exploradas com resultados promissores para casos de previsão de cheias em tempo real. Essas técnicas permitem corrigir de forma simultânea os erros associados aos dados de entrada, saída e aos parâmetros do modelo (Liu *et al.*, 2012; Reichle, 2008; Moradkhani *et al.*, 2005a; Moradkhani *et al.*, 2005b). Na meteorologia operacional as técnicas de assimilação têm sido já aplicadas com antecedência, porem na área de hidrologia seu uso ainda é relativamente recente. Essas técnicas se apresentam como procedimentos práticos que combinam observações independentes com modelos determinísticos, considerando assim as incertezas dos modelos e observações. As técnicas avançadas de assimilação mais comuns em hidrologia são filtro Kalman por conjunto (Evensen, 2003 e Evensen, 2004), filtro de partículas (Arulampalam *et al.*, 2002; Moradkhani *et al.*, 2005a) e variacional (Coustau *et al.*, 2013).

A técnica maioritariamente explorada é o filtro Kalman por conjunto (Vrugt et al., 2006; Paiva *et al.*, 2013; Hirpa, 2013; DeChant e Moradkhani *et al.* 2012; Dumedah e Coulibaly (2013); Noh et al., 2013; Rakovec et al., 2015; Moradkhani *et al.*, 2005b; entre outros), os resultados são úteis não somente para análise de previsão de cheias senão também para transferir informação de variáveis hidrológicas em locais pouco monitorados como é demonstrado nos trabalhos de Xie *et. al* (2014), Lorenz *et al.* (2015) e Zhang et al. (2015). A técnica de filtro de partículas tem ganhado maior interesse também, pelos pesquisadores por seu fácil acoplamento computacional (Salamon e Feyen 2009; Weerts e El serafi, 2006 e Nagarajam *et al.*, 2011, Noh et al., 2011; Xu et al., 2017; Matgen et al., 2010; Moradkhani *et al.*, 2005a; Moradkhani *et al.*, 2006; Moradkhani e Sorooshian, 2009; entre outros).

No âmbito regional, pesquisas em bacias da América do Sul aplicando técnicas avançadas de assimilação de dados em modelos hidrológicos distribuídos são ainda limitados. Trabalhos como Paiva *et al.*, (2013) e Mendoza (2010) tem contribuído com o conhecimento de ditas técnicas, usando o filtro Kalman por conjunto. No entanto, a técnica de filtro de partículas em previsão de vazões em tempo real para bacias de grande porte não tem sido aplicado regionalmente. Nesse sentido, a abordagens de técnicas de assimilação de dados, em especial filtro de partículas podem, também, contribuir com o aprimoramento de sistemas de previsão de vazões em tempo real e poderia ser uma ferramenta útil para transferir informação em locais pouco monitorados para bacias brasileiras.

1.2 Justificativa e objetivos

Os dados de entrada do modelo hidrológico e as incertezas associadas às condições iniciais podem ser componentes importantes para estudar, compreender e melhorar as respostas nas previsões hidrológicas. O objetivo da pesquisa é avaliar técnicas e fontes de dados que podem resultar em melhorias dos métodos de previsão hidrológica.

Em primeiro lugar, avalia-se a utilização de estimativas de chuva por satélite e a combinação de chuva estimada por satélite com a chuva observada em pluviômetros para a modelagem e para a previsão. Em segundo lugar, avaliam-se técnicas de assimilação de dados, com ênfase para a técnica de filtro de partículas.

Propõe-se responder os seguintes questionamentos:

- *Existem vantagens na combinação de estimativas de chuva por satélite e por pluviômetros para simulação hidrológica e previsão em tempo real?*
- *As técnicas de assimilação de dados podem auxiliar na estimativa de vazões em locais não monitorados?*
- *Existem vantagens das técnicas de assimilação de dados do tipo sequencial acoplado ao modelo hidrológico de previsão de vazões em tempo real?*

1.3 Organização do Trabalho

A Tese está dividido em 5 capítulos. No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os conceitos gerais de previsão hidrológica, precipitação, aplicações tanto em modelagem hidrológica como em sistemas de previsão em tempo real e, uma revisão de pesquisas relacionadas às técnicas de assimilação de dados. O capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada neste trabalho, detalhando por meio de diagramas os procedimentos a seguir nos experimentos realizados. O capítulo 4 é apresentada a bacia de estudo mostrando resultados do processo de calibração e verificação do modelo hidrológico com diferentes fontes de precipitação. Assim mesmo, os resultados de análise de transferência de informação e previsão de vazões usando assimilação de dados são explicados junto com uma discussão dos resultados. O capítulo 5 são apresentadas as conclusões dos resultados obtidos e uma série de recomendações que são feitas para a futura extensão e desenvolvimento do trabalho.

CAPITULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conceitos gerais de previsão hidrológica

A previsão hidrológica é a estimativa das ocorrências futuras de uma ou mais variáveis hidrológicas para um determinado intervalo de tempo (Lettenmaier e Wood, 1993; Sene, 2010). Tipicamente, as variáveis hidrológicas previstas são as vazões (ou níveis) nos rios, as precipitações sobre regiões que contribuem aos locais de interesse e também a umidade do solo.

A previsão hidrológica é requerida para um tempo de antecedência determinado, que pode ser de horas ou menos quando o risco de perda de vida ou da propriedade é alto, até anos ou décadas para planejamento estratégico de longo prazo. De acordo com Sene (2010), em hidrologia, é frequente as aplicações segundo três abordagens:

- tomada de decisão: em termos de tática e emergência podem incluir os sistemas de alerta de cheias, programação de irrigação, operação de abastecimento de água e controle de sistemas de drenagem urbana;
- sazonal ou interanual: incluem a previsão de estiagem, manejo dos recursos hídricos, previsão do degelo anual, entre outros;
- estratégica: inclui manejo de bacias, avaliação dos impactos às mudanças climáticas na operação de reservatórios, sistemas de aquíferos, entre outros.

Porém, os limites entre essas escalas não são claras e dependem diretamente da aplicação. Para a previsão hidrológica de vazões (ou níveis), o tempo de antecedência estimado é restrito ao tempo de resposta da bacia, ao tempo de propagação da onda de cheia ao longo do canal principal e às previsões meteorológicas quantitativas no intervalo de previsão (Sene, 2010; Tucci, 2005; Tucci *et al.*, 2003).

A previsão de curto prazo tem antecedência de algumas horas ou dias. Segundo Tucci *et al.* (2003), a previsão de vazão de curto prazo pode ser realizada usando modelos simplificados de propagação de onda de cheia ou modelos de transformação do tipo chuva-vazão.

Previsão com base na propagação de onda de cheia é realizada, em geral, para casos de grandes bacias, geralmente de baixa declividade ou com grandes áreas de inundação. Nesses casos, os sistemas são baseados na utilização de informação de vazão ou nível em locais a montante do ponto de interesse para a previsão. A propagação da onda pode ser realizada utilizando modelos empíricos como técnicas de redes neurais ou modelos hidrodinâmicos de propagação de onda de cheia.

Os sistemas de previsão que usam modelos de transformação chuva-vazão consideram a utilização dos dados de chuva observada de uma rede telemétrica em tempo real. Nesse tipo de sistemas, podem-se ser usados modelos físicos de transformação chuva-vazão do tipo concentrado, do tipo distribuído ou modelos de caixa preta. Para o horizonte de previsão com tempo de antecedência menor do que duas ou seis horas, a previsão é chamada de “*nowcasting*” ou previsão para um instante atual. Nessa faixa de tempo, é possível criar algumas hipóteses da tormenta (como a velocidade e direção constante e a inalterabilidade da forma das nuvens) para regiões pequenas ou áreas urbanas fazendo uso de radares meteorológicos, satélites geoestacionários ou rede telemétrica.

Um dos principais problemas existentes no Brasil quanto ao uso de modelos hidrológicos para previsão hidrológica é a baixa densidade dos postos pluviométricos em tempo real, e a baixa disponibilidade de radares meteorológicos, o que afeta a estimativa da precipitação média numa bacia e sua distribuição espacial. Uma alternativa, nesse caso, pode ser a utilização de estimativas de precipitação por satélite. Diversas pesquisas recentes têm avaliado as estimativas de precipitação por satélite na área de hidrologia. Com o desenvolvimento de novos sensores a bordo de satélites meteorológicos, as estimativas de precipitação por satélite podem estar disponíveis em poucas horas.

Em um ambiente operacional, além dos dados de entrada que ativam os modelos de previsão hidrológica de curto prazo, melhorar os resultados da previsão diminuindo as incertezas nas condições iniciais da previsão é um assunto a tratar. O processo de usar dados observados recentes para inicializar os estados do modelo hidrológico é chamado de assimilação de dados ou atualização de dados (Sene, 2010; Liu *et al.*, 2012). O principal

motivo de usar técnicas de assimilação de dados é diminuir as incertezas causadas por parâmetros do modelo, precipitação ou outros dados de entrada e condições iniciais.

O uso das técnicas de assimilação em modelos de previsão hidrológica é recomendado como boa prática (Sene, 2010). A assimilação em modelos de previsão hidrológica depende, também, da qualidade dos dados de entrada e dados errôneos podem degradar os resultados da previsão, mesmo usando assimilação.

O interesse, nesta tese, é a previsão hidrológica de vazões nos rios. Nesse sentido, a Figura 2.1 mostra um esquema com termos sobre previsão de vazão usando um modelo hidrológico chuva-vazão. A Figura mostra o hidrograma de previsão para um intervalo de tempo com início da previsão no tempo T_o até o final da previsão (T_f).

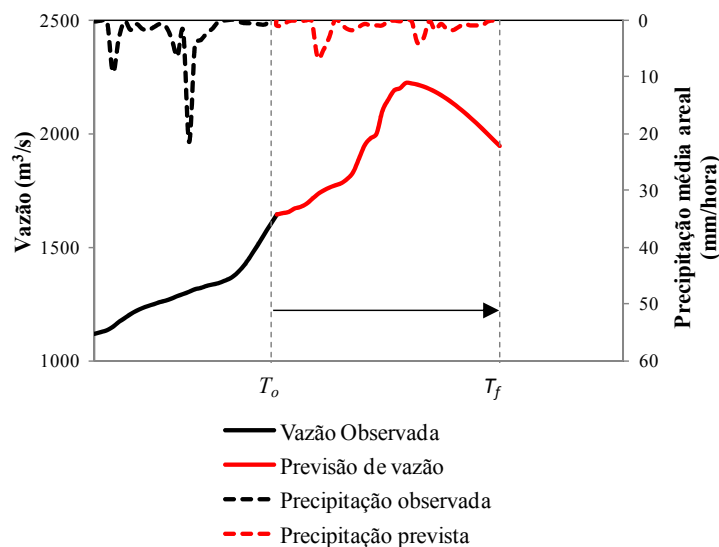


Figura 2.1 Hidrograma esquematizando a previsão de vazão na seção de um rio.

2.2 Medição da precipitação

A precipitação é uma componente fundamental do ciclo hidrológico e está relacionada à circulação atmosférica por meio da liberação de calor latente (Michaelides *et al.*, 2009). A água na atmosfera encontra-se em estado de fluxo contínuo em que o vapor de água é introduzido na atmosfera por meio da evaporação e evapotranspiração (Sumner, 1998). Esse vapor d'água é elevado e distribuído vertical e horizontalmente por correntes de ar formando nuvens. A água na nuvem segue um mecanismo interno e complexo de processos de colisão, agregação e expansão das partículas de gelo até a condensação; no caso da precipitação

líquida, formam-se gotículas de água que, pela gravidade, atingem o solo (Shuttleworth, 2012).

Uma vez que a precipitação chega à superfície da Terra, esta é usualmente expressa em milímetros ou em polegadas de coluna de água e quantificada sobre um período de tempo. A precipitação sobre a superfície da Terra não é homogênea, sendo que a topografia e a direção dos ventos são alguns fatores locais e regionais que definem o comportamento da chuva em todo o planeta (Sumner, 1998).

2.2.1 Precipitação utilizando pluviômetros

Os pluviômetros têm sido o principal instrumento para quantificar a precipitação; permanece sendo o mais popular instrumento para observar a precipitação acumulada. Os pluviômetros são recipientes instalados na superfície terrestre, com dimensões padronizadas. O equipamento interior consiste de um funil e um recipiente. A forma convencional de medir a chuva é por leitura da proveta graduada que contém o volume de água captada (Sumner, 1998).

Os pluviógrafos, assim como os pluviômetros, possuem um recipiente receptor padronizado. O modelo mais utilizado no Brasil é o de sifão, o qual é conectado ao recipiente que verte toda a água armazenada quando o volume retido equivale a 10 cm de chuva. O avanço da tecnologia para aquisição e registro de precipitação foi possível aos registradores eletrônicos, também conhecidos como “*dataloggers*”. Um funil faz a captura da chuva e leva a água coletada para um mecanismo basculante, semelhante a um pequeno recipiente basculante duplo. Ao acumular certo volume de água, o mecanismo se desequilibra, tombando para o lado, despejando a água coletada e emitindo um pulso eletrônico que será registrado no “*datalogger*” (Tapiador *et al.*, 2012). Outros aparelhos de qualidade são montados com tecnologia de relógios mecânicos, e sua precisão é razoável para chuvas de pequena intensidade. Entretanto, mesmo no caso dos melhores aparelhos, é sabido que o desempenho desses equipamentos pode apresentar tendência à sub-medição em casos da ocorrência de chuvas mais intensas. Além desses problemas mencionados na medição, existem erros associados à descalibração dos aparelhos pelo pouso de aves, ventos fortes e sujeira, entre outros.

No Brasil, uma parte da rede de observação de pluviômetros convencionais e não convencionais é mantida pela Agência Nacional de Águas (ANA) com aproximadamente 2400 estações distribuídas nas 12 regiões hidrográficas brasileiras, assim como cerca de 283 estações telemétricas, registradas até o final do ano 2016. Além da Agência Nacional de Águas, existem outras instituições e empresas que mantêm pluviômetros, como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), empresas de geração de energia hidrelétrica e empresas de pesquisas agropecuárias.

Os pluviômetros apenas podem proporcionar uma fração da cobertura total, sendo incapazes de representar a variabilidade espacial da precipitação numa maior região. De acordo com o *US Army Corps of Engineers* (1996), o desenho ótimo da rede deve ser distribuído uniformemente com uma densidade espacial determinado pela seguinte relação: $N = A^{0,33}$; onde N é o número de pluviômetros, e A é área da bacia em milhas quadradas. Para Organização Mundial de Meteorologia (OMM) recomenda que a densidade seja função de cada tipo de relevo: um pluviômetro em 900 km² em regiões costeiras; 250 km² por pluviômetro em áreas montanhosas; 575 km² por pluviômetro em regiões com morros e colinas no interior; e 20 km² por pluviômetro em áreas urbanas (OMM, 2008).

Diferentemente dos pluviômetros, os radares meteorológicos permitem estimar a precipitação de forma razoavelmente contínua no tempo e no espaço. Em alguns casos, esses dados podem complementar a informação dos pluviômetros. Porém, a estimativa de precipitação por radar é baseada em medições indiretas, e têm diversas fontes de incerteza, como a calibração manual dos equipamentos, a orientação apropriada da antena de controle de radar, a atenuação devido à umidade ou neve, os ruídos não meteorológicos e a estimativa dos parâmetros da função Z-R, que relaciona a refletividade e a intensidade da precipitação (Einfalt e Michaelides, 2008).

Recentes pesquisas apontam ao uso da rede de comunicação celular comercial para obter intensidades da precipitação em tempo real. A descoberta foi publicada por Chwala *et al.* (2012) e Overeem *et al.* (2016), a partir dos dados de atenuação desde as sinais de ondas de micro-onda, fazendo uso do fato de que as gotas de chuva consideráveis absorvem e dispersam a radiação eletromagnética correspondente às frequências entre 1 GHz e 100 GHz. Porém, essa metodologia vem sendo testada ainda para áreas de bacias de pequeno porte com alcance de sinais de onda da rede de comunicação celular.

2.2.2 Precipitação estimada por satélite

A precipitação pode ser observada desde o espaço através de sensores a bordo de satélites que orbitam de duas formas, órbita geossíncrona e órbita terrestre baixa. Os satélites geoestacionários posicionam-se a uma altura aproximada de 36.000 km, circulando em torno da Terra em uma órbita geossíncrona, à mesma velocidade angular da Terra sobre a linha equatorial. Essa característica da órbita permite que satélites geoestacionários continuamente observem uma mesma região da Terra, obtendo informação mais detalhada, a qual é de interesse quando são desejados dados em curtos intervalos de tempo, por exemplo, de 15 em 15 minutos (Kidd, 2001). Já os satélites de órbita terrestre baixa circulam constantemente a Terra numa órbita próxima da direção norte-sul. Os satélites nessa órbita estão posicionados a uma altura aproximada de 900 km, mais próximo da Terra podendo revistar uma mesma região mais de uma vez ao dia (Kidd, 2001).

A radiação que viaja através da atmosfera interage com as moléculas suspensas por meio dos processos de reflexão, espalhamento e a absorção. A energia desses processos é detectada pelos sensores que interpreta, dita energia, nas bandas espectrais nas faixas de visível, infravermelho e micro-onda. A interpretação individual em cada uma dessas bandas espectrais tem permitido estimar a precipitação por meio de algoritmos matemáticos.

Com os anos, as formas quantitativas de obter precipitação desde o espaço têm evoluído para métodos mais diretos com interpretação mais física do processo de precipitação. Agora se pode afirmar que os sensores a bordo de satélites de órbita baixa são os únicos instrumentos capazes de recuperar as estimações de precipitação de forma global com melhor homogeneidade (Tapiador *et al.*, 2012). Assim mesmo, os algoritmos que usam uma combinação desde bandas individuais como visível, infravermelho e micro-onda permitem uma melhor estimativa da precipitação mais realista a nível global.

2.2.2.1 Estimativa de precipitação com base na radiação nas bandas do visível e infravermelho

A radiação percebida dentro da faixa do espectro visível vem da radiação solar refletida pelo topo das nuvens. A premissa física da estimativa da precipitação usando o espectro da banda visível é que nuvens que apresentam mais brilho possuem maior espessura

e tem mais probabilidade de formar precipitação. A maioria dos sistemas que operam na faixa do espectro visível opera durante o dia (Lensky e Levizzani, 2008; Kidd, 2001).

A radiação percebida dentro da faixa do espectro infravermelho (IR) é derivada da relação entre a temperatura de brilho do topo da nuvem, altura e espessura das nuvens. Baixas temperaturas de brilho implicam em maior altura de topo de nuvem, resultando em grande espessura da nuvem e alta probabilidade de precipitação. Altas temperaturas de brilho implicam em topos de nuvem baixos e baixa probabilidade de precipitação (Lensky e Levizzani, 2008; Kidd, 2001).

As técnicas de estimativa de precipitação que usam o espectro do visível e infravermelho estimam a precipitação de uma forma indireta uma vez que as gotas de chuva não são diretamente observadas pelo sensor do satélite. A tarefa de estimar a chuva é feita por algoritmos que relacionam a taxa de chuva de nuvens precipitantes à espessura e/ou temperatura de brilho das nuvens (Kidd, 2001).

Diversas técnicas foram desenvolvidas baseadas na combinação dos espectros IR e VIS, se podem mencionar as técnicas bi-espectrais e ciclo de vida, onde a taxa de precipitação de uma nuvem convectiva é função do estágio do ciclo de vida. Outros algoritmos como de chuva multiespectral, técnicas estratiforme-convectiva, técnicas de classificação de nuvens, índice de precipitação e hidroestimador foram desenvolvidas (Vila, 2011). Este último é um método automático que usa uma função empírica exponencial entre taxa de precipitação por radar e a temperatura de brilho do topo das nuvens obtida extraídas de sensores a bordo de satélites geoestacionários (Vila, 2011).

Métodos com base na radiação IR têm a vantagem de proporcionar campos de precipitação com altas resoluções, pois esses sensores são levados por satélites geoestacionários. A resolução temporal pode ser de 15 minutos e a resolução espacial menor a 3 km com satélites operados pelo EUMETSAT (Tapiador *et al.*, 2012). No entanto, a estimativa é indireta. Por outro lado, a radiação detectada pelos sensores IR vem do topo das nuvens e não da sua base, onde a precipitação efetivamente ocorre. A identificação incorreta pode ocorrer, também, porque algumas nuvens frias, como *cirrus* situadas a considerável altitude, não estão associadas com a precipitação, enquanto nuvens quentes com múltiplas camadas (estratiformes) podem produzir quantidade de precipitação significativa e não ser percebida pelos sensores IR (Jensen, 2009; Tapiador *et al.*, 2012).

2.2.2.2 Estimativas de precipitação com base em radiação na banda de micro-onda

As técnicas para estimar precipitação a partir da radiação passiva de micro-onda (MW) estão baseadas na observação da radiação emitida da superfície da Terra (superfícies oceânicas e continentais) que interage com os hidrometeoros (Tapiador *et al.*, 2012). Essa interação é feita mediante processos de absorção, emissão ou espalhamento, e, dependendo da frequência, podem ser inferidas propriedades físicas da nuvem amostrada permitindo identificar partículas precipitáveis como água, gelo ou neve.

A faixa de frequência do espectro eletromagnético para radiação de micro-onda passiva varia entre 1 GHz a 300 GHz, porém muitos dos radiômetros de micro-onda passivo que operam atualmente são em frequências de 6 GHz a 190 GHz. A radiação percebida dentro da faixa do espectro de micro-ondas é dividida, principalmente, em dois grupos, dependendo da frequência da radiação: baixa frequência (aproximadamente abaixo de 40 GHz) e alta frequência (aproximadamente superior a 60 GHz).

A radiação de baixa frequência é essencialmente sensível à emissão do vapor d'água, nuvens, precipitação e à superfície continental. Técnicas com base na emissão da radiação são usadas especialmente sobre o oceano, onde a superfície oceânica é radiométricamente fria, e a presença de precipitação de fase líquida produz um realce que pode ser medida pelo radiômetro. Os métodos de emissão não são usados sobre a superfície terrestre em função da alta emissividade superficial (Tapiador *et al.*, 2012).

Uma abordagem baseada em dispersão indireta pode ser usada tanto sobre o continente como sobre o oceano. De forma semelhante às técnicas de estimação de precipitação com base no infravermelho, o sinal de dispersão em altas frequências (tipicamente perto de 85 GHz) depende do gelo acima da camada de congelação, e a emissão térmica está mais relacionada aos processos de precipitação e, portanto, às chuvas superficiais. A precipitação de nuvens frias vem da água de fase sólida derretida, tornando técnicas de espalhamento úteis para altas latitudes (Jensen, 2009; Tapiador *et al.*, 2012).

A desvantagem principal de usar técnicas passiva de micro-onda é a limitação da escala espacial. Sobre superfície oceânica, a precipitação pode ser observada em escala de 50x50 km² e sobre a superfície terrestre de 10x10 km². Outra observação feita sobre os métodos que estimam precipitação a partir de micro-onda passiva é assumir que a área de precipitação é homogênea dentro da área de visão do sensor, sendo que existem casos que a

área de visão observa uma parte da área precipitável. Outra desvantagem é a difração das ondas eletromagnéticas devido ao tamanho da antena do sensor de micro-onda passiva (Michaelides *et al.*, 2009; Tapiador *et al.*, 2012). Recentes investigações em tecnologia de sensor de micro-onda passiva têm levado a explorar sensores de altas frequências, como o *Special Sensor Microwave Imager/Sounder* (SSMIS), *Advanced Microwave Sounding Unit-B* (AMSU-B), *Microwave Humidity Sounder* (MHS) (Michaelides *et al.*, 2009). Em particular, radiômetros que detectam frequências mais elevadas devem contribuir a mitigar os efeitos negativos da emissividade e as propriedades da dispersão da superfície continental que causam erros substanciais na estimação da chuva e a neve (Tapiador *et al.*, 2012).

Diferentemente dos sensores passivos de micro-onda, os sistemas ativos de micro-onda (ou radares) a bordo de satélites geram sua própria fonte de energia. O equipamento gerador envia um pulso eletromagnético ao transmissor em um comprimento de onda específico (frequência) e recebe o retroespalhamento direto dos elementos atmosféricos. O primeiro radar no espaço foi o *Precipitation Radar* (PR), na banda Ku (12,5 - 18 GHz), montado no satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) (Kummerow *et al.*, 1998). O segundo radar no espaço é operado a partir do satélite *CloudSat* desde o ano 2006 na banda W. Esse radar facilita a quantificação da precipitação de magnitudes pequenas e observa propriedades das nuvens (Tapiador *et al.*, 2012).

2.2.3 Produtos de precipitação por satélite

Alguns métodos para estimar a precipitação por satélite utilizam um único tipo de sensor para realizar a estimativa, mas a maioria dos métodos baseia-se em combinações de informações de múltiplos sensores, combinando radiação do espectro visível, infravermelho e micro-onda. A comparação entre precipitação estimada desde sensores visíveis, IR e MW passivo mostraram que técnicas usando micro-onda passivo estimaram melhor a precipitação instantânea, enquanto que técnicas usando visível e IR proporcionaram melhores estimativas acumuladas (Ebert, 2007).

O grupo de produtos de precipitação global é o TRMM *Multisatellite Precipitation Analysis* (TMPA-TRMM). Estes produtos são todos derivados basicamente do satélite TRMM (Huffman *et al.*, 2007), que forneceu diversos produtos de estimativas através de combinação de instrumentos, tais como o imageador de microondas (TMI), radar de precipitação (PR), radiômetro nas bandas visível, no infravermelho (VIRS) e adicionalmente

incluem correções de precipitação observada por pluviômetros. Os produtos de precipitação por satélite do projeto TMPA-TRMM eram liberados com um atraso de, no máximo, nove horas, a saber: 3B40RT, 3B41RT e 3B42RT. Na atualidade o satélite TRMM já não opera mais, devido ao processo de transição dos dados do TRMM para o projeto *Global Precipitation Measurement* (GPM). No entanto, os dados obtidos do satélite TRMM ainda serão processados e disponíveis até 2018 (Huffman, 2015).

Técnicas de combinação usando esquema de advecção são os produtos conhecidos como CMORPH (Joyce *et al.*, 2004), GSMaP (Kubota *et al.*, 2007) e REFAME (Behrangi *et al.*, 2010). Essas técnicas baseiam-se em estimar precipitação de sensores de MW de vários satélites em órbita e são corrigidas usando técnicas de imagens de IR que fornecem informação sobre a dinâmica de sistema da precipitação. Outras técnicas que incorporam estimativas de IR e VIS utilizando técnicas de redes neurais é o PERSIANN (Sorooshian *et al.*, 2000).

Um grupo que produtos de precipitação global e regional denominado “*blending products*” vem sendo de interesse para aplicações em climatologia e hidrologia. Esses produtos são o resultado de técnicas de interpolação usando fatores de ponderação de diversas fontes de precipitação de diversos produtos de satélite, como por exemplo, produtos de TMPA-TRMM, e de estações pluviométricas coletadas de um sistema de telecomunicação global. Em América do Sul, o MERGE (Rozante *et al.*, 2010) é um produto administrado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) com dados a partir do ano 1998. Esse produto usa um método de agregação entre a precipitação estimada do 3B42RT e de estações pluviométricas e disponíveis cada 24 horas em resolução espacial de 0,2°, o fato que facilita seu uso para aplicações hidrológicas em tempo real.

Outros dois produtos *blending* de precipitação global são o CHIRPS (Funk, 2015) e MSWEP (Beck *et al.*, 2017) são apresentados como produtos potenciais para aplicações hidrológicas para bacias de pequeno porte por apresentarem com resoluções espaciais mais detalhadas em torno a os valores de 0,1°. O produto *Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations* (CHIRPS) usa o algoritmo de interpolação com ponderadores do inverso da distancia. O produto *Multi-Source weighted-ensemble precipitation* (MSWEP) é um produto combinado entre precipitação observada e satélite, e gera campos de precipitação com resolução temporal de 3 horas e 1 dia. A precipitação MSWEP em cada célula de grade é calculada de acordo a uma ponderação para cada fonte, duas bases de postos pluviométricos,

três estimativas de satélite e duas de reanálise. Dados de postos pluviométricos são obtidos desde uma rede densa de duas bases de dados de precipitação global *CPC unified Gauge-based Analysis of Global Daily Precipitation* e *GPCC Global Precipitation Climatology Centre*. As estimativas de precipitação por satélite como CMORPH, GSMaP e 3B42RT formam parte do conjunto de dados utilizados para gerar o produto MSWEP em escala global.

O novo projeto GPM (Huffman, 2015) foi lançado no dia 28 de fevereiro de 2014 e é composto por uma rede internacional de satélites meteorológicos. O projeto consiste de um sistema de sensores de micro-onda ativos e passivos que serve como padrão de referência para unificar as medidas de precipitação desde a constelação de satélites para propósitos operacionais e de pesquisa.

O projeto GPM possui sensores do tipo imageador de micro-onda multicanais com scanner cônico abrangendo uma faixa de frequência entre 10 e 183 GHz e radar de precipitação com frequência dupla (Hou *et al.*, 2008; Huffman, 2015; Guo *et al.*, 2016). Os produtos de precipitação do GPM para precipitação tem o nome de IMERG (*Integrated Multisatellite Retrievals for the Global Precipitation Measurement*). Estão disponíveis em escala temporal de 30 minutos e escala espacial de 0,1° com área que abrange desde as latitudes de $\pm 90^\circ$, maior do que seu predecessor TMPA, que fornece informações até às latitudes $\pm 60^\circ$.

Os produtos de IMERG são disponibilizados duas vezes (cada 30 minutos) em tempo quase real. Primeiramente, calcula-se o IMERG-E, com 4 horas de atraso, e depois o produto IMERGHH- L, com 12 horas de atraso. Um produto chamado IMERGHH- F apresenta precipitação corrigida com precipitação mensal de postos pluviométricos e é liberado com um tempo de atraso de 2,5 meses.

Uma lista atualizada dos produtos de precipitação estimada por satélite é regularmente mantida pelos grupos *International Precipitation Working Group (IPWG)* e *Program to Evaluate High Resolution Precipitation Products (PEHRPP)*. A Tabela 2.1 mostra um grupo de produtos de precipitação por satélite e que atualmente estão disponíveis.

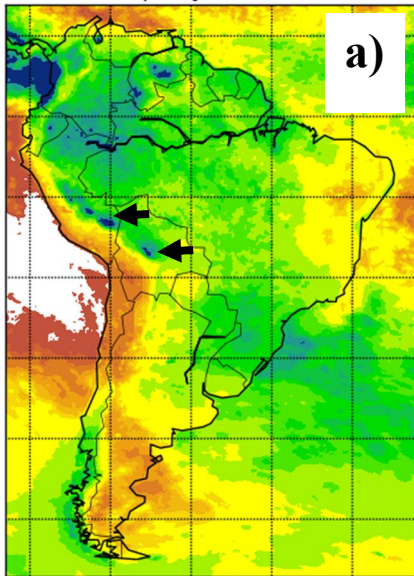
Tabela 2.1 Lista de produtos de precipitação por satélite atualmente disponíveis.

Produto	Sensores	Escala Temporal	Escala Espacial	Período	Tempo quase Real?
TMPA-3B40RT	MW + IR	3 horas	0,25 ⁰	2000 – 2018 ^(*)	SIM (9 horas)
TMPA -3B41RT	IR	1 hora	0,25 ⁰	2000 – 2018 ^(*)	SIM (9 horas)
TMPA -3B42RT	IR + MW + Radar	3 horas	0,25 ⁰	2000 – 2018 ^(*)	SIM (9 horas)
TMPA -3B42V7	IR + MW + Pluviômetros	3 horas	0,25 ⁰	1998 – 2018 ^(*)	NÃO (3 meses)
IMERG- E	MW + IR	30 minutos	0,1 ⁰	2014 - hoje	SIM (4 horas)
IMERG-L	MW + IR	30 minutos	0,1 ⁰	2014 - hoje	SIM (12 horas)
IMERG-F	MW + IR + Pluviômetros	30 minutos	0,1 ⁰	2014 - hoje	NÃO (2,5 meses)
GSMaP	MW + IR	1 hora 1 dia	0,1 ⁰ ; 0,25 ⁰	2008 - hoje	SIM (4 horas desde 2008)
CMORPH / QMORPH	MW + IR + Pluviômetros	30 min, 3 horas, 1 dia	8 km; 0,25 ⁰	2002 - hoje	SIM
PERSIANN	MW + IR	6 horas	0,04 ⁰ ; 0,20 ⁰	1998 - hoje	SIM
MERGE	TMPA-3B42RT + Pluviômetros automáticos	1 dia	0,25 ⁰	2000 – hoje	SIM(1 dia)
MERGE-GPM	IMERG + Pluviômetros automáticos	1 hora	0,1 ⁰	2014 – hoje	SIM(1 hora)
MSWEP	Pluviômetros + satélite + modelo de reanálise atmosférico	3 horas 1 dia	0,1 ⁰	1979 - 2016	NÃO (1 ano)
CHIRPS	Pluviômetros + TRMM	1 dia. 5 dias	0,05 ⁰	1981 - hoje	NÃO (2 dias; 3 semanas)

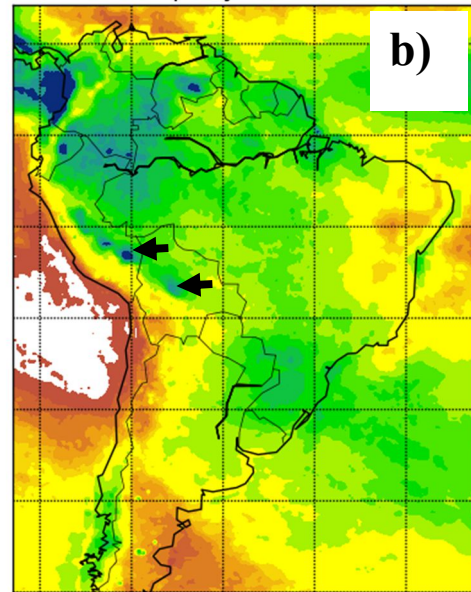
(*) Previsto até 2018

Como um exemplo das diferenças entre os produtos de precipitação por satélite em tempo real, a Figura 2.2 mostra fontes de precipitação acumulada para o ano 2015 sobre América do Sul. Os produtos de precipitação mostrados são IMERG, TRMM-3B42RT, MERGE e uma base de precipitação obtida de postos automáticos em tempo real do projeto NOAA CPC (Chen *et al.*, 2008). As escalas espaciais e temporais são diferentes, para o CPC (0,50°; diário), MERGE (0,20°; diário), TRMM (0,25°; 3 horas) e IMERG (0,10°; 30 minutos).

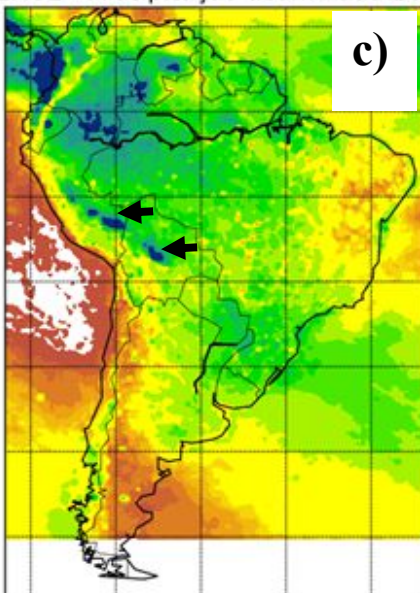
IMERG - Precipitação acumulada 2015



TRMM - Precipitação acumulada 2015



MERGE - Precipitação acumulada 2015



CPC - Precipitação acumulada 2015

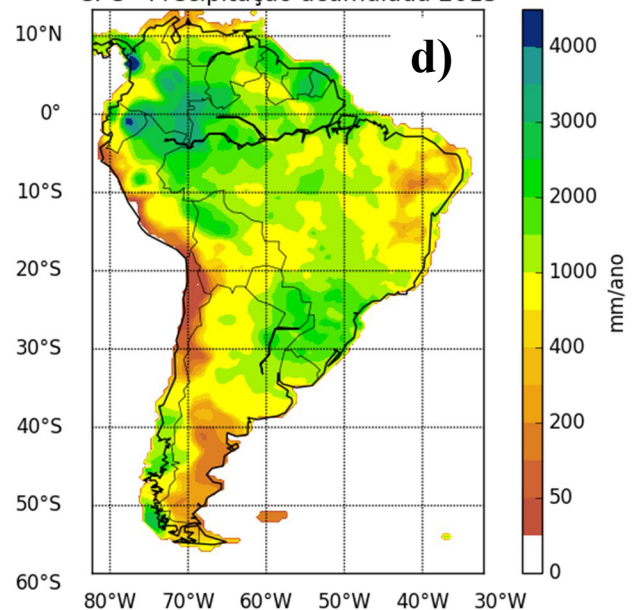


Figura 2.2 Precipitação acumulada ($\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$) para o ano 2015 sobre América do Sul para três produtos de precipitação por satélite: (a) IMERG, (b) TRMM, (c) MERGE (d) NOAA CPC.

A Figura mostra que o produto de precipitação NOAA CPC apresenta menos precipitação acumulada sobre a América do Sul comparado com as outras fontes de precipitação. Por exemplo, não detecta regiões chuvosas ao longo dos Andes no Peru, na Bolívia, na região noroeste sobre a Colômbia, e detecta menos chuva na região central de América do Sul. Esse fato pode ser devido à falta de postos pluviométricos automáticos disponíveis para o sistema de telecomunicação global que precisa o CPC. O produto MERGE é obtido da agregação de valores de precipitação por pluviômetros e estimado por satélite

TRMM. A Figura mostra que MERGE detecta maiores áreas de precipitação que superam o valor de 4000 mm, comparado ao TRMM e IMERG. Essas regiões são ao norte dos Andes, no norte e no noroeste de América do Sul, deduzindo que a observação de postos pluviométricos seria o que aportaria precipitação considerável ao produto final de MERGE. O IMERG do projeto GPM comparado ao TRMM apresenta similitudes, observando-se diferenças sobre a região de Equador e sobre a Bolívia.

2.3 Precipitação por satélite na hidrologia

A principal vantagem dos produtos de precipitação por satélite sobre a precipitação medida por pluviômetros é a cobertura espacial. Por exemplo, a Figura 2.3 mostra um exemplo numa bacia para um intervalo de tempo particular, onde apresenta pouco monitoramento de uma rede telemétrica. Essa mesma bacia apresenta um campo de precipitação obtida por satélite na qual mostra áreas com precipitação em partes da bacia onde não existem estações de rede telemétrica.

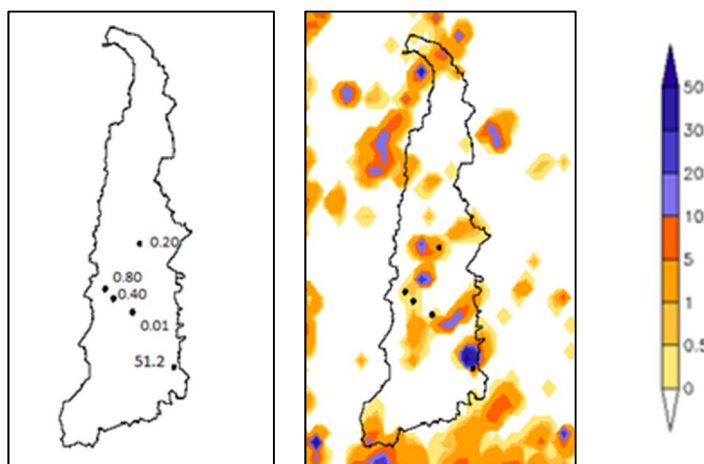


Figura 2.3 Exemplo de campos de precipitação observado por pluviômetros e estimado por satélite na bacia do rio Tocantins no Brasil. Lado esquerdo: valores de precipitação pontual medido por telemetria do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Lado direito: campo de precipitação por satélite do produto TRMM 3B42RT.

Outra vantagem da estimativa da precipitação por satélite é a informação de precipitação em bacias transfronteiriças para aplicações hidrológicas, onde os protocolos de compartilhamento de dados tem sido um problema. A pouca informação de dados meteorológicos em países vizinhos leva aos investigadores a usarem precipitação por satélite (Hossain e Lettenmaier, 2006; Hossain e Katiyar, 2006; Buarque, 2015; Paiva, 2009;

Fotopoulos *et al.*, 2010) em bacias maiores como o rio Ganges-Bramaputra nos países da Índia-China-Bangladesh, rio Madeira nos países de Brasil-Peru-Bolívia e o rio Amazonas nos países de Brasil-Peru-Colômbia-Ecuador- Bolívia (Vide Figura 2.4), respectivamente.

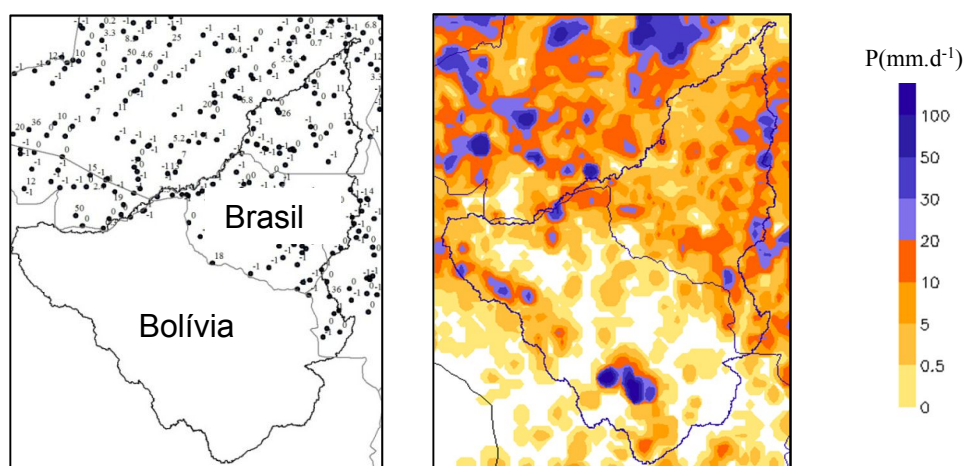


Figura 2.4 Exemplo de uma bacia transfronteiriça representado pelo rio Madeira. Lado esquerdo: valores pontuais de precipitação obtidos pela Agência Nacional de Águas (ANA). Lado direito: campo de precipitação por satélite do produto TRMM 3B42RT.

Diversos produtos de precipitação por satélite como dado de entrada aos modelos hidrológicos em diversas regiões do mundo tem sido motivo de diversas pesquisas. O detalhamento da precipitação por satélite em células regulares permite um conhecimento da cobertura espacial da precipitação em bacias hidrográficas. Essa vantagem permite considerar à precipitação por satélite como dado de entrada aos modelos hidrológicos, com estudos em grandes bacias e com o emprego modelos hidrológicos distribuídos. Porém modelos hidrológicos do tipo concentrado e empíricas como de redes neurais artificiais são também úteis. Em trabalhos de Collischonn *et al.* (2008), Pan *et al.* (2010), Su *et al.* (2008), Yilmaz *et al.* (2005), Behrangi *et al.* (2011), Araujo e Guetter (2007), Pereira *et al.* (2010), Yong *et al.* (2012), Li *et al.* (2014), Li *et al.* (2012), Li *et al.* (2013), Cohen *et al.* (2012), Stisen e Sandholt (2010), Xue *et al.* (2013), Duan e Bastiaanssen (2013), Kim *et al.* (2016), entre outros encontraram-se potencialidades de aplicação dos produtos de precipitação por satélite.

Outro grupo de trabalhos aplicando a precipitação por satélite em modelos hidrológicos, com resultados variados são os realizados na América do Sul. O produto TRMM-3B42 foi aplicado em várias regiões como na bacia do rio Negro ao norte de Brasil (Getirana *et al.*, 2011) achando séries de vazões calculadas com fortes subestimativas. A mesma tendência à subestimativa deste produto foi detectada por Quiroz (2009); Quiroz *et al.*

(2011) e Paiva *et al.* (2013) que estudaram bacias hidrográficas alto-andinas como a bacia do rio Huallaga, caracterizada pela alta variabilidade topográfica nos Andes de Peru. Por outro lado, o produto CMORPH foi também testado achando melhor desempenho estatístico comparado ao TRMM-3B42 usando modelos hidrológicos distribuídos sobre as mesmas regiões alto-andinas nos Andes (Dinku *et al.*, 2010; Quiroz, 2009 e Quiroz *et al.*, 2011)

A avaliação de simulações hidrológicas com ênfase em estudar os eventos extremos também foi alvo de pesquisas como as apresentados por Fotopoulus *et al.*(2011), Fotopoulus *et al.* (2010), Harris *et al.* (2007), Akhtar *et al.* (2009), Grimes e Diop (2003), Li *et al.* (2009), Nikolopoulos *et al.*, (2012), Nikolopoulos *et al.*, (2013) e Yilmaz *et al.*(2005). Os produtos do satélite TMPA-TRMM, CMORPH e PERSIANN mostraram limitadas capacidades para conseguir simular adequadamente os picos de vazão em latitudes médias como em bacias do sul da Europa (Fotopoulus *et al.*, 2010; Fotopoulus *et al.*, 2011; Nikolopoulos *et al.*, 2012), na bacia do rio Tagliamento com relevo complexo topográfico no nordeste da Itália (Nikolopoulos *et al.*, 2013) e na bacia do rio Cumberland nos Estados Unidos (Harris *et al.*, 2007). Em baixas latitudes, resultados similares foram mostrados em Bangladesh (Akhtar *et al.*, 2009) e em regiões remotas sobre o rio Senegal no oeste da África (Grimes e Diop, 2003), na bacia do rio Nzoia na Kenya (Li *et al.*, 2009) e no sul dos Estados Unidos (Yilmaz *et al.*, 2005).

Sendo que a precipitação por satélite apresenta-se como um campo do tipo matricial (*raster*), pode ser aproveitado por modelos de erro de precipitação estocástico multidimensional para avaliar as incertezas na modelagem hidrológica (Hossain e Anagnostou, 2006). Um trabalho interessante é o apresentado por Falck (2015) que examinou a propagação das incertezas a través das estimativas de precipitação por conjunto na transformação de chuva-vazão na bacia do rio Tocantins-Araguaia no Brasil. O modelo de erro conseguiu representar campos de precipitação realísticos para serem usados em um modelo hidrológico distribuído demonstrando que essa metodologia pode se aplicada operacionalmente para monitoramento de cheias. Trabalhos semelhantes são achados em Hong *et al.* (2006) e Nikolopoulos *et al.* (2010).

As novas missões espaciais com mais sensores de micro-onda poderiam ainda melhorar a estimativa, por exemplo, com o novo projeto *GPM*. Esses sensores de *GPM* podem detectar quantidades pequenas de precipitação e neve melhor que os sensores do satélite TRMM (Hou *et al.*, 2014; Guo *et al.*, 2016). Trabalhos feitos sobre a China e sobre a

India (Guo *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2017; Prakash *et al.*, 2016) demonstraram que os produtos do GPM corrigidos com precipitação observada de pluviômetros mostraram melhoras significativas comparadas com os produtos que não tiveram correções quando o desempenho foi avaliado sobre a modelagem hidrológica.

Em geral, quando os produtos de precipitação por satélite são utilizados em modelos hidrológicos em várias bacias do mundo, consegue-se, quase sempre, representar a variabilidade temporal das vazões observadas, apresentando casos de subestimativas ou sobreestimativas com referência aos valores das vazões observadas. Essas diferenças podem ser maiores nas vazões máximas (Fotopoulos *et al.*, 2010; Fotopoulos *et al.*, 2011; Harris *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2017). Essas diferenças podem ser causadas pelos erros sistemáticos e aleatórios da precipitação e por erros do modelo hidrológico utilizado. A consideração da calibração dos parâmetros do modelo hidrológico, para cada fonte de precipitação em análise, melhora, em alguns casos, a eficiência do modelo. Em outros casos, o conjunto de parâmetros calibrados pode ser irreal, geralmente valores calculados abaixo dos limites mínimos estabelecidos (Quiroz, 2009; Quiroz *et al.*, 2011).

Outra observação achada nos trabalhos mencionados no parágrafo anterior foi que um ajuste de correção de viés sobre os valores da precipitação pode ser feito. Com base em uma proporcionalidade da precipitação cumulativa entre o valor de referência (precipitação observada em Terra) e a de satélite, é possível melhorar significativamente os resultados dos testes estatísticos avaliados nos picos das vazões máximas (Harris *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2009; Nikolopoulos *et al.*, 2013, Nerini *et al.*, 2015). No entanto, as correções de viés nesses trabalhos foram feitas sobre eventos isolados e sobre bacias ao redor de 5.000 km² com apenas um posto de controle na saída da bacia.

Nesse sentido, métodos de interpolação combinando ambas as fontes, pluviômetros (radar) e satélites vêm sendo aplicados. Os métodos geoestatísticos tomam vantagem em alguns casos como em Velasco *et al.* (2009), Clarke e Buarque (2013) e Jongjin *et al.* (2016). Outros casos, métodos geoestatísticos depende de uma maior densidade de postos pluviométricos para gerar variogramas como no trabalho de Nerini *et al.* (2015). Nesse último, avaliaram-se vários métodos de interpolação incluindo métodos de Krigagem no passo de tempo diário sobre a região amazônica do Peru. Os resultados mostraram baixo desempenho para os métodos geoestatísticos. Manz *et al.* (2016) estimaram precipitação mensal combinando precipitação desde pluviômetros e precipitação obtida do radar de

precipitação de satélite TRMM sobre os Andes de Peru. Seus resultados mostraram que técnicas simples de interpolação tinham desempenho similar comparado aos métodos geoestatísticos.

Um dos primeiros produtos combinados é do Projeto Climatológico de Precipitação Global (GPCP-1DD) (Huffman *et al.*, 2001) disponível em escala diária com tamanho de célula de grade de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$. Esse produto de precipitação combinado é obtido usando a técnica de *Threshold-Matched Precipitation Index* (TMPI) na qual se estima precipitação por meio de imagens de satélite no canal de infravermelho e uma correção local, mês a mês, a partir da frequência de precipitação estimada dos sensores de microonda do projeto GPCP por satélite e precipitação observada. Outro produto combinado é o *CPC Merged Analysis of Precipitation* (CMAP), que combina dados de pluviômetros com as estimativas de precipitação de imagens de infravermelho e micro-ondas passivas, obtendo campos de precipitação com resolução espacial de $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ (Xie e Arkin, 1997). Esse produto, atualmente, permite estimar a precipitação, mensal e chuva acumulada para cinco dias.

De Vera e Terra (2012) aplicaram uma remoção de viés ao campo de precipitação estimada por satélite usando a metodologia mapeamento de quantis as correções foram feitas em centros das células de grade próximos aos locais dos pluviômetros. O teste foi feito na bacia do rio Negro no Uruguai com precipitação diária. Os resultados mostraram que o método proposto detectou uma quantidade maior de eventos chuvosos.

Outro grupo de pesquisas para obter campos de precipitação combinado em escala regional ou continental encontram-se nos trabalhos de Vila *et al.* (2009) e Rozante *et al.* (2010). Nesses trabalhos, desenvolveram-se técnicas de combinação de dados para a América do Sul, que foram denominadas CoSch e MERGE, respectivamente. As estimativas de chuva por satélite utilizadas em ambas as técnicas são o resultado da aplicação do algoritmo TRMM-3B42RT (Huffman *et al.*, 2007) com aproximadamente 15.000 estações de várias agências meteorológicas do América do Sul. No MERGE, é feita uma interpolação entre os postos pluviométricos disponíveis dentro do entorno de uma distância de 70 km, aproximadamente; fora dessa distância, o campo de precipitação de satélite é preservado. Por outro lado, a técnica do CoSch aplica uma combinação linear ponderada de duas diferentes distorções da estimativa da chuva por satélite na forma aditiva e proporcional.

As técnicas de combinação com resultados em termos da vazão calculada foram realizadas por Chiang *et al.* (2007), que combinaram dados de telemetria e de satélite como

séries temporais de entrada independentes a uma rede neural artificial (RNA) para calcular as vazões dos eventos de cheia em Taiwan. Gebregiorgis e Hossain (2013) combinaram três produtos de precipitação por satélite, calculando pesos a partir da correção da umidade no solo e escoamento superficial do modelo hidrológico. Jiang *et al.* (2012) usou um método de ponderação em base a um modelo bayesiano sobre a precipitação para melhorar a predição hidrológica. Quiroz e Collischonn (2015) validaram um método de interpolação ponderada entre campos de precipitação por pluviômetros e satélite semelhante ao método de inverso da distância para simulação hidrológica diária sobre a bacia do rio Tocantins no Brasil. Correções na precipitação por satélite com base em técnicas de assimilação de dados com outras observações de satélite, como a umidade no solo e temperatura superficial, foram feitas para garantir simulações aproximadas com as observadas (Wanders *et al.*, 2015). Os resultados mostraram, em todos os casos anteriores, vantagens para os produtos combinados de precipitação, mostrando um melhor ajuste entre as vazões máximas.

Diferente dos produtos de estimativa por satélite, Monteiro *et al.* (2016) desenvolveu técnicas de interpolação sobre o Brasil usando dados de reanálise com precipitação observada de pluviômetros diretamente de agências meteorológicas como ANA e INMET. A fonte de observação para a obtenção dos dados de modelo de reanálise é a partir de estações meteorológicas, balões meteorológicos e satélites. Os autores realizaram-se simulações diárias para a bacia do rio Tocantins e seus resultados mostraram a validade desses produtos combinados em bacias de grande escala com escassez de postos pluviométricos.

Os resultados em todos esses trabalhos mencionados anteriormente mostraram que houve uma melhora nos testes estatísticos representados pelo menor viés e pela melhor eficiência nas vazões calculadas, quando técnicas de combinação foram aplicadas.

No entanto, essa melhora pode diminuir no caso em que diminui a densidade dos postos pluviométricos considerados (Goudenhoofd e Delobbe, 2009). Quando a análise entre campos de chuva é feita, Chappell *et al.* (2013) acharam que a incorporação de precipitação por satélite como variável secundária não provou melhoras significativas para regiões da Austrália.

Em que pese a essa controvérsia, os mais novos estudos apontam que é de interesse desenvolver técnicas de combinação entre dados observados por pluviômetros e estimados por satélite para diminuir os erros nas vazões simuladas. Essa diminuição poderia ter uma vantagem positiva sobre os sistemas de previsão de curto prazo.

2.4 Precipitação por satélite em sistemas de previsão de curto prazo

Na área de previsão hidrológica, estudos recentes vêm desenvolvendo sistemas de monitoramento de cheias globais e regionais com o uso direto de precipitação estimada por satélite em tempo real. Os primeiros trabalhos reportados foram de Hong *et al.* (2007) e Hong *et al.* (2010) que usaram o método de SCS-CN para calcular vazão usando estimativas de precipitação do satélite TRMM. Yilmaz *et al.* (2010) avaliou essas técnicas sobre os Estados Unidos, e os resultados indicaram que a metodologia proposta era capaz de detectar 38% dos eventos. Posteriormente, a partir desses resultados Wu *et al.* (2012) e Wu *et al.* (2014) complementaram a metodologia de Hong *et al.* (2007) considerando o modelo hidrológico de *Variable Infiltration Capacity-VIC* (Liang *et al.*, 1994) e o modelo de traçado do rio dominante ou *Dominant River Tracing Routing* (DRTR) acoplado com um modelo de previsão de vazões de cheias. Essa nova metodologia é chamada de Sistema de Monitoramento de Cheias Global a Tempo Real ou *Global Flood Monitoring System* (GFMS). O sistema não usa precipitação prevista, emprega apenas precipitação observada. O sistema disponibiliza variáveis de saída como vazão no rio, armazenamento de água superficial e estimativas de inundação na escala de 1 km de resolução espacial, além de mapas de precipitação instantânea e total de 1, 3, e 7 dias.

Outros sistemas de previsão hidrológica operacional, porém experimental, é o sistema de alerta de cheias (GFAS) promovido pelo governo de Japão por meio do Ministério de Solo, Infraestrutura e Transporte e da Agência de Exploração Aeroespacial de Japão (JAXA). Esse sistema usa estimativas de precipitação por satélite TRMM para previsão de sistema de alerta de cheias fornecendo por meio de mapas de precipitação global, informação de chuva por estimativas de probabilidade de precipitação. Outro sistema experimental de previsão de vazões é aplicado sobre bacias da África, chamado de *Multi-modal Hydrologic Forecasts*, que foi aplicado inicialmente no Senegal e posteriormente expandiram-se para outras três bacias nos países de Zâmbia, Angola e Etiópia. Esse sistema proporciona previsão de vazão com 7 a 12 dias de antecedência usando os produtos de precipitação, evapotranspiração e umidade no solo estimado por satélite e precipitação prevista desde um modelo numérico de previsão de tempo (Serrat-Capdevilla *et al.*, 2013).

A Universidade de Colorado por meio do Observatório de inundações de Dartmouth (*Dartmouth Flood Observatory*) usa imagens de satélite para mapear áreas de inundação em tempo real. O sistema calcula vazões de cheias e áreas de inundação. O foco do Observatório

de inundações está em regiões com alta variabilidade da superfície da água com pouco monitoramento de estações em Terra, onde as inundações afetam diretamente a população (Kugler e de Groeve, 2007).

A desvantagem dos sistemas operacionais de previsão global é que ainda não consideram aspectos reais da região como as alterações nos cursos do rio, como barragens ou usinas hidrelétricas, como no caso GFSM (Wu *et al.*, 2014;). Não considerar essas alterações pode provocar diferenças nas vazões à jusante dessas estruturas. Esses sistemas, ainda em etapa experimental, incorporam precipitação obtida desde satélite mostrando ainda que estes dados apresentam incertezas refletidas em alarmes falsos ou eventos não previstos das vazões máximas. Outra desvantagem desses modelos de previsão global é que não incorporam metodologias de combinação de precipitação por satélite com estações telemétricas em tempo real.

È de importância mencionar o estado de arte dos sistemas de alerta de cheia no Brasil, mesmo que as forçantes nos modelos de previsão não sejam dados estimados de satélite. No âmbito brasileiro, o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) monitora 957 municípios que tem histórico de registros de desastres naturais decorrentes de movimentos de massa e risco hidrológico. A agência integra dados de diversas fontes, como radares, rede telemétrica, pluviométrica, geológicas, topográficas, demográficas e socioeconômicas. Todos esses dados são montados numa plataforma de visualização de áreas de risco. Outra agência de interesse no tema é o Serviço Geológico Brasileiro (CPRM) que desenvolveu o Sistema de Alerta de Eventos Críticos (SACE). Coleta dados hidrometeorológicos de diversas fontes e utiliza um modelo de previsão para calcular as previsões de vazões em 10 bacias de grande escala em todo o território brasileiro.

Outro grupo de sistemas de previsão em tempo real vem operando em bacias do Brasil. Os resultados das previsões de vazões são de forma contínua no passo de tempo horário para análise de vazões efluentes em usinas hidrelétricas. O modelo hidrológico MGB-IPH serve para cálculo das vazões, acoplado com um sistema de assimilação de dados utilizando, em alguns casos, modelos numéricos de previsão de tempo numérica e modelos de previsão de precipitação por conjunto (Fan *et al.*, 2016). A previsão das vazões efluentes de algumas usinas hidrelétricas tem sido o objetivo de alguns projetos como a usina Três Marias na bacia do Alto São Francisco operado pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), as usinas Campos Novos e Barra Grande no Alto Uruguai operado pelo grupo de

pesquisa de hidrologia de grande escala (HGE) (Fan *et al.*, 2016) e a usina Estreito na bacia do rio Tocantins (Fan *et al.*, 2014; Fan *et al.*, 2016) onde se desenvolveu um modelo de previsão de vazões efluentes com o fim de assistir à operação do reservatório e para o controle de inundação. Nesse sistema, trabalhou-se com dados de precipitação combinado com estimativas por satélite em tempo real com o fim de preencher a escassez da rede telemétrica (Quiroz e Collischonn *et al.*, 2015), esse sistema opera através de uma interface gráfica em plataforma GIS (Fan *et al.*, 2014).

2.5 Métodos de assimilação de dados nos sistemas de previsão de curto prazo

As técnicas de assimilação de dados são procedimentos práticos que combinam observações com modelos determinísticos levando em consideração a incerteza do modelo e das observações com o fim de quantificar e reduzir as incertezas na predição e previsão (Ridler *et al.*, 2014; Reichle, 2008; Liu e Gupta, 2007; Clark *et al.*, 2008). Inicialmente, assimilação de dados foi usada amplamente na área de geociências para a previsão meteorológica, caracterização de condições atmosféricas e oceânicas, no entanto, nos últimos anos tem sido adaptada para aplicações hidrológicas (Liu e Gupta, 2007).

Para os sistemas de previsão operacional, aplicações de assimilação de dados sobre modelo hidrológicos e hidráulicos apresentam três abordagens segundo Liu *et al.* (2012). A primeira abordagem trata-se de assimilação de variáveis de estado, como os níveis de água, vazão, precipitação, neve, profundidade de neve, evapotranspiração atual e potencial, umidade no solo e alturas piezométricas encontradas tanto em modelos hidrológicos concentrados como distribuídos. A segunda abordagem trata-se de estimar os parâmetros ou problemas de otimização, geralmente, sendo considerado de forma estática e invariável no tempo (Sorooshian *et al.*, 1993). A terceira abordagem trata-se de atualização do erro e refere-se a uso de técnicas de assimilação para melhorar predições da saída de um modelo. Nessa última abordagem, os modelos do tipo ARMA (*Auto Regressive Moving Average*) são os mais utilizados e são aplicáveis a séries temporais estacionárias, para modelar a evolução dos erros de um modelo ao longo do tempo (Wang *et al.*, 2015). Esses três tipos de abordagens não são excludentes e podem ser usadas em combinação para sistemas de previsão hidrológica do tipo operacional (Vrugt *et al.*, 2005 e Liu *et al.*, 2012). Porém, o estudo das técnicas avançadas

incluídas na primeira e segunda abordagem, que assimilam o conjunto de variáveis de estado, parâmetros e dados de entrada/saída, é de interesse nesse trabalho.

A forma mais direta de assimilar dados em um modelo hidrológico é a forma de correção manual (Liu *et al.*, 2012), porém é requerido um elevado nível de experiência dos operadores do sistema de previsão e mesmo assim pode ser pouco eficaz (Seo *et al.*, 2009).

A alternativa à correção manual é a assimilação automática, baseada em alguma técnica computacional. Existem técnicas de assimilação de dados do tipo heurístico, que tem validade limitada para um modelo hidrológico particular. Esse é o caso da metodologia apresentada por Paz *et al.* (2007) e Collischonn *et al.* (2005) acoplado a o modelo hidrológico MGB-IPH. Essa técnica está baseada em uma comparação contínua entre as vazões observadas e simuladas para cada intervalo de tempo corrigindo os volumes de água nos reservatórios hidrológicos e a vazão do rio (Collischonn *et al.* 2005; Andreolli *et al.*, 2006; Collischonn *et al.*, 2007; Paz *et al.*, 2007; Meller *et al.*, 2013; Fan *et al.*, 2014). Esse método permite assimilar dados de várias estações de controle sobre uma mesma bacia, porém a desvantagem é que só permite assimilar descargas dos rios.

Existe um grupo de técnicas avançadas de assimilação de dados baseados na teoria de filtragem por meio de teoria de Bayes. As metodologias mais comuns são o filtro Kalman (Evensen, 2003; Evensen, 2004) e filtro de partículas (Arulampalam *et al.*, 2002). O filtro Kalman por conjunto (Evensen, 2003 e Evensen, 2004), é uma aproximação de Monte Carlo ao filtro Kalman tradicional, onde a aproximação da matriz de covariância de erro de estado de previsão (*a priori*) é feita propagando um conjunto de estados de modelo usando os estados atualizados (membros do conjunto) do período anterior. O filtro Kalman por conjunto (EnKF) é computacionalmente eficiente e fácil de implementar, é robusta em resolver diversas aplicações na hidrologia. Uma das variantes de filtro Kalman é o filtro da raiz quadrada por conjunto (EnSRF) proposto por Whitaker e Hamill (2002) onde não se requiere a perturbação das observações, só é necessário o valor observado. Apresenta-se como mais eficiente e mais eficaz que EnKF para um tamanho dado de membros.

Foram reportados poucos trabalhos usando a técnica EnSRF em previsão de vazões. Chen *et al.* (2013) avaliaram o potencial dessa técnica para previsão de cheias na China. Os resultados mostraram ter menor erro de vazões na etapa de assimilação comparado com a simulação, melhorando as predições de vazão máxima na maioria dos 21 eventos de cheias avaliados. No entanto, Mendoza (2010) reportou maiores erros de vazão assimilada quando

aplicou dita técnica sobre bacias de pequeno porte no sul de Chile ao ser comparado com EnKF.

A técnica de filtro de partículas (PF) é um método baseado em simulações por Monte Carlo. A idéia central é representar a função de densidade de probabilidade *a posteriori* de um conjunto de amostras colhidas aleatoriamente, chamadas partículas, com pesos associados (Arulampalam *et al.*, 2002). Essa técnica tem a vantagem de ser aplicável a modelos que apresenta funções altamente não lineares com distribuições não Gaussianas. Realiza a atualização sobre os pesos de partículas e não do conjunto de variáveis de estado, o que o torna adequado para assimilar dados em modelos espacialmente distribuídos. Uma partícula representa um conjunto de variáveis de estado de forma distribuída e a distribuição espacial é mantida após a assimilação.

Outro método popular, usado nos últimos anos é o método variacional (Coustau *et al.*, 2013), classificado como uma técnica derivada da evolução da distribuição de variáveis de estado sobre um intervalo de tempo. Essa técnica envolve a minimização de uma função de custo. Os métodos variacionais são computacionalmente menos caros do que o filtro de Kalman estendido (Liu e Gupta, 2007). No entanto, trabalham sobre uma janela de tempo contendo uma sequência de observações sendo mais aptos para ajuste de curvas do que para assimilação de dados em tempo real (Salomon e Feyen, 2009).

A aplicação dessas técnicas em predição e previsão de cheias foi feitas por (Ercolani e Castelli, 2017; Chen *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2013; Coustau *et al.*, 2013; Dechant e Moradkani, 2012; Dumedah e Coulibaly, 2013; Harader *et al.*, 2012; Noh *et al.*, 2012; Noh *et al.*, 2013; Mendoza, 2010; Seo *et al.*, 2009; Vrugt *et al.*, 2006; Xu *et al.*, 2017; Salomon e Feyen, 2009; Paiva *et al.*, 2013; Matgen *et al.*, 2010; Clark *et al.*, 2008; Tachikawa *et al.*, 2011; Noh *et al.*, 2011; Noh *et al.*, 2013; Weerts e El Serafi, 2006; entre outros). Os resultados mostraram que as técnicas de assimilação melhoraram o desempenho da eficiência em diversos termos estatísticos sobre o procedimento de não considerar assimilação. Ressalta-se também a importância e o cuidado de trabalhar com grande quantidade de variáveis de estado em bacias de grande porte onde é incluída maior quantidade de variáveis de estado aumentando o processo computacional e acurácia nos resultados. Já para bacias de pequeno porte, as técnicas de assimilação de dados, em geral, mostraram bom desempenho estatístico já nas primeiras horas de antecedência nos modelos de previsão.

Dentre esses trabalhos antes mencionados se destacam os trabalhos de Salomon e Feyen (2009) e Paiva *et al.* (2013) que abordaram técnicas de assimilação sobre bacias de grande porte com modelos hidrológicos distribuídos. O primeiro trabalho mostrou que existe um impacto positivo quando as variáveis de estado e parâmetros do modelo foram assimiladas de forma simultânea. Acharam também, que a inclusão da perturbação da precipitação influencia nos resultados da estimação dos parâmetros do modelo e aumenta a exatidão nas vazões máximas. O segundo trabalho desenvolveu um protótipo de sistema de previsão de níveis e vazões para a bacia Amazônica, tendo bom desempenho nos grandes rios mesmo para elevados horizontes de previsão.

Existe um número de trabalhos que focam sua atenção em avaliar a eficiência e exatidão das técnicas de assimilação de dados mais populares como o filtro Kalman por conjunto (EnKF) e filtro de partículas (PF) e os resultados são variados. Os trabalhos de Hirpa (2013), DeChant e Moradkhani *et al.* (2012) e Dumedah e Coulibaly (2013) sugerem que o método de PF é superior. Mas também existem outro número de trabalhos que mostraram que o EnKF é superior ou ao menos existem diferenças mínimas com o método PF em termos estatísticos como os encontrados nos trabalhos de Weerts e El serafi (2006) e Nagarajam *et al.* (2011).

Atualmente, existem bibliotecas computacionais com ferramentas de fonte livre para o desenvolvimento e aplicação de técnicas de simulação hidrológica, assimilação de dados e algoritmos de calibração para modelos hidrológicos como o descrito por Ridler *et al.* (2014) e Noh *et al.* (2013). Talvez a mais conhecida seja a interface do modelo de fonte aberta OpenMI (*Open Model Interface*) e que normalmente trabalha conjuntamente com OpenDA (*Open Data assimilation*). A interface aberta OpenMI permite que os modelos troquem dados durante o tempo de execução, transformando assim um modelo numérico complexo em um componente pronto para o uso do *plug and play* (Ridler *et al.*, 2014). As bibliotecas computacionais disponíveis para OpenDA vem incluindo algoritmos de assimilação de dados com métodos de inserção direta simples para técnicas sequenciais avançadas de assimilação de dados (Ridler *et al.*, 2014).

As técnicas avançadas de assimilação de dados estão mostrando um ótimo desempenho para aplicações hidráulicas e hidrológicas comprovado por um número considerável de pesquisas mencionada. Técnicas de assimilação de dados como o filtro Kalman por conjunto foi mostrado pelas pesquisas como uma técnica robusta para previsão de

cheias em bacias de grande porte com grande dimensionalidade demonstrada no trabalho de Paiva *et al.* (2013) e Salomon e Feyen (2009). Aplicações de previsão hidrológica do tipo operacional vêm acrescentando, pesquisas como em Seo *et al.* (2009), Hirpa *et al.* (2013) e Vrugt *et al.* (2006) e pelos modelos de interfaces de fonte aberta disponíveis (Ridler *et al.*, 2014) que permitem aplicações diretas.

Sendo o filtro Kalman por conjunto a técnica mais desenvolvida na área de previsão, a técnica de Filtro por partículas com adequações matemáticas pode chegar a se desenvolver como uma técnica robusta. Essas adequações matemáticas já estão sendo realizadas em trabalhos como em Moradkhani *et al.* (2005b); Salomon e Feyen (2009), Xu *et al.*, 2017 como os principais.

Por último as técnicas avançadas são aplicadas em bacias de todo o mundo, porém no âmbito de América do Sul existem poucos trabalhos, do que podemos ressaltar os trabalhos de Mendoza (2010) e Paiva *et al.* (2013), ambos usando técnicas de filtro Kalman por conjunto.

CAPITULO 3

METODOLOGIA

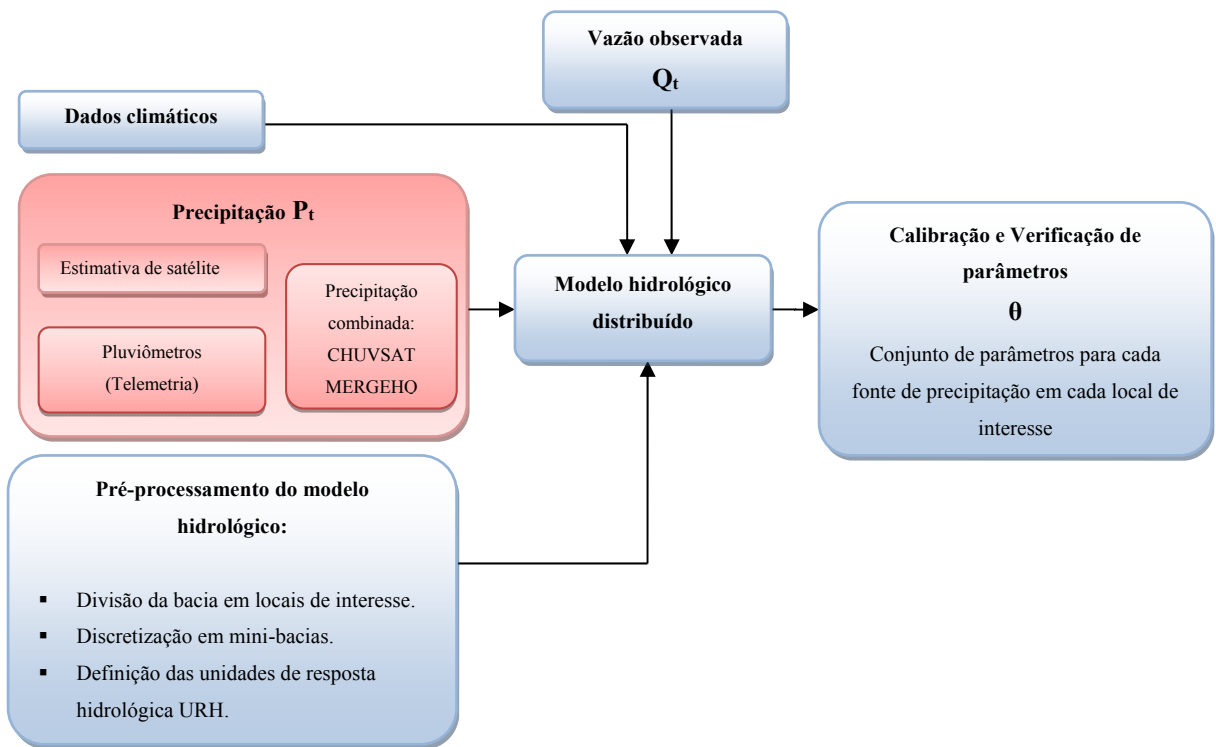
3.1 Introdução

A metodologia de trabalho está baseada na análise de diversas fontes de precipitação e várias técnicas de assimilação de dados para previsão hidrológica de vazões por meio de um modelo hidrológico distribuído sobre uma bacia em particular. Um diagrama geral da metodologia é mostrado na Figura 3.1.

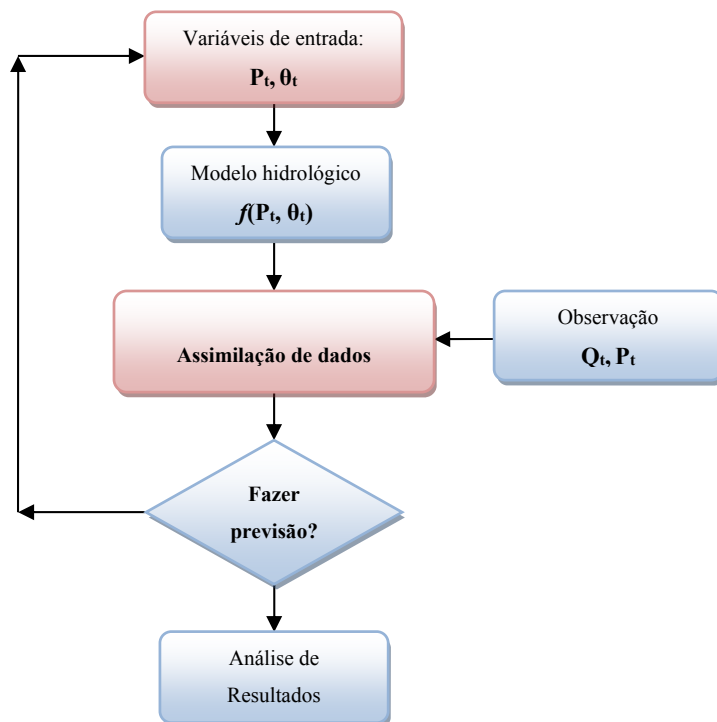
O modelo hidrológico distribuído de grandes bacias MGB-IPH foi aplicado à bacia do rio Tocantins. Processamento de informação como dados climáticos, precipitação, vazão observada, caracterização geométrica da bacia e hidrológica segundo o uso e o tipo de solo foram necessários para o processo de calibração e verificação dos parâmetros do modelo hidrológico (Vide Figura 3.1a).

Diversas fontes de precipitação observada tais como obtidas por rede telemétrica, precipitação estimada por satélite e precipitação combinada de pluviômetro e satélite (CHUVSAT e MERGEHQ) foram forçadas ao modelo hidrológico MGB-IPH e um conjunto de parâmetros do modelo foram calculados independentemente para cada fonte de precipitação.

Durante a etapa de previsão de vazões foi definido um período, diferente do período de calibração e verificação do modelo, com o fim de testar o desempenho das fontes de precipitação (como precipitação observada) e as técnicas de assimilação. Considerou-se como precipitação prevista a série de precipitação observada como precipitação “perfeita” e outra série conformada por valores de zero após o início da previsão. Este trabalho incluiu, também, análise de transferência de informação de dados de locais monitorados para locais não monitorados.



a) Esquema de calibração e verificação de parâmetros do modelo hidrológico.



b) Esquema da previsão hidrológica de vazões.

Figura 3.1 Diagramas de fluxo que descreve a metodologia proposta.

3.2 Modelo hidrológico distribuído

O modelo hidrológico de grandes bacias MGB-IPH é um modelo hidrológico distribuído criado inicialmente para áreas maiores que 10.000 km² foi desenvolvido por Collischonn (2001) no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Esse modelo calcula os processos de geração de escoamento e propagação pela rede de drenagem na bacia a partir de variáveis meteorológicas e de informação derivada de sistemas de informação geográfica baseado na topografia, na cobertura da vegetação e tipos de solos. A concepção do modelo hidrológico MGB-IPH tem como base outros modelos como o LARSIM (*large area runoff simulation model*) e VIC (*variable infiltration capacity*) com algumas mudanças nos módulos de evapotranspiração, percolação e na propagação dos fluxos.

Inicialmente, o modelo MGB-IPH dividia a bacia em elementos regulares de 10 km x 10 km (Collischonn *et al.* 2005; Collischonn *et al.*, 2007). Na sua versão mais recente, o modelo utiliza uma discretização em unidades irregulares, denominadas mini-bacias, definidas a partir de dados do relevo descrito nos manuais feitos por Fan *et al.* (2009), Fan *et al.* (2010). Cada mini-bacia da área de estudo para aplicação do modelo MGB-IPH necessita de diversas informações a respeito das suas características geométricas, como por exemplo: área da superfície, topologia hídrica, rede de drenagem, comprimentos da rede de drenagem, declividades de trechos de rios internos, áreas acumuladas de drenagem, posição de seus centroides. A caracterização hidrológica da bacia é obtida a partir de mapas de tipos e usos do solo e a superposição dessas duas informações definem as unidades de resposta hidrológica (URHs) para cada mini-bacia. Todas essas informações anteriormente descritas são necessárias para a aplicação do modelo e são automaticamente obtidas através de uma rotina computacional desenvolvida especialmente para o modelo MGB-IPH, procedimento feito por Buarque *et al.* (2008).

O modelo hidrológico simula o balanço hídrico baseado em relações físicas, divididas em dois processos distintos, verticais e horizontais. Dentro dos processos verticais incluem-se a interceptação, evapotranspiração, balanço de água no solo, geração de escoamento superficial, sub-superficial e subterrânea (ou de base), todos eles simulados em nível de blocos. Os volumes gerados nos blocos são somados em cada mini-bacia. Dentre os processos horizontais, incluem-se a propagação nas mini-bacias e a propagação na rede de drenagem. Na mini-bacia, a propagação realiza-se a partir de três reservatórios lineares tais como

superficial, sub-superficial e subterrâneo. Na rede de drenagem, a propagação da soma dos três reservatórios realiza-se pela rede de drenagem usando o método Muskingum Cunge linear.

O modelo possui parâmetros, alguns são de características físicas derivadas da topografia. Outros parâmetros denominados fixos que não variam durante todo o processo de simulação e que estão relacionados à vegetação são utilizados para o cálculo da evapotranspiração e da interceptação. Outro grupo de parâmetros que precisam ser calibrados, são aqueles que por meio de ajuste iterativo consegue-se uma aproximação aos fluxos observados, esses parâmetros são relacionados às propriedades do solo que controlam o balanço hídrico na mini-bacia. Os cálculos dos parâmetros calibrados podem ser realizados alterando em cada simulação e observando o melhor ajuste com os hidrogramas observados e pode ser efetuado de forma manual por tentativa e erro ou automática usando um algoritmo de otimização. Atualmente, o algoritmo global multiobjetivo MOCOM-UA está acoplado ao modelo hidrológico MGB-IPH.

Esse modelo hidrológico teve diversas aplicações em várias bacias hidrográficas em América do Sul. Aplicações em estudos de previsão de vazão foram abordadas por Collischonn *et al.* (2005), Collischonn *et al.* (2007), Andreolli *et al.*, (2006), Bravo *et al.* (2009), Fan *et al.*, (2014), Fan *et al.*, (2016), Meller *et al.*, (2012), Paiva *et al.*, (2013), Paz *et al.* (2007), Buarque (2015), entre outros. Aplicações para avaliação de precipitação por satélite são apresentadas por Quiroz (2009), Quiroz *et al.* (2011), Quiroz e Collischonn (2015), Getirana *et al.* (2011), Collischonn *et al.* (2007).

3.3 Métodos de combinação de precipitação

3.3.1 Método CHUVSAT

A metodologia CHUVSAT, proposta por Quiroz e Collischonn (2015) é baseada na interpolação ponderada pela distância. Considera-se que a informação de chuva dos pluviômetros está disponível em pontos distribuídos de forma aleatória e que a informação de chuva de satélite está disponível sobre os pontos centrais das células em uma grade regular. A partir desses dois tipos de informação, a precipitação em um local qualquer ponto (k) pode ser calculada por uma média ponderada dos valores dos postos pluviométricos (P) e das estimativas de precipitação de satélite (S) pela Eq. 3.1.

$$\hat{P}_k^t = \frac{\sum_{i=1}^{np} w_p P_i^t}{\sum_{i=1}^{np} w_p + \sum_{j=1}^{ns} w_s} + \frac{\sum_{j=1}^{ns} w_s S_j^t}{\sum_{i=1}^{np} w_p + \sum_{j=1}^{ns} w_s} \quad \text{Eq. 3.1}$$

onde \hat{P}_k^t é o valor da precipitação interpolada no intervalo de tempo t na posição k ; np é o número de postos pluviométricos utilizados na interpolação; ns é o número de pontos centrais das células na grade da estimativa de chuva por satélite, utilizados na interpolação; P_i^t é o valor da precipitação observada no pluviômetro i , no intervalo de tempo t ; S_j^t é o valor da precipitação de satélite na posição j no tempo t ; w_p é o ponderador aplicado aos dados dos pluviômetros e w_s é o ponderador aplicado aos dados do satélite.

Os ponderadores w_p e w_s tem duas componentes, conforme apresentado nas Eq. 3.2 e Eq. 3.3. O primeiro componente (α ou β) é um fator associado ao tipo de informação (pluviômetro ou satélite, respectivamente). O segundo componente do ponderador é um fator associado à distância, conforme as seguintes equações:

$$w_p = \alpha \frac{1}{d^\gamma} \quad \text{Eq. 3.2}$$

$$w_s = \beta \frac{1}{d^\theta} \quad \text{Eq. 3.3}$$

onde w_p é o ponderador aplicado aos dados dos pluviômetros; w_s é o ponderador aplicado aos dados do satélite; α é um peso associado com os dados dos pluviômetros; β é um peso associado com os dados do satélite; d é a distância entre o ponto k em que é calculada a chuva e a posição do pluviômetro ou do ponto da grade do satélite; γ é o expoente da distância na ponderação dos dados de pluviômetros; e θ é o expoente da distância na ponderação dos dados de satélite.

Conforme mostra a Figura 3.2, a chuva medida de pluviômetros que estão definidos em pontos aleatoriamente distribuídos, e as informações de chuva estimada por satélite são dadas em pontos regularmente dispostos em uma grade. A interpolação é realizada recalculando valores de precipitação para os pontos de grade, correspondentes às informações de chuva de satélite. Para calcular a estimativa corrigida de chuva em um centro de grade, utilizando a Eq. 3.1, são utilizados apenas os dados dos pluviômetros e dos pontos de grade da

imagem de satélite contidos dentro do círculo de raio R_{\max} em torno do local onde se deseja interpolar.

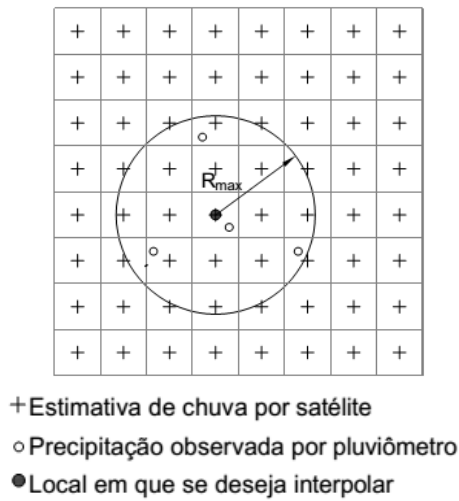


Figura 3.2. Representação esquemática da metodologia de CHUVSAT com os pluviômetros (representados pelo símbolo o) e com os valores de chuva por satélite (representadas pelo símbolo +).

Os parâmetros α , β , γ e θ são definidos com base em uma metodologia de calibração automática. Na calibração, o método de interpolação foi utilizado retirando-se um posto pluviométrico do conjunto de dados, e gerando a série temporal de precipitação para o ponto correspondente a esse pluviômetro. Os valores estimados por interpolação foram, então, comparados aos valores da série observada no pluviômetro. Esse procedimento foi repetido retirando cada um dos pluviômetros e gerando a série no local correspondente. Os valores de precipitação estimada por interpolação foram comparados com os valores de precipitação observada, e para cada conjunto de valores dos parâmetros α , β , γ e θ e foi calculado um valor correspondente á função objetivo F de Nash-Sutcliffe, dada pela seguinte equação:

$$\text{Mínimo: } F = 1 - \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{nt} (p_o - p_c)^2}{\sum_{i=1}^{nt} (p_o - \bar{p}_o)^2} \right) \quad \text{Eq. 3.4}$$

onde nt é o número de intervalo de tempo da série de precipitação, p_o é o valor da precipitação observada, p_c é o valor da precipitação estimada e \bar{p}_o é a média dos nt valores da precipitação observada.

O procedimento é repetido com valores diferentes dos parâmetros α , β , γ e θ , buscando o menor valor de F . Esse procedimento segue o método de otimização Shuffled Complex Evolution SCE-UA (Duan *et al.*, 1992; Diniz *et al.*, 1999). Os quatro valores ótimos

dos parâmetros foram obtidos dentro de limites apresentados na Tabela 3.1. Como um primeiro teste, a faixa de valores dos parâmetros de CHUVSAT foi aplicada para a região de Tocantins (Quiroz e Collischonn, 2015).

Tabela 3.1 Valores máximos e mínimos dos parâmetros envolvidos no método de interpolação CHUVSAT.

	Alfa (α)	beta (β)	gamma (γ)	teta (θ)
Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0
Máximo	250	250	5	5

Rotina de Interpolação:

O método de interpolação combinada de chuva foi aplicado após obter seus parâmetros, gerando um novo campo de precipitação regular (denominado CHUVSAT) com resolução espacial de $0,25^\circ$, igual à resolução original do produto TRMM-3B42RT, para cada intervalo de tempo, de acordo com o procedimento descrito a seguir.

1. Leitura dos parâmetros do método de interpolação α , β , γ e θ .
2. Abre um laço para o número total de intervalos de tempo desde $it = 1, \dots, nt$.
 - a. Abre um laço de posição $k = 1, \dots, ns$. Cálculo de precipitação interpolada nos mesmos centros de grade da precipitação por satélite.
 - b. Busca dos postos pluviométricos dentro do raio $R_{m\acute{a}x}$, quantificam-se os postos pluviométricos np ; calculam-se os valores dos ponderadores tal qual foi definido na Eq. 3.2.
 - c. Busca dos centros de grade dentro do raio $R_{m\acute{a}x}$, sem incluir a grade da posição k , quantificam-se os centros de grade ns ; calculam-se os valores dos ponderadores tal qual foi definido na Eq. 3.3.
 - d. Calcula-se a precipitação interpolada na posição k no intervalo de tempo it tal como foi definido na Eq. 3.1.
 - e. Fim de laço de interpolação da precipitação na posição k .
3. Fim do laço do número total de intervalos de tempo nt .

A Figura 3.3 e a Figura 3.4 mostram um esquema de diagrama de fluxo para a etapa de calibração dos parâmetros do modelo e para a etapa de interpolação com vistas a gerar campos de precipitação CHUVSAT.

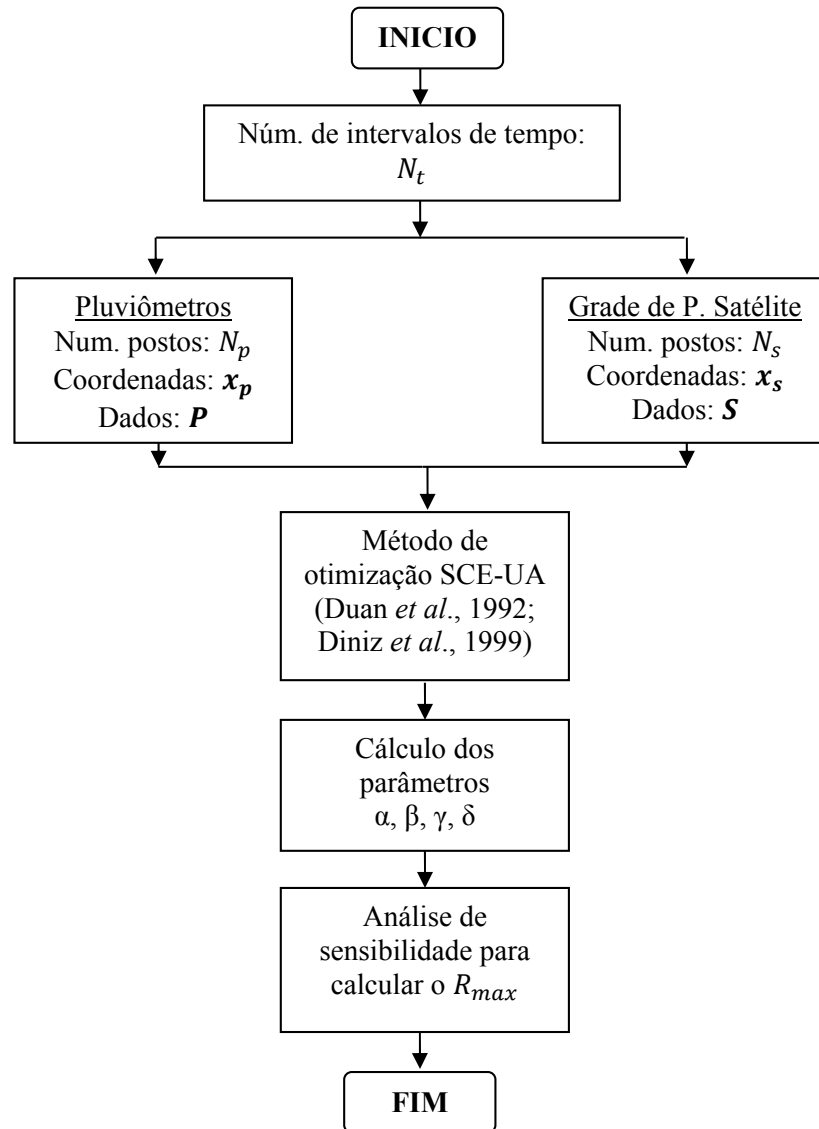


Figura 3.3 Diagrama de fluxo que descreve a técnica de combinação de precipitação CHUVSAT para calcular os parâmetros $\alpha, \beta, \gamma, \delta$.

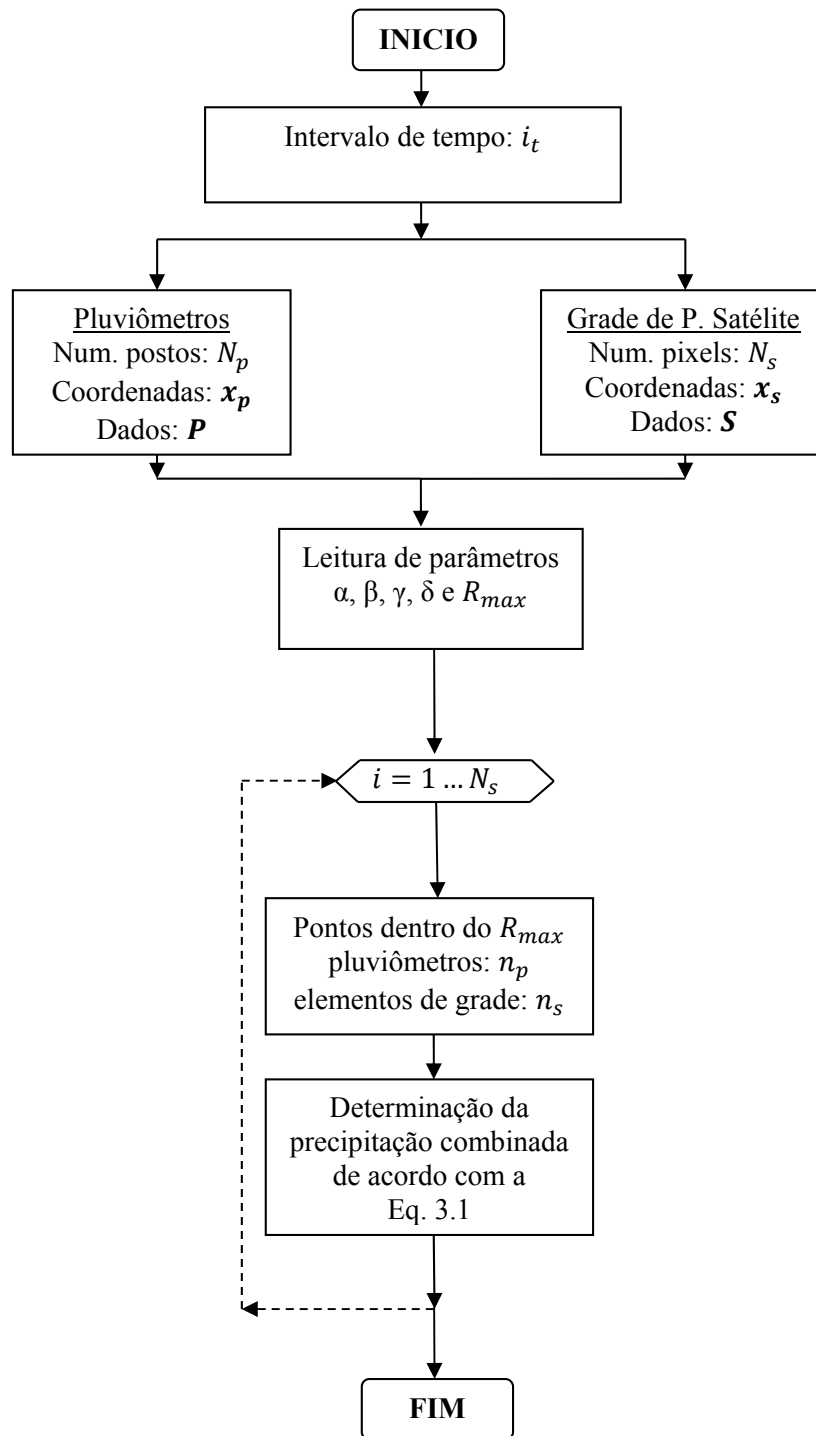


Figura 3.4 Diagrama de fluxo que descreve a técnica de combinação de precipitação CHUVSAT.

Durante o processo de interpolação foram feitas as seguintes considerações: 1) quando existe um posto pluviométrico com valor no interior de uma célula de grade, o valor da chuva interpolado na célula é igual à chuva do pluviômetro; 2) quando não há qualquer posto

pluviométrico dentro do raio máximo ($R_{\text{máx}}$), o valor da chuva corrigida no ponto de grade permanece igual ao valor original da estimativa por satélite.

3.3.2 Método MERGEHQ

O MERGEHQ é um método de composição entre campos de precipitação observada e satélite desenvolvido a partir da técnica MERGE feita por Rozante *et al.* (2010). O MERGE surgiu como uma alternativa de encontrar uma fonte de precipitação confiável para avaliação de modelos numéricos de previsão de tempo. Atualmente, gera uma grade regular de $0,20^\circ$ cada 24 horas desde 1998 até o presente no domínio de América do Sul.

A metodologia de MERGE combina precipitação estimada de satélite TRMM, o produto 3B42RT, e aproximadamente 15.000 estações reportadas com regularidade pelo *Global Telecommunication System* (GTS), plataformas de coletas de dados (PCDs) e centros regionais do Brasil. A distribuição espacial dessas redes de observações é bastante irregular, sendo que a maioria delas se encontra instaladas sobre a região costeira leste e sul do Brasil e existe ausência na região noroeste em Equador e Colômbia e pouco monitoramento sobre a bacia do rio Amazonas.

A técnica de combinação consiste em localizar todos os pontos de estações existentes sobre o domínio de interesse da grade do TRMM e identificar a célula que contem dita estação. Em seguida, é definida uma região ao redor de dita célula, essa região contem 25 células, cinco em na direção horizontal e vertical, sendo que a célula central é a que contém a estação pluviométrica. Esse procedimento é repetido para todas as estações dentro da área de interesse gerando uma região maior. As células que estão fora dessa região maior mantem o valor da precipitação por satélite TRMM. Uma interpolação do método de vizinho próximo é feita quando se requer MERGE com tamanhos de células diferente do TRMM.

Neste trabalho, geramos um método de combinação denominado MERGEHQ, seguindo a metodologia de Merge (Rozante *et al.*, 2010) para gerar campos de precipitação para outros intervalos de tempo diferentes do original. Os campos de precipitação de MERGEHQ foram de $0,25^\circ$, igual ao produto TRMM-3B42RT. O processo de espacialização dos dados de precipitação foi realizado utilizando duas interações do esquema de Barnes. Esta técnica consiste em atribuir um peso para a observação em função da distância entre a observação (pluviômetro) e o centro de célula de grade. A primeira interação é realizada para

produzir um campo inicial de precipitação, e em seguida, a segunda interação aumenta a quantidade de detalhamento da interação anterior. A seguir segue um detalhamento do processo de cálculo de MERGEHQ.

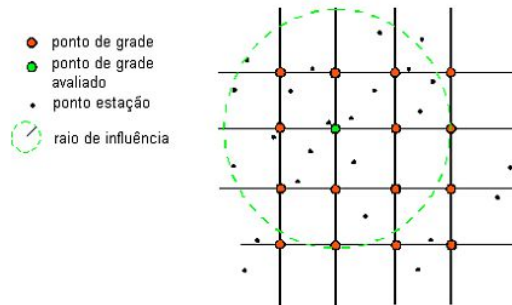


Figura 3.5- Ilustração do esquema da análise objetiva de Barnes. Fonte: Extraído de Rozante *et al.* (2010).

Nesse esquema, são atribuídos pesos (ω_n) assumidos de acordo com a distância entre o ponto de estação (x_n, y_n) e o ponto de grade (i, j) dado por:

$$\omega_n = \exp\left(-\frac{d_n^2}{R^2}\right) \quad \text{Eq. 3.5}$$

onde d_n é distância entre o ponto de estação ao ponto de grade, R é o raio de influência e n é a n -ésima estação dentro do raio de influência. Após o cálculo dos pesos, para cada estação, utiliza-se a seguinte equação para obter a primeira interação do esquema de Barnes:

$$g_{1(i,j)} = \frac{\sum_{n=1}^N \omega_n \cdot S(x_n, y_n)}{\sum_{n=1}^N \omega_n} \quad \text{Eq. 3.6}$$

onde $S(x_n, y_n)$ são os valores nos pontos de estação pluviométricas localizadas dentro do raio de influência. A segunda interação consiste basicamente em adicionar uma correção ao campo obtido na primeira, dada por:

$$g_{2(i,j)} = g_{1(i,j)} + \frac{\sum_{n=1}^N \omega'_n \cdot [S(x_n, y_n) - S'(x_n, y_n)]}{\sum_{n=1}^N \omega'_n} \quad \text{Eq. 3.7}$$

onde $S'(x_n, y_n)$ é o valor obtido no ponto de estação n via interpolação bilinear dos valores nos quatros pontos de grade adjacentes, encontrado na primeira aproximação. O peso ω'_n é o

valor do peso corrigido em função de um parâmetro de convergência (γ) aplicado para controlar a quantidade de suavização do campo a ser produzido. Os valores do parâmetro de convergência (γ) variam entre 0 e 1, no entanto os valores geralmente encontrados variam entre 0,2 e 0,5. Aqui esse valor foi adotado como 0,3 de acordo com o estudo de Rozante *et al.* (2010).

$$\omega'_n = \exp\left(-\frac{d_n^2}{\gamma \cdot R^2}\right) \quad \text{Eq. 3.8}$$

A continuação a Figura 3.6 mostra-se o procedimento em forma de diagrama de fluxo de MERGEHQ.

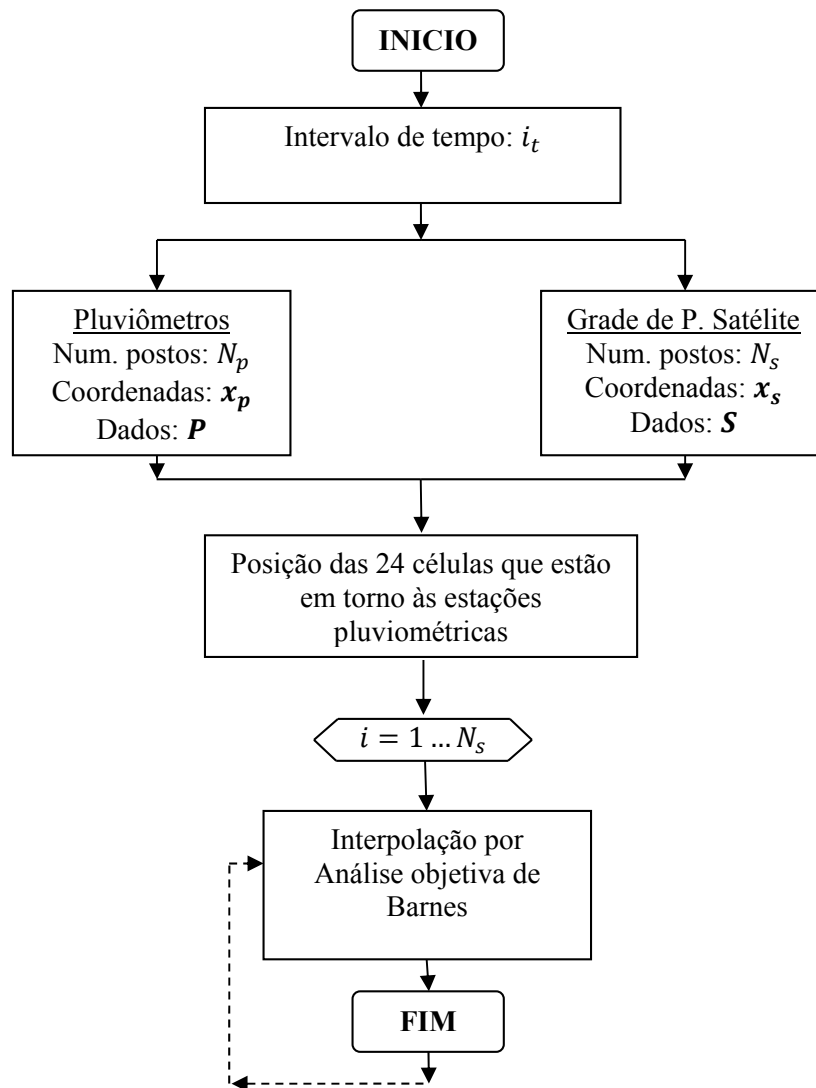


Figura 3.6 Diagrama de fluxo que descreve a técnica de combinação de precipitação MergeHQ.

3.4 Alternativas para a precipitação observada

Trabalhou-se com várias fontes de precipitação baseadas em dados de pluviômetros e em estimativas por satélite. A precipitação convencional desde postos pluviométricos para dados diários foi obtida da base de dados da Agência Nacional de Águas. Para os dados horários obtidos de diversas agências meteorológicas, empregaram-se dados adquiridos por telemetria. Para a precipitação estimada por satélite, trabalhou-se com os produtos derivados do satélite TRMM, o TRMM-3B42RT e TRMM-3B41RT.

Para a precipitação combinada, trabalhou-se com a precipitação MERGE (Rozante *et al.*, 2010) e empregara-se ainda um produto derivado desse último, MERGEHQ, para trabalhar com resolução temporal horária e, em especial CHUVSAT (Quiroz e Collischonn, 2015). A Tabela 3.2 mostra um resumo das fontes de precipitação que foram consideradas durante o desenvolvimento da tese.

Tabela 3.2 Produtos de precipitação observada, por satélite e combinadas que foram usadas durante a simulação e previsão hidrológica.

Descrição	Tipo	Fonte de informação	Resolução temporal	Resolução espacial
Simulação hidrológica diária				
ANA	Pluviômetros	Agência Nacional de Águas (ANA)	Diária	Postos
TRMM	Satélite	TMPA-TRMM	Diária	0,25°
CHUVSAT	Combinado	(Quiroz e Collischonn, 2015)	Diária	0,25°
MERGE	Combinado	(Rozante <i>et al.</i> , 2010)	Diária	0,20°
MERGEHQ	Combinado	(baseado em Rozante <i>et al.</i> , 2010)	Diária	0,25°
Simulação hidrológica horária, assimilação e previsão de vazões.				
TELEMETRIA	Telemetria	Pluviômetros automáticos	1 hora	Postos
3B42RT1h (*)	Satélite	TMPA-TRMM	1 hora	0,25°
3B41RT	Satélite	TMPA-TRMM	1 hora	0,25°
CHUVSAT	Combinado	(Quiroz e Collischonn, 2015)	1 hora	0,25°
MERGEHQ	Combinado	(baseado em Rozante <i>et al.</i> , 2010)	1 hora	0,25°

(*) O produto 3B42RT1h é o resultado de desagregar a precipitação de 3 horas para 1 hora usando o produto 3B41RT que apresenta resolução temporal de uma hora.

Os dados de precipitação, tanto de estações telemétricas como de satélite precisam ser interpoladas nos centroides das mini-bacias. Quando se trabalha com estações telemétricas (ou pluviômetros) a precipitação média é calculada por interpolação do inverso do quadrado da distância, método de interpolação que o modelo MGB-IPH utiliza para calcular a precipitação média nos centroides. Quando os dados de precipitação são disponíveis na forma de uma grade regular, a precipitação média em cada mini-bacia é obtida a partir do cálculo da média das células próximas ao centroide da mini-bacia.

3.5 Assimilação de dados por filtro de partículas

A técnica de assimilação de dados consiste de um processo onde o estado do sistema é estimado de forma recursiva e corrigido cada vez que uma observação se torna disponível. A técnica de filtro de partículas é um algoritmo que usa simulações de Monte Carlo com base na teoria de filtragem bayesiana (Liu *et al.*, 2012; Moradkhani *et al.*, 2005a). O algoritmo de filtro de partículas detalhado linhas abaixo foi extraído do trabalho de Salamon e Feyen (2009). Para maiores detalhes do método, revisar os trabalhos de Doucet *et al.*, 2001 e Arulampalam *et al.*, 2002.

Para definir a teoria de filtragem bayesiana, considere-se a seguinte expressão, como a evolução de um sistema dinâmico das variáveis de estado para intervalos de tempo discreto:

$$x_{t+1} = f(x_t, \theta_t, \mu_t) + \omega_{t+1} \quad \text{onde:} \quad \omega_{t+1} \sim N(0, q_{t+1}) \quad \text{Eq. 3.9}$$

onde f é um operador não linear que representa o modelo de transição desde o tempo t para $t + 1$; x_{t+1} é o vetor do estado do modelo no intervalo do tempo $t + 1$; θ_t é o vetor dos parâmetros do modelo; μ_t é o vetor de entrada ao modelo no intervalo do tempo t e ω_{t+1} é a sequência de números aleatórios, com média zero e variância q_{t+1} para o intervalo do tempo $t + 1$. Os estados do modelo envolvem desde um passo de tempo para o seguinte governado por equações físicas do modelo.

As variáveis de saída do modelo são funções das variáveis de estado e da caracterização dos parâmetros do modelo. O processo de observação em forma geral pode ser escrito da seguinte forma:

$$y_{t+1} = h(x_{t+1}, \theta) + v_{t+1} \quad \text{onde:} \quad v_{t+1} \sim N(0, r_{t+1}) \quad \text{Eq. 3.10}$$

onde h é um operador não linear conhecido; y_{t+1} é o vetor de valores de observação perturbados no intervalo do tempo $t + 1$ e v_{t+1} é a sequência de números aleatórios, com média zero e variância r_{t+1} para o intervalo do tempo $t + 1$. Os termos q_{t+1} e r_{t+1} são considerados como vetores aleatórios independentes.

A meta principal do problema de estimação de estado de um sistema em filtragem bayesiana é construir a Função de Densidade de Probabilidade (PDF) *a posteriori* $p(x_{t+1}|y_{t+1})$ com base de toda a informação disponível. A densidade de filtragem *a posteriori* constitui a solução completa para os problemas de assimilação de dados de tipo sequencial e permite calcular uma estimativa “ótima” do estado. O vetor do estado ótimo no tempo $t + 1$ dado a observação no tempo t pode ser obtido por meio da regra de Bayes:

$$p(x_{t+1}|y_{t+1}) = \frac{p(y_{t+1}|x_{t+1}) \cdot p(x_{t+1}|y_t)}{p(y_{t+1}|y_t)} \quad \text{Eq. 3.11}$$

Uma vez que o estado do sistema em cada etapa do tempo depende apenas do estado anterior, a densidade de previsão $p(x_{t+1}|y_t)$ obtida com a equação de Chapman-Kolmogorov pode ser simplificada para a seguinte equação:

$$p(x_{t+1}|y_t) = \int_{x_k} p(x_{t+1}|x_t) p(x_t|y_t) dx_t \quad \text{Eq. 3.12}$$

Um fator de normalização na Eq. 3.11, também denominado como distribuições preditivas, é escrito a continuação:

$$p(y_{t+1}|y_t) = \int_{x_{k+1}} p(y_{t+1}|x_{t+1}) p(x_{t+1}|y_t) dx_{t+1} \quad \text{Eq. 3.13}$$

A técnica de filtro Kalman proporciona uma solução analítica às equações Eq 3.11, Eq. 3.12 e Eq. 3.13 desde que o sistema das Eq. 3.9 e Eq. 3.10 sejam representados por um sistema linear sometido a um ruído branco aditivo, o qual trata ao sistema como um processo gaussiano independente. A técnica de filtro de partículas resolve as equações anteriores por

meio de uma sequencia de simulações Monte Carlo via métodos de reamostragem, usando aproximações para calcular a PDF *a posteriori*.

3.5.1 Reamostragem para filtro de partículas

O objetivo da técnica de filtro de partículas é de representar a PDF *a posteriori* por um conjunto de amostras aleatórias, chamadas partículas com pesos associados. Com um grande número de partículas e simulações por Monte Carlo a PDF *a posteriori* pode determinar-se pela seguinte expressão (Arulampalam *et al.*, 2002):

$$p(x_{t+1}|y_{t+1}) \approx \sum_{i=1}^{N_p} W_{t+1}^i \delta(x_{t+1} - x_{t+1}^i) \quad \text{Eq. 3.14}$$

onde W_{t+1}^i é o peso correspondente à i -ésima partícula, N_p é o numero de partículas, e δ indica a função Delta de Dirac. Como geralmente é impossível amostrar a partir do PDF *a posteriori*, uma alternativa é provar uma distribuição auxiliar, chamada de função de densidade de importância, a qual é denotada por $q(x_{t+1}|y_{t+1})$. Os pesos podem então, calcular-se de acordo ao algoritmo apresentado por Moradkhani *et al.* (2005a,b) da seguinte maneira:

$$W_{t+1}^i \approx \frac{p(x_{t+1}^i|y_{t+1})}{q(x_{t+1}^i|y_{t+1})} \quad \text{Eq. 3.15}$$

A atualização dos pesos é feito de forma recursiva segundo Moradkhani *et al.* (2005a,b) da seguinte maneira:

$$W_{t+1}^i = W_t^i \frac{p(y_{t+1}|x_{t+1}^i) \cdot p(x_{t+1}^i|x_t^i)}{q(x_{t+1}^i|x_{t+1})} \quad \text{Eq. 3.16}$$

De acordo com Moradkhani *et al.* (2005a,b) a função de densidade *a priori* é usada como distribuição auxiliar $q(x_{t+1}^i|x_{t+1}) = p(x_{t+1}^i|x_t^i)$ e então a substituição da Eq. 3.16 na Eq. 3.15 permite simplificar a atualização dos pesos da seguinte maneira:

$$W_{t+1}^i = W_t^i \cdot p(y_{t+1}|x_{t+1}^i) \quad \text{Eq. 3.17}$$

Um problema comum com a técnica de amostragem sequencial, descrita linhas antes, é o empobrecimento da amostra após de várias iterações, o que significa que, apenas poucas partículas apresentam pesos com valores importantes. Uma solução simples seria acrescentar o número de partículas, porém isto significaria acrescentar o custo computacional, deixando de ser útil para sua aplicação em problemas práticos. Em geral, o problema é resolvido utilizando um procedimento de reamostragem. Basicamente, a reamostragem duplica as partículas que apresentam maior peso normalizado e descarta aquelas com baixos pesos, mantendo inalterado o número total de partículas. Sendo assim, no presente trabalho programou-se a técnica de reamostragem residual, conhecida na literatura inglesa, como *Sampling Importance Resampling* (SIR) seguindo a metodologia descrita em Moradkhani *et al.* (2005a).

Para um sistema estocástico não linear como um modelo hidrológico distribuído, as partículas usadas para estimar as probabilidades *a posteriori* das variáveis de estado são atualizadas pela assimilação de informação contida em novas observações, as quais são propagadas recursivamente por meio de um modelo dinâmico interno para os seguintes intervalos de tempo. O procedimento baseado em filtro de partículas pode ser dividido em duas fases: previsão do modelo e correção por filtragem.

1. Fase de previsão do modelo: O modelo dinâmico não linear é executado do passo de tempo t para o passo de tempo $t + 1$. Antes da integração, cada partícula representa a PDF *a posteriori* de um conjunto de variáveis de estado e parâmetros do modelo no tempo t , entanto após a integração cada partícula representa a PDF *a priori* no tempo $t + 1$. Nessa fase não existe mudança nos valores dos pesos.
2. Fase da correção de filtragem: Há três passos durante a correção da filtragem, o cálculo da função chamada de *likelihood*, reamostragem e perturbação. O propósito da função *likelihood* é atualizar os pesos de cada partícula com base na observação disponível. O valor de *likelihood* de cada partícula é calculado pela função gaussiana da Eq. 3.18. O passo de perturbação é introduzido para manter a diversidade das partículas, permitindo assim que as partículas possam atuar num maior espaço estocástico com o fim de evoluir para o melhor caminho possível ao longo do tempo (Xu et al., 2017).

$$w_{t+1}^i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x_{t+1}^i - y_{t+1})^2}{2\sigma^2}\right) \quad \text{Eq. 3.18}$$

O peso de cada partícula é determinado por normalização de seu valor de *likelihood* por meio da soma dos valores *likelihood* de todas as partículas da seguinte maneira:

$$W_{t+1}^i = w_{t+1}^i / \sum_{i=1}^{N_p} w_t^i \quad \text{Eq. 3.19}$$

A Figura 3.7 mostra um esquema da evolução das partículas na fase de previsão do modelo e correção por filtragem. Cada partícula inclui um vetor com os valores das variáveis de estado.

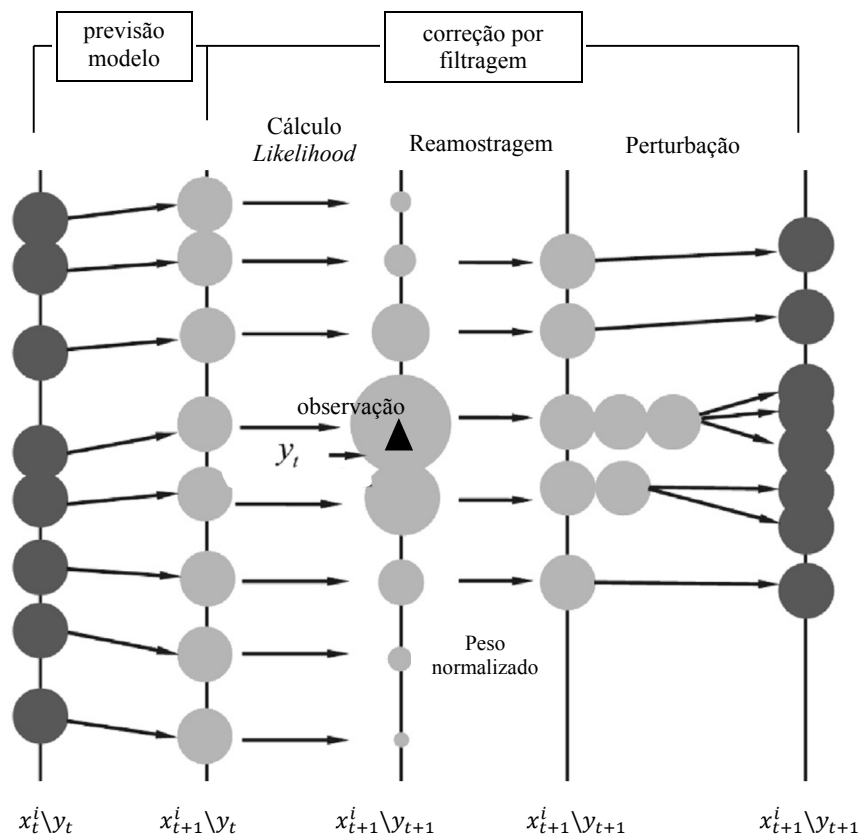


Figura 3.7 Diagrama esquemático de previsão de modelo recursivo e correção por filtragem para técnica de filtro de partícula. Extraído de Xu *et al.*, (2017).

Para o caso de acoplamento da técnica de filtro por partículas em modelos hidrológicos distribuídos com mais de uma estação hidrológica (com registro de vazão ou nível) com dados disponíveis. A Eq. 3.20 representa o cálculo da função *likelihood* em cada estação hidrológica para cada partícula do conjunto em cada estação e em cada intervalo de tempo.

$$L_{t+1}^{i,j} = p(h_{t+1}^j \setminus x_{t+1}^{i,j}) = \frac{1}{\sigma_{t+1}^j \sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(y_{t+1}^j - h(x_{t+1}^{i,j}, \theta^i))}{(2\sigma_{t+1}^j)^2}} \quad \text{Eq. 3.20}$$

onde, $L_{t+1}^{i,j}$ é o valor de probabilidade (*likelihood*) da i -th partícula e j -th observação no intervalo do tempo discreto $t + 1$, y_{t+1} é o vetor de observação, x é o vetor das variáveis de estado, h é operador não linear que relaciona variáveis de estado e observações e σ é desviação standar associada às observações.

Subsequentemente, um simples valor de função por partícula é calculado, segundo aplicando da teoria da probabilidade conjunta para variáveis independentes, como foi feito por outros trabalhos similares que apresentaram várias estações de controle com vazões observadas e várias estações para assimilar como Matgen *et al.* (2010) e Xu *et al.* (2017). Aqui o peso para todo o sistema será calculado como a multiplicação direta de todos os valores de probabilidade de todas as estações de controle com dados de vazão observada no intervalo de tempo $t + 1$.

$$L_{t+1}^i = \prod_{j=1}^{N_o} L_k^{i,j} \quad \text{Eq. 3.21}$$

A Figura 3.8 mostra um diagrama de fluxo do acoplamento do método de filtro de partículas a um modelo hidrológico distribuído, considera-se que neste caso as variáveis de estado não serão perturbadas e sim a precipitação observada que permitira um vetor de variáveis com valores aleatórias. A Figura 3.9 mostra outro diagrama de fluxo que representa o algoritmo SIR.

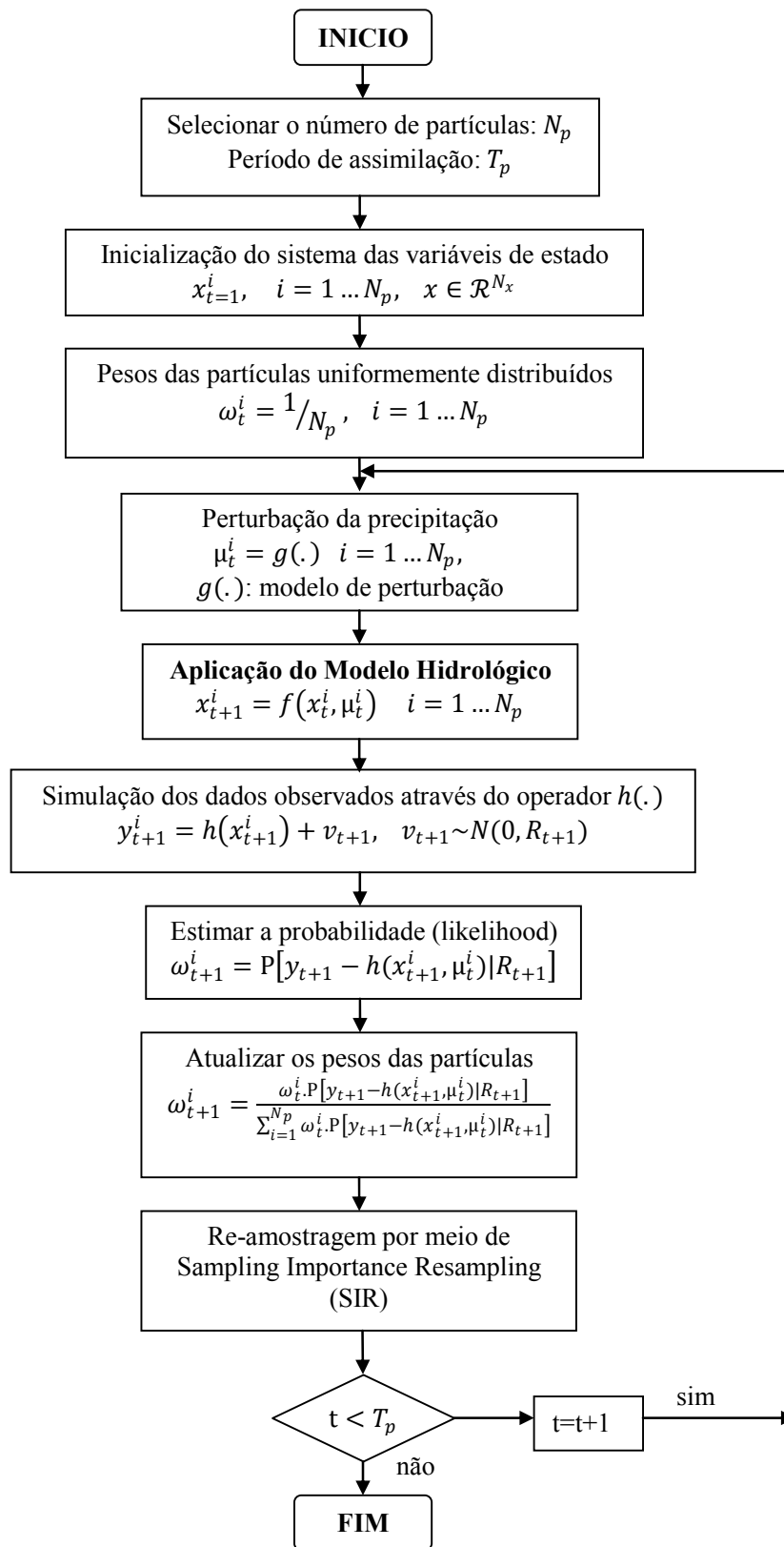


Figura 3.8 Diagrama de fluxo que descreve o método de Assimilação de dados por filtro de Partículas. Baseado de Moradkani *et al.* (2005a).

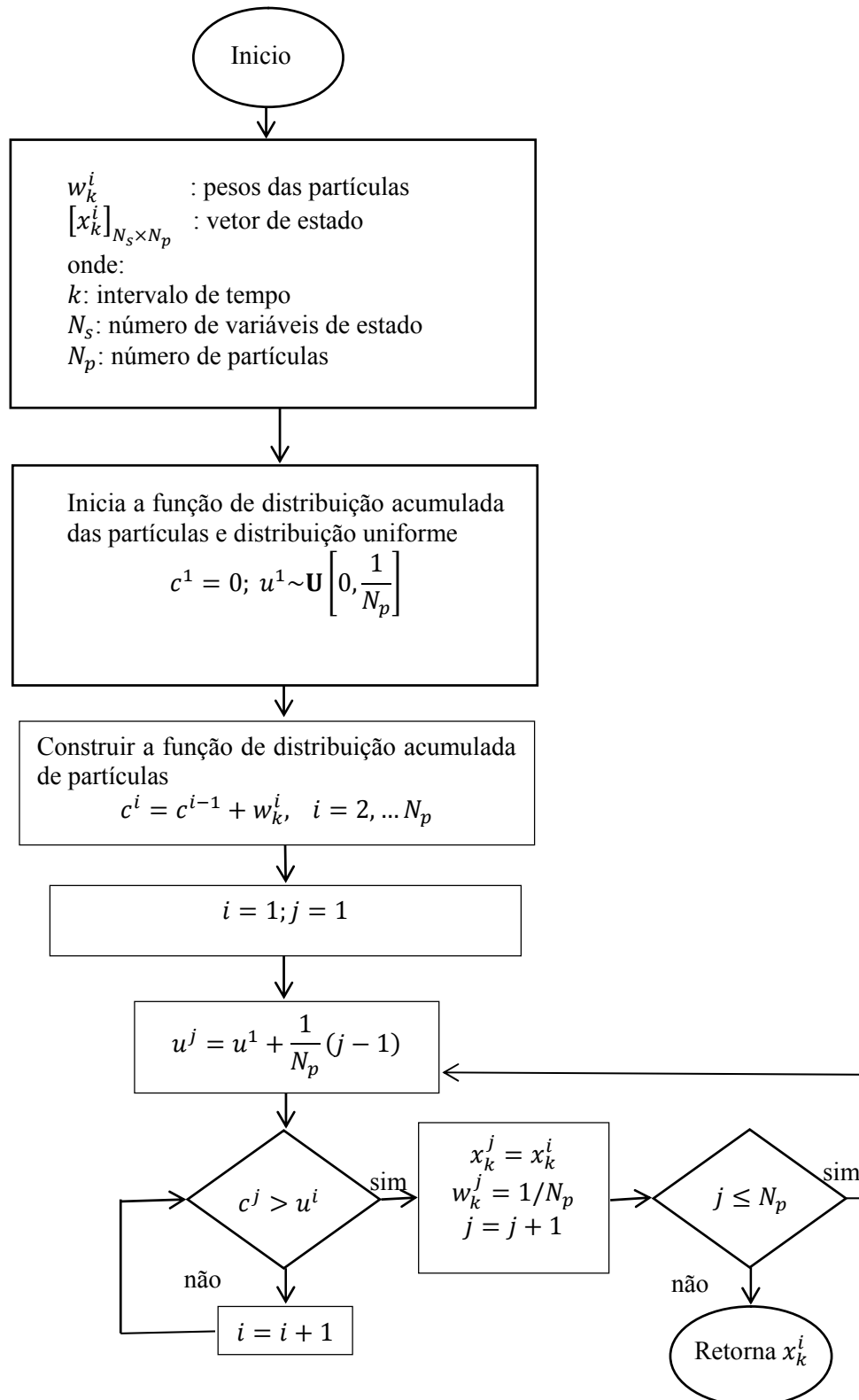


Figura 3.9 Diagrama de fluxo da rotina de reamostragem por meio de *Sampling Importance Resampling* (SIR). Extraído de Moradkhani *et al.* (2005a).

3.6 Acoplamento de assimilação de dados por filtro por Partículas

Trabalhou-se, principalmente, com a técnica de assimilação de filtro de partículas (PF) e seus resultados foram comparados com os resultados de filtro Kalman por conjunto (EnKF) e o método de assimilação implementado no modelo hidrológico MGB-IPH chamado neste trabalho de AsMGB (Collischonn *et al.*, 2005; descrito no Anexo A1).

A técnica de assimilação EnKF foi acoplado ao modelo hidrológico-hidrodinâmico MGB-IPH por Paiva *et al.* (2013) para a bacia do rio Amazonas, onde as simulações foram feitas no passo de tempo diário. Com base no trabalho anterior, aqui se acoplou a técnica de assimilação por filtro de partículas (PF) ao modelo hidrológico MGB-IPH.

Nesse sentido, algumas considerações foram feitas para as técnicas de assimilação para filtro de Partículas e filtro Kalman por Conjunto. Optou-se por perturbar a precipitação observada a fim de alterar as variáveis de estado. A Tabela 3.3 mostra as variáveis de estado do modelo hidrológico MGB-IPH que são consideradas a partir da perturbação da precipitação durante o processo de assimilação.

Tabela 3.3 Variáveis de estado do modelo hidrológico MGB-IPH que formam parte do processo de assimilação de dados do tipo sequencial.

Variável de estado	Descrição	Unidade
Armazenamento de água na camada do solo	Atua sobre cada bloco de cada mini-bacia	[m ³]
Volume no reservatório subterrâneo	Atua em cada mini-bacia	[m ³]
Volume no reservatório sub-superficial	Atua em cada mini-bacia	[m ³]
Volume no reservatório superficial	Atua em cada mini-bacia	[m ³]
Vazão a jusante do trecho do rio	Atua em cada mini-bacia	[m ³ .s ⁻¹]
Vazão de condição de contorno de método de propagação	Atua em cada mini-bacia	[m ³ .s ⁻¹]
Vazão de propagação em cada sub-trecho	Atua em cada mini-bacia que possui trechos de propagação de vazão	[m ³ .s ⁻¹]

3.6.1 Perturbação na precipitação

Dentro do contexto de assimilação de dados, a possibilidade de diminuir as incertezas no âmbito de previsão hidrológica é considerar que a fonte de erro vem da precipitação. Assumir um erro na precipitação permite alterações nas variáveis de estado por meio do modelo hidrológico. Nesse sentido, as sequências de precipitação sintética que refletem características de erro podem ser feitas usando a Eq. 3.18 utilizada para gerar séries sintéticas de precipitação por satélite como em Nijssen e Lettenmaier (2004) e em aplicações

hidrológicas de métodos de assimilação de dados como em Paiva *et al.* (2013). Os valores de precipitação são perturbados usando uma distribuição log-normal como mostrado a seguir:

$$P_c = \left[\frac{1 + \beta}{\sqrt{E^2 + 1}} \exp \left(\sqrt{\ln(E^2 + 1)} \epsilon \right) \right] P \quad \text{Eq. 3.22}$$

onde P_c é a precipitação perturbada ($\text{mm} \cdot \Delta t^{-1}$), P é a precipitação observada ($\text{mm} \cdot \Delta t^{-1}$), E é o erro relativo (%), β é o viés relativo e ϵ é a variável aleatória com distribuição normal correlacionada com média zero e variância um. O valor de viés relativo é considerado zero. Para o cálculo da variável aleatória, esta é função do campo pseudo-aleatório (w) correlacionado espacialmente, baseado no algoritmo da transformada de Fourier em duas dimensões (Paiva *et al.*, 2013), com média zero, variância a unidade e decorrelação de comprimento espacial. O campo pseudo-aleatório é gerado usando um modelo de correlação exponencial isotrópico, no qual a correlação espacial cai para e^{-1} na distância τ_x chamado de comprimento de correlação espacial. Foi considerada, também, a correlação temporal usando a seguinte relação:

$$\epsilon_k = \alpha \epsilon_{k-1} + \sqrt{(1 - \alpha^2)} w_{k-1} \quad \text{Eq. 3.23}$$

onde k é o intervalo de tempo, ϵ_k é uma seqüência no tempo de erros com correlação temporal e que depois de ser calculado é introduzido na Eq. 3.18; α determina a decorrelação temporal, determinado como segue:

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta t}{\tau_t} \quad \text{Eq. 3.24}$$

onde τ_t é o comprimento de decorrelação temporal.

3.6.2 Incertezas na observação

Os erros nas medições são parametrizados em função das vazões observadas, os erros nas observações foram calculados usando a seguinte relação:

$$Q_c = Q + \epsilon_Q; \quad \epsilon_Q \sim N(0, (\sigma_Q Q)^2) \quad \text{Eq. 3.25}$$

onde Q_c ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) são as observações perturbadas de Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), ϵ_Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) são erros distribuídos normalmente com parâmetros percentuais de Q .

3.6.3 Determinação dos parâmetros de assimilação

Uma análise de sensibilidade é feita para determinar quatro parâmetros para o procedimento de assimilação de dados. O primeiro parâmetro é o número de membros do conjunto ou número de partículas (N) e os outros três referem-se ao modelo de perturbação da precipitação sendo o erro relativo da precipitação (E ; %), a decorrelação espacial (τ_x , °) e a decorrelação temporal (τ_t , horas). Essa análise de sensibilidade é válida para bacias hidrográficas com mais de uma estação a assimilar e onde é requerido um conjunto de parâmetros válido para toda a bacia.

A variável de estado a ser assimilada é a vazão dos rios, então o estudo de sensibilidade é feito para dois conjuntos de amostras, as quais são conformadas por estações fluviométricas assimiladas e não assimiladas (ou verificadas). Para cada uma dessas amostras será calculada um termo denominado variação média da raiz do erro quadrático médio (Δrms) entre séries temporais de vazão assimilada e simulada. Maiores valores negativos da variação da raiz do erro quadrático médio indicam um melhor desempenho na faixa de valores de -100 para $+\infty$. O Δrms é calculado da seguinte maneira:

$$\Delta rms = \frac{100(rms_2 - rms_1)}{rms_1} \quad \text{Eq. 3.26}$$

onde rms_1 e rms_2 são as raízes do erro quadrático médio calculadas entre vazões observadas com as vazões assimiladas e as vazões simuladas, respectivamente.

3.7 Alternativas para a precipitação prevista

A fonte de precipitação combinada, observada e de satélite foi usada como forçante ao modelo hidrológico distribuído, no período antes da previsão. Em cada intervalo de tempo de previsão foi realizada a assimilação de dados em todas as estações com dados de vazão disponíveis. Foram utilizados valores de precipitação hipotética com dois termos de precipitação prevista: perfeita e nula (zero).

O termo chuva perfeita refere-se à utilização da chuva observada como se fosse prevista, simulando-se um cenário de previsão em tempo real ideal, no qual as previsões de chuva não apresentam erros. A previsão de vazão com chuva perfeita (observada) indica o ganho que se pode obter caso a previsão de chuva fosse "perfeita". A diferença entre previsão

com chuva observada e simulação para determinado período é que, na simulação, a entrada principal é a chuva observada gerando o hidrograma simulado para dito período. Na previsão com base na chuva observada, ajusta-se melhor o hidrograma observado do que o hidrograma obtido na simulação, isso é devido às correções nas condições iniciais por assimilação de dados.

Segundo Collischonn *et al.* (2007), as previsões obtidas usando chuva observada podem claramente ser melhores que usando precipitação prevista de outras fontes. Mesmo que os modelos numéricos de precipitação de tempo estejam melhorando constantemente, eles ainda estão longe de superar a precipitação observada, inclusive em áreas com baixa densidade de postos pluviométricos. No entanto, em que pese a sua melhor qualidade, a precipitação observada não pode ser usada para previsão de vazões de tipo operacional no período de faixa de sete dias de antecedência. Aqui a previsão de vazões derivado de chuva observada é usada apenas para propósitos comparativos.

3.8 Análise de transferência da informação

A análise de transferência da informação não forma parte da metodologia de análise de previsão hidrológica de vazões proposta neste trabalho, no entanto o acoplamento das técnicas de assimilação de dados no modelo MGB-IPH poderia responder algumas questões sobre estimar vazões em locais não monitorados.

A Figura 3.10 mostra o esquema de transferência de informação de vazão analisando cada fonte de precipitação. Aqui a análise é feita sobre a precipitação observada por telemetria, satélite e a combinação de ambas as fontes. A técnica de assimilação a considerar foi a técnica AsMGB que está acoplado ao modelo hidrológico MGB-IPH. Uma análise comparativa entre as vazões observadas e calculadas em estações com e sem monitoramento é realizada.

A Figura 3.11 mostra o esquema de transferência de informação de vazão analisando as três técnicas de assimilação de dados AsMGB, EnKF e PF. Nesse esquema, é definida apenas uma única fonte de precipitação como dado de entrada ao modelo hidrológico. A definição da precipitação observada será em base aos resultados obtidos na etapa de calibração e verificação do modelo hidrológico. Aqui, também, nesta etapa, são definidos os parâmetros dos métodos de assimilação, como número de partículas (número de membros) e

os parâmetros da precipitação perturbada como erro relativo da precipitação, decorrelação espacial e temporal.

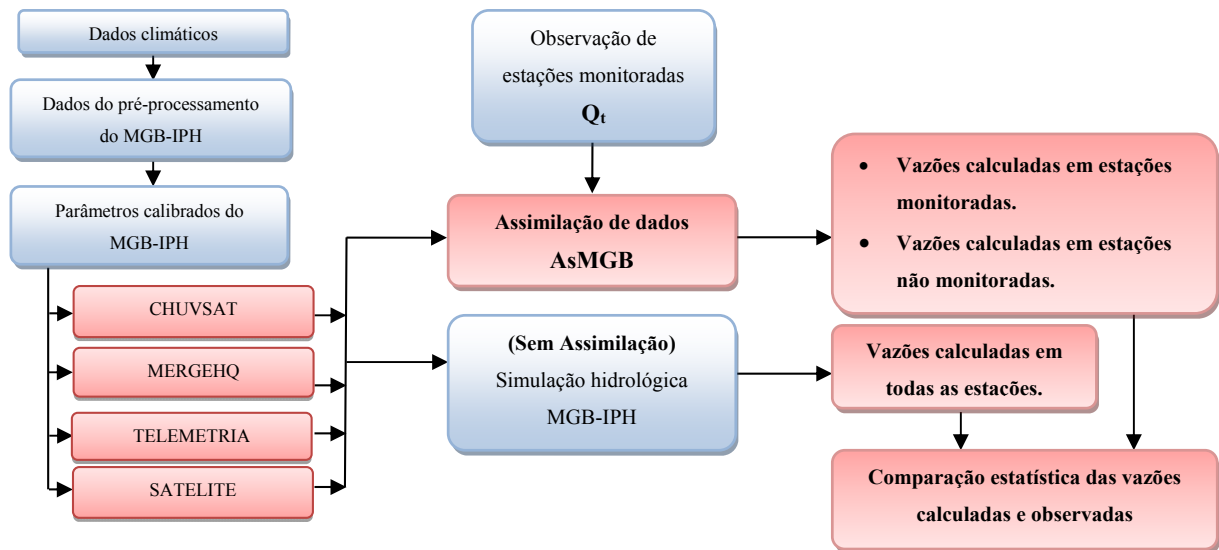


Figura 3.10 Esquema de transferência de informação de vazão analisando as fontes de precipitação observada

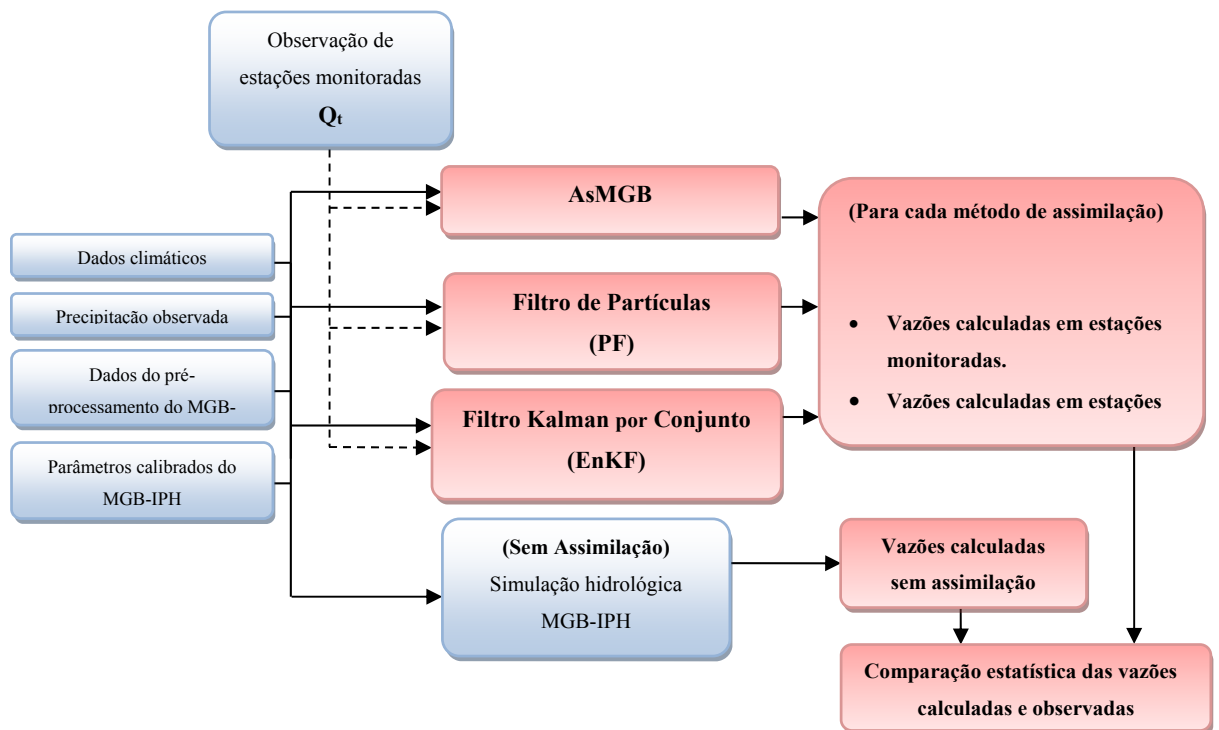


Figura 3.11 Esquema de transferência de informação de vazão analisando com diferentes técnicas de assimilação.

3.9 Medidas de desempenho estatístico na etapa de simulação e previsão hidrológica

Para a calibração e verificação do modelo hidrológico MGB-IPH, foram consideradas medidas tradicionais de desempenho estatístico como coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS), coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe dos logaritmos (NS_{log}) e erro relativo de volume total dos hidrogramas (ΔV) dadas nas equações expostas nas forma:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (QC_i - QO_i)^2}{\sum_{i=1}^N (QC_i - QO_m)^2} \quad \text{Eq. 3.27}$$

$$NS_{log} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\text{Log}(QC_i) - \text{Log}(QO_i))^2}{\sum_{i=1}^N (\text{Log}(QC_i) - QO_{mLog})^2} \quad \text{Eq. 3.28}$$

$$\Delta V = \frac{\sum_{i=1}^N QC_i - \sum_{i=1}^N QO_i}{\sum_{i=1}^N QO_i} \quad \text{Eq. 3.29}$$

onde QC_i é a vazão calculada num intervalo de tempo i ; QO_i é a vazão observada neste mesmo intervalo de tempo; N é o número de intervalos de tempo; QO_{mLog} e QO_m é a média dos logaritmos das vazões observadas e a média das vazões observadas no período de N intervalos de tempo, respectivamente.

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe é adimensional e varia entre $-\infty$ a 1. Seu valor máximo igual a 1 corresponde a um ajuste perfeito entre vazões calculadas e observadas. Esse coeficiente é fortemente influenciado por erros nas vazões máximas e quando este coeficiente é próximo de 1, o modelo está obtendo um ótimo ajuste para as cheias. O desempenho estatístico de um modelo é considerado adequadamente ótimo se supera o valor de 0,75 e é considerado aceitável se o valor está na faixa de 0,36 e 0,75.

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões também é adimensional e varia entre $-\infty$ a 1. Seu valor máximo igual a 1 corresponde a um ajuste perfeito entre vazões calculadas e observadas. Esse coeficiente é também influenciado pelos erros nas vazões máximas, porém é mais fortemente influenciado pelas vazões mínimas do que NS. Normalmente, valores próximos a 1 indicam que o modelo está reproduzido adequadamente os períodos de recessão do hidrograma e as estiagens.

O erro relativo de volume é representado em termos percentuais, não é influenciado de forma diferenciada por períodos de cheias ou de estiagens. Não existem valores máximos nem mínimos, porém durante a calibração pode-se buscar variar na faixa de -10% a +10%.

As medidas de desempenho para a análise da previsão hidrológica foram também medidas tradicionais. Considera-se o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (*NS*), raiz do erro quadrático médio (*EQMR*; $m^3 \cdot s^{-1}$), coeficiente de correlação linear (*CC*) e coeficiente de persistência (*CP*). A raiz do erro quadrático médio indica as diferenças absolutas médias que existe entre as vazões observadas e calculadas do modelo, nas mesmas unidades da vazão. O coeficiente de correlação linear mede o grau de linearidade entre as vazões observadas e calculadas do modelo. O coeficiente de persistência é um fator que envolve a comparação relativa entre dois modelos sendo o modelo alternativo aquele que considera a vazão futura é igual à vazão atual. Valores negativos do coeficiente indicam que o modelo alternativo é melhor e valores positivos indicam que existe vantagem, na média, em utilizar o modelo de previsão proposto.

$$CP = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (QP_i - QO_i)^2}{\sum_{i=1}^N (QO_i - QO_{T_o})^2} \quad \text{Eq. 3.30}$$

onde QP_i é o valor previsto; QO_i é o valor observado; QO_{T_o} é o valor observado no instante T_o , ponto de partida da previsão; i é a antecedência da previsão e N é o número de valores. O valor ótimo para o coeficiente de persistência (*CP*) é quando mais próximo estiver a um que indica melhor resultado para o modelo de previsão proposto.

CAPITULO 4

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

4.1 Introdução

Neste capítulo, realiza-se uma descrição geral da área de estudo da bacia do rio Tocantins, sua localização e os aspectos fisiográficos, climáticos e hidrológicos. Em seguida, efetua-se o processamento de dados para a simulação, transferência de informação e previsão hidrológica. As simulações hidrológicas efetuadas incluem dados horários, no entanto simulações baseadas em dados diários são realizadas como testes iniciais para os métodos de combinação de precipitação. Para isto, foram utilizadas fontes de precipitações telemétricas (pluviométricas), por estimativa de satélite e o produto resultante da combinação destas. Durante o processo de transferência de informação e previsão, foram avaliadas as técnicas de assimilação de dados de filtro de partícula (PF) (Moradkahn *et. al.*, 2005a), filtro Kalman por conjunto (EnKF) (Evensen, 2003) e o método de assimilação para o modelo MGB (AsMGB; Paz *et al.*, 2007). A seguir uma descrição destes assuntos.

4.2 Descrição geral da área de estudo

A área de estudo corresponde à bacia do rio Tocantins localizada na região central do Brasil. Essa possui uma área de drenagem de aproximadamente 310.000 km² chegando até a confluência com o rio Araguaia, como mostrado na Figura 4.1. A bacia do rio Tocantins junto com a bacia Araguaia unem-se no extremo norte e compõem uma área total de 918.822 km² até a confluência no Oceano Atlântico na bahia da ilha de Marajó. A bacia do rio Tocantins foi selecionada como área de estudo neste trabalho por ser uma região atingida periodicamente por eventos extremos e por possuir um sistema hidrelétrico de grande importância conformado pelas usinas Serra da Mesa, Cana Brava, São Salvador, Peixe Angical e Estreito.

A usina Serra da Mesa fornece energia elétrica ao sistema interligado sul/sudeste/centro-oeste e também é responsável pela ligação entre esse sistema e o sistema Norte/Nordeste, sendo o elo da interligação norte-sul. As usinas de Cana Brava, São Salvador e Estreito são do tipo a fio d'água e abastecem energia ao estado de Goiás e aos municípios da região. Por outro lado, a usina de Lajeado, que é também do tipo a fio d'água, garante o consumo de energia do estado de Tocantins, sendo que o excedente é transportado ao sistema Furnas (FURNAS, 2017).

Os eventos extremos de inundação são situações típicas no Brasil, o monitoramento constante de bacias hidrográficas e municípios é de interesse para mitigar danos causados por inundações. Atualmente, o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) monitora os municípios Goiatins e Porto Nacional, localizadas dentro da bacia do rio Tocantins, classificados com vulnerabilidade de riscos hidrológicos. De igual forma, a cidade de Imperatriz do Maranhão, próximo ao exutório da bacia, sofre de inundações constantes impactando as populações instaladas nas áreas ribeirinhas.

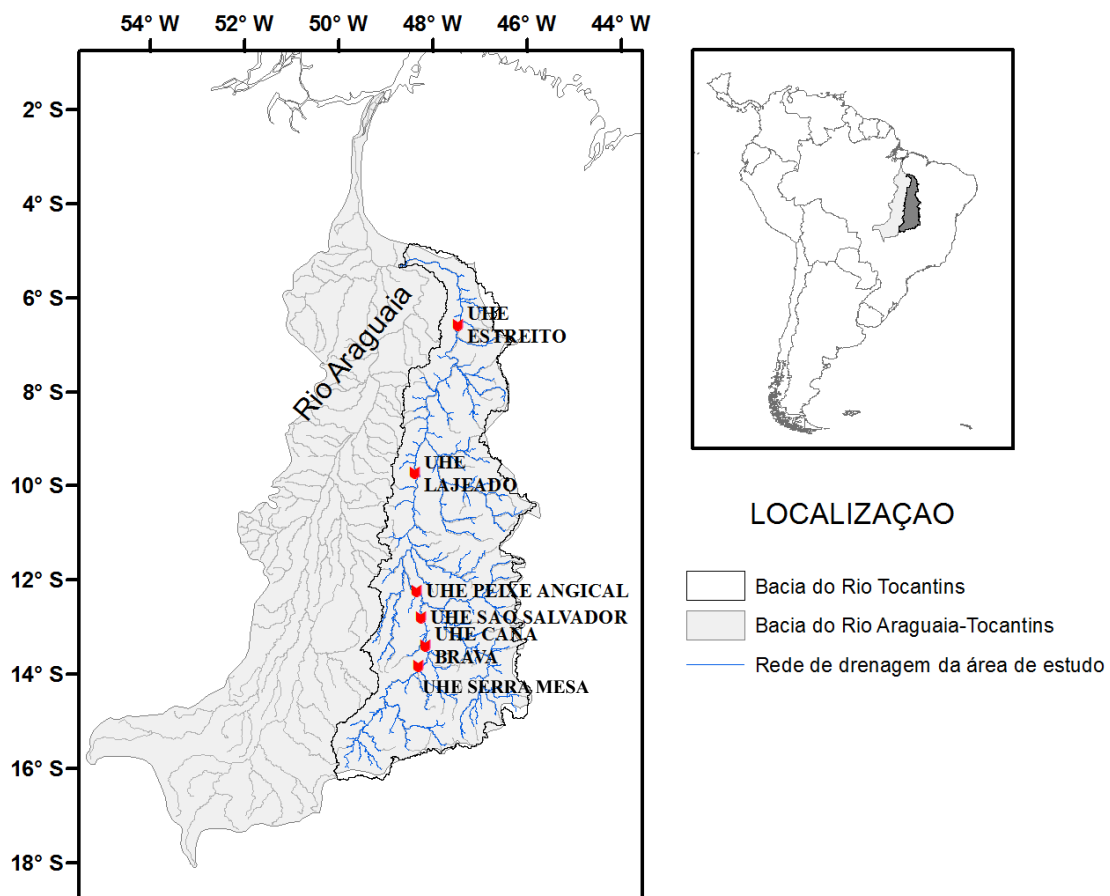


Figura 4.1 Localização da bacia do rio Tocantins.

4.3 Aspectos Fisiográficos

O rio Tocantins é formado pelos rios Maranhão e das Almas, nasce no norte do estado de Goiás, próximo ao Distrito Federal, fluindo na direção norte por cerca de 1400 km até a confluência com o rio Araguaia. As altitudes da bacia variam entre 83 a 1.637 metros, com as maiores altitudes no sul, como se apresenta na Figura 4.2. A bacia tem uma região montanhosa que supera os 1500 metros de altitude no lado leste da bacia, próximo às latitudes 14°S e 15°S e às longitudes 47°W e 48°W. A partir da região central até o exutório da bacia, a altitude é considerada moderada variando entre os 80 e 300 metros de altitude.

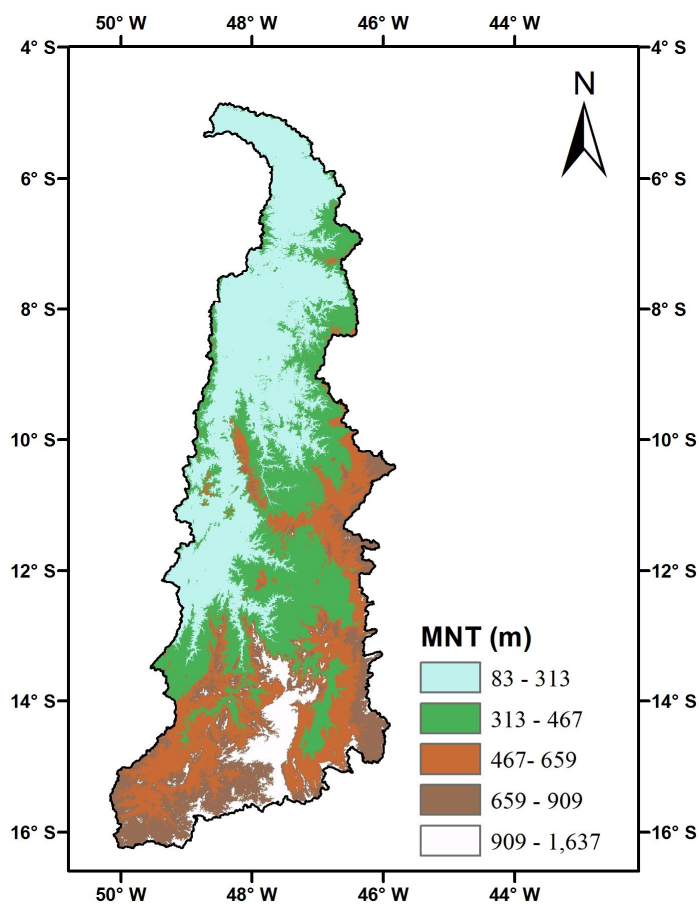


Figura 4.2 Altimetria em metros da bacia do rio Tocantins

As bacias do rio Tocantins e Araguaia situam-se na zona de transição entre a região amazônica e a região nordeste, sendo ambas influenciadas pelos ventos alísios do sudeste do anticiclone do oceano Atlântico Sul. A região é influenciada por diferentes sistemas que atuam na região de estudo. Entre eles, pode-se mencionar a zona de convergência intertropical, os sistemas frontais, as linhas de instabilidade e a zona de convergência do oceano Atlântico Sul (Marengo e Nobre, 2009).

De acordo com estações climatológicas mostradas na Figura 4.3, a temperatura média mensal varia entre 18 °C e 28 °C. As máximas ocorrem nos meses de agosto e setembro com 28 °C em quanto a média mínima mensal ocorre no mês julho com 18 °C, sendo que a temperatura média mensal é de 24 °C. A precipitação e a vazão média anual são de 1.480 mm.ano⁻¹ e 3.300 m³.s⁻¹, respectivamente, na usina Estreito segundo o cálculo estimado para o período de 2008-2014.

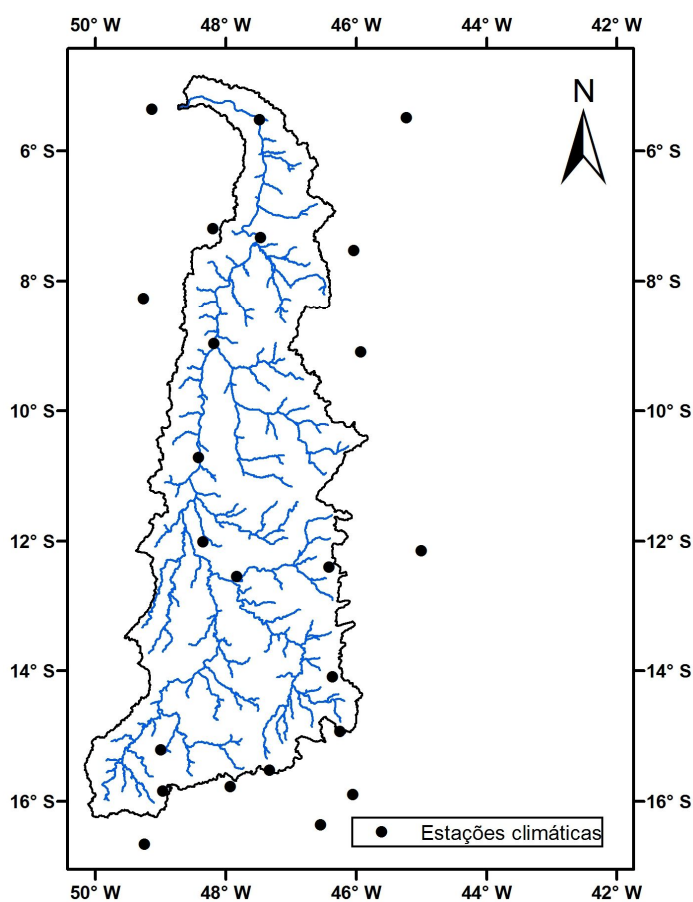


Figura 4.3 Localização das estações climáticas sobre a bacia do rio Tocantins. Fonte: ANA.

4.4 Pre-processamento para o modelo hidrológico MGB-IPH

Para a aplicação do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH na bacia em estudo, é necessário fornecer um número de informações de entrada que se relacionam com a caracterização física da bacia hidrográfica. O modelo numérico do terreno (MNT) permite definir os cursos dos rios na rede de drenagem, a área de drenagem das bacias hidrográficas, comprimento e declividade das mini-bacias e dos trechos na rede de drenagem.

4.4.1 Discretização da bacia hidrográfica

Para a discretização do modelo hidrológico MGB-IPH, seguiu-se o procedimento estabelecido nos manuais descritos por Fan *et al.* (2009) e Fan *et al.* (2010). O modelo MGB-IPH é distribuído e possui três níveis de divisão para os dados espaciais: a bacia, as sub-bacias e as mini-bacias. As mini-bacias são as unidades menores em que a bacia é dividida, enquanto as sub-bacias são unidades intermediárias entre as mini-bacias e a bacia, as quais são utilizadas para a definição dos parâmetros do modelo hidrológico e para os procedimentos de calibração.

A sequência típica utilizada para gerar a discretização e os trechos de rios inicia com o modelo digital de elevação (MDE), a partir do qual são obtidas informações como direções de escoamento, área de drenagem, direção de rede de drenagem, definição de trechos de rios, e definição espacial das mini-bacias. Para a elevação da superfície, trabalhou-se com os dados fornecidos pela *NASA Shuttle Radar Topographic Mission*, que disponibiliza dados de elevação do relevo de todo o planeta com resolução de 90 m.

Para a delimitação das sub-bacias, foram selecionadas as localizações de postos fluviométricos, telemétricos e barragens das usinas hidrelétricas, numeradas de montante para jusante ao longo dos rios. Sendo assim, o procedimento de discretização gerou um total de 45 sub-bacias, com áreas de drenagem que variam na faixa de valores de 880 - 126.000 km². Como etapa final do processo, a discretização da bacia com o modelo MGB-IPH foi composta por um conjunto de mini-bacias, sendo que cada uma delas é definida pela posição de seu centroide, áreas, declividades e comprimentos do trecho do rio à rede de drenagem. Sendo assim, a bacia do rio Tocantins é composta de 410 mini-bacias com áreas que variam na faixa de valores de 3 até 2.900 km², tal como se apresenta na Figura 4.4.

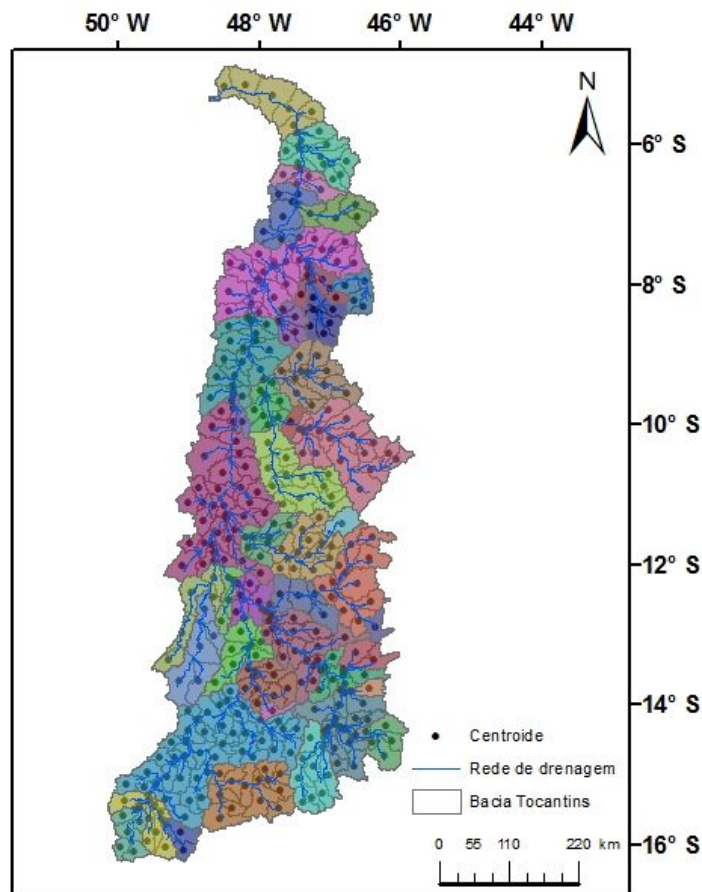


Figura 4.4 Discretização da bacia do rio Tocantins em mini-bacias e sub-bacias para aplicação do modelo hidrológico distribuído.

4.4.2 Tipos de solo e Uso do solo

Em referência aos tipos de solo, esses foram conformados com base no mapa de solos do RADAMBrasil. Uma reclassificação para um número menor de classes foi considerada de acordo com o potencial de geração de escoamento superficial e de base, bem como seu potencial de armazenamento de água. Dessa forma, quatro classes de comportamento hidrológico foram consideradas para a bacia do rio Tocantins. Entre eles estão argissolo, cambissolo, fluvisso e latossolo. Na sequência do texto, uma breve descrição das classes de solo encontrados na bacia do rio Tocantins é descrita.

A classe Argissolo caracteriza-se pelo baixo potencial de geração de escoamento superficial devido à sua alta capacidade de armazenamento, entretanto baixa capacidade de drenagem. A classe Cambissolos caracteriza-se pelo seu alto potencial de geração de escoamento superficial devido às suas baixas profundidades e capacidade de armazenamento. A classe Fluvisso caracteriza-se por estar associada à área de várzea, planície de inundação e

leitos de rio, essa classe apresenta médio para alto potencial de geração de escoamento superficial devido às suas características esperadas de presença de altos níveis freáticos e índice de saturação mais elevado por estarem próximos a corpos d'água. A classe latossolo caracteriza-se por ter semelhança aos solos arenosos, profundos e bem drenados com baixo potencial de geração de escoamento superficial. Após a definição das classes, estas foram reclassificadas e reagrupadas em solo médio e profundo.

A classe latossolos junto com argissolos foi considerada como uma categoria de solos com tendência a gerar menos escoamento superficial e foram agrupados na categoria denominada solos profundos. A classe cambissolo junto com fluvissoilo foi considerada em uma categoria denominada solos médios.

Em referência ao uso do solo, esses foram conformados em base ao mapa de vegetação da América do Sul, desenvolvido por Eva *et al.* (2002). Também foi reclassificado obtendo-se classes simplificadas, a saber: agricultura, água, vegetação de baixo porte ou cerrado e floresta.

Os dois mapas mencionados anteriormente são reclassificados e sobrepostos para a criação de classes de unidades de resposta hidrológica ou blocos. A sobreposição da discretização das mini-bacias com os blocos gerados compõem seis classes finais para a bacia do rio Tocantins: floresta em solo médio, floresta em solo profundo, vegetação de baixo porte em solo médio, vegetação de baixo porte em solo profundo, agricultura em solo profundo e água, tal como se mostra na Figura 4.5. As áreas e suas frações em porcentagens são listadas na Tabela 4.1. A classe que apresenta a menor área corresponde à floresta em solo médio com 4,4% da área total, além da água com apenas 1%. A classe que apresenta a maior área corresponde à vegetação de baixo porte em solo profundo com 36,4% da área total. Por outro lado, a área com solo profundo representa 75% da área total.

Tabela 4.1 Fração em área total e porcentagem das URHs da bacia do Rio Tocantins.

Características	Área (10 ³ x km ²)	Fração da Área Total (%)
1. Floresta em solo médio	13,64	4,4
2. Floresta em solo profundo	27,10	8,8
3. Vegetação de baixo porte em solo médio	57,95	18,7
4. Vegetação de baixo porte em solo profundo	112,91	36,4
5. Agricultura em solo profundo	94,91	30,6
6. Água	3,32	1,0
Total	310,00	100 %

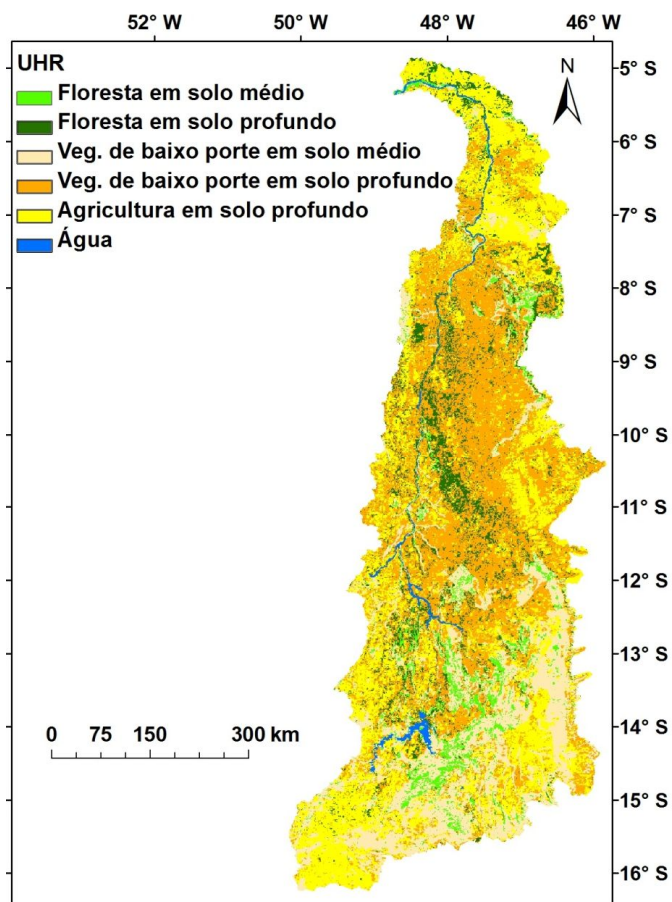


Figura 4.5 Mapa de unidades de resposta hidrológica (URH) ou blocos da bacia hidrográfica do rio Tocantins.

4.5 Simulação hidrológica diária

4.5.1 Dados observados

Os dados de vazão e as variáveis climatológicas foram obtidos do banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA). Os dados de precipitação fornecidos pela ANA são consistidos de acordo com o padrão estabelecido pela ANEEL (1999). Na área de estudo, foram selecionados 293 postos pluviométricos, dentro e no entorno da bacia do rio Tocantins, com até 30% de falhas. Do total dos postos pluviométricos, 283 postos apresentaram menos de 5% de falhas, oito postos com 6% a 20% de falhas e 2 postos com 21% a 30% de falhas.

Foi escolhido o produto de precipitação por satélite TRMM-3B42RT. A chuva diária foi obtida agregando os arquivos individuais desde as 15:00 UTC horas (período de 12:00-15:00) de um dia prévio até às 12:00 UTC horas (período de 09:00-12:00) do dia atual, com o

fim de corresponder, da melhor forma possível, aos dados normalmente coletados no Brasil em pluviômetros de observação manual.

Utilizam-se 27 postos fluviométricos de um total de 41 listados na Tabela 4.2, nove delas são afetados pela operação dos reservatórios de usinas e cinco são locais das usinas, que não serão considerados nesse trabalho. A Figura 4.6 mostra o local das estações fluviométricas destacando cinco estações com sua respectiva área de drenagem acumulada para comparar os hidrogramas de vazão calculados e observados.

Tabela 4.2 Postos fluviométricos com vazão diária sobre a bacia do rio Tocantins.

Id	Código	Nome	Nome do rio	Área de drenagem (km ²)
1	20100000	Jaragua	Rio das Almas	1,983
2	20250000	Ceres	Rio das Almas	10,668
3	20200000	Uruana	Rio de Uru	3,695
4	20050000	Ponte Quebra Linha	Maranhão	11,275
5	20950000	Ponte rio preto	Rio Preto	881
6	21300000	Alvorada Norte	Rio Corrente	3,787
7	21560000	Fazenda Veneza	Rio São Domingos	2,859
8	21220000	Flores de Goiás	Rio Paranã	7,288
9	21500000	Nova Roma	Rio Paranã	22,774
10	21600000	Ponte Paranã	Rio Paranã	29,791
11	21650000	Montante Barra Palma	Rio Paranã	40,526
12	21900000	Paraná	Rio Paranã	58,568
13	21850000	Rio da palma	Rio Palma	12,992
14	21890000	Barra Palma	Rio Palma	17,989
15	22100000	Colonha	Rio Santa Teresa	8,741
16	22150000	Jacinto	Rio Santa Teresa	13,938
17	22190000	Porto Alegre	Rio Manuel Alves	1,803
18	22250000	Fazenda Lobeira	Rio Manuel Alves	14,517
19	23150000	Itacaja	Rio Manuel Alves	2,849
20	23220000	Cachoeira	Rio Manuel Alves	2,933
21	23250000	Goiatins	Rio Manuel Alves	10,098
22	22680000	Jatobá	Rio do Sono	17,076
23	22700000	Novo Acordo	Rio do Sono	18,187
24	22900000	Porto Real	Rio do Sono	44,293
25	22850000	Dois irmãos	Rio Perdida	9,546
26	23230000	Jacare	Rio Vermelho	4,085
27	23468000	Fazenda Farinha	Rio Farinha	5,176
-	23700000	Descarreto	Rio Tocantins	299.109

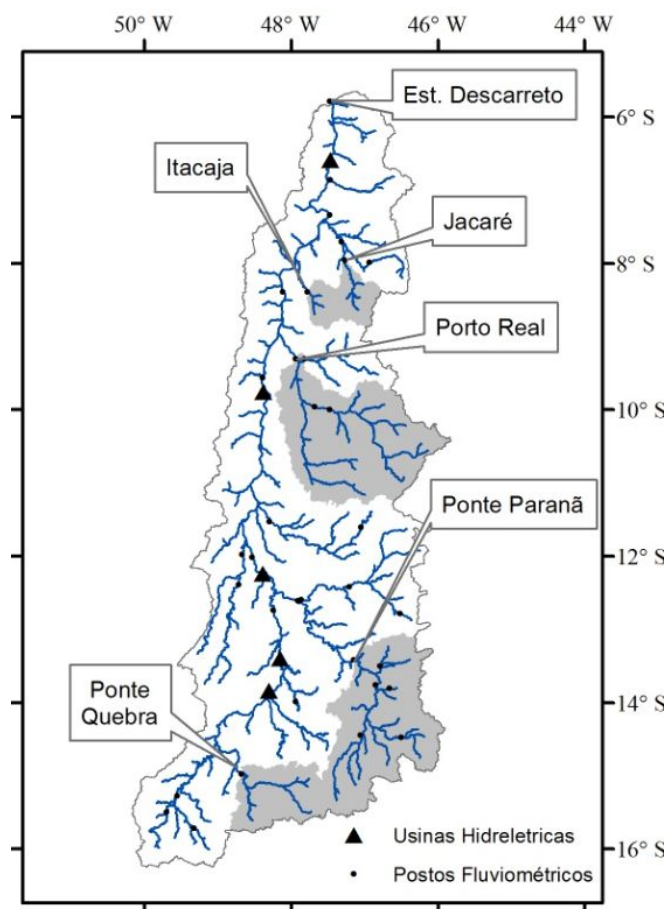


Figura 4.6 Localização das estações fluviométricas com dados diários obtidas pela Agência Nacional de Águas (ANA).

As variáveis climáticas que medem temperatura média do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e insolação são obtidas de 23 estações com dados normais climatológicas e são listadas na Tabela 4.3. A temperatura média mensal varia entre 20 °C e 25 °C aproximadamente, sendo as temperaturas médias mínimas nos meses de julho e agosto e as máximas nos meses de setembro e outubro. A umidade relativa apresenta uma variação de 40% e 70% aproximadamente, sendo menor nos meses de agosto e máximo nos meses dezembro e janeiro. O número de horas de Sol varia entre 4 h.dia⁻¹ e 10 h.dia⁻¹ sendo maior nos meses de julho e agosto e menor nos meses de dezembro e janeiro. A velocidade do vento varia entre 0 m.s⁻¹ e 2 m.s⁻¹ sendo maior nos meses de julho e agosto e mínima nos meses de dezembro e janeiro. Finalmente, a pressão atmosférica apresenta uma variação mensal entre 90 kPa e 100 kPa. Essas variáveis são de interesse para o cálculo da evapotranspiração e radiação do modelo hidrológico.

Tabela 4.3 Postos climatológicos para a bacia do rio Tocantins.

Item	Código	Nome	Longitude	Latitude
1	00082970	Alto Parnaíba	-45,933	-9,100
2	00082659	Araguaina	-48,200	-7,200
3	00083384	Arinos	-46,050	-15,900
4	00082768	Balsas	-46,033	-7,533
5	00082571	Barra do Corda	-45,233	-5,500
6	00083236	Barreiras	-45,000	-12,150
7	00083377	Brasília	-47,933	-15,783
8	00082765	Carolina	-47,467	-7,333
9	00082861	Conceição do Araguaia	-49,267	-8,267
10	00083379	Formosa	-47,333	-15,533
11	00083334	Formoso	-46,250	-14,933
12	00083350	Goianésia	-49,000	-15,217
13	00083423	Goiânia	-49,250	-16,667
14	00082564	Imperatriz	-47,483	-5,533
15	00082562	Marabá	-49,133	-5,367
16	00083231	Paraná	-47,833	-12,550
17	00082863	Pedro Afonso	-48,183	-8,9670
18	00083228	Peixe	-48,350	-12,017
19	00083376	Pirenópolis	-48,967	-15,850
20	00083064	Porto Nacional	-48,417	-10,717
21	00083332	Posse	-46,367	-14,100
22	00083235	Taguatinga	-46,417	-12,400
23	00083428	Unai	-46,550	-16,367

4.5.2 Estimativa da Precipitação pelo método CHUVSAT

Antes da calibração do modelo hidrológico, foram calculados os parâmetros do modelo de interpolação CHUVSAT e o raio máximo de influência dos dados. Para isso, foi definido um período de calibração que vai desde 1/1/2000 até 31/12/2003 (1460 dias) e repetido o algoritmo para diferentes raios máximos, que vão desde 25 km (aproximadamente tamanho da grade do produto de satélite) até 200 km. O raio escolhido é aquele com menor valor da função objetivo e, para obter os parâmetros correspondentes. A Figura 4.7 mostra os resultados da variação da função objetivo (F) em função do raio máximo, onde o valor mínimo da função objetivo ocorreu quando o raio máximo de busca considerado foi de 100 km.

Rmax (km)	alfa (α)	beta (β)	gamma (γ)	teta (θ)	F
25	238.25	16.28	0.80	0.43	0.888
50	242.71	16.61	0.80	0.43	0.888
60	197.29	28.38	0.85	0.78	0.880
70	154.61	33.54	0.92	1.02	0.865
80	187.23	54.50	0.99	1.21	0.859
90	185.96	63.24	1.05	1.35	0.856
100	236.18	54.11	1.14	1.40	0.843
110	235.15	74.00	1.22	1.54	0.850
120	176.39	53.01	1.28	1.61	0.853
130	216.49	62.68	1.34	1.66	0.854
140	189.05	46.57	1.43	1.71	0.855
160	230.90	47.78	1.53	1.78	0.850
180	241.00	43.45	1.61	1.84	0.860
200	228.73	37.66	1.69	1.90	0.857

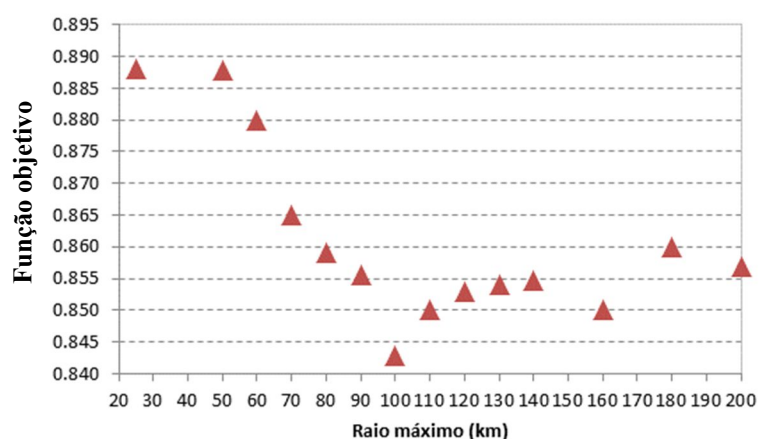


Figura 4.7 Valores dos parâmetros do método de interpolação CHUVSAT sobre o período de calibração diário para a bacia do rio Tocantins.

Nessa condição, os valores dos parâmetros γ e θ são relativamente próximos $\gamma = 1,14$ e $\theta = 1,40$ enquanto os valores de $\alpha = 236,18$ e $\beta = 54,11$ são bastante diferentes entre si. A diferença entre os valores dos parâmetros α e β mostra que o procedimento de interpolação otimizada deu um peso maior para os dados dos pluviômetros do que para os dados de satélite, mostrado na Figura 4.8. Os valores mostrados no eixo y indicam os pesos ponderados para os valores de precipitação em função da fonte calculada, como Peso 1 e Peso 2.

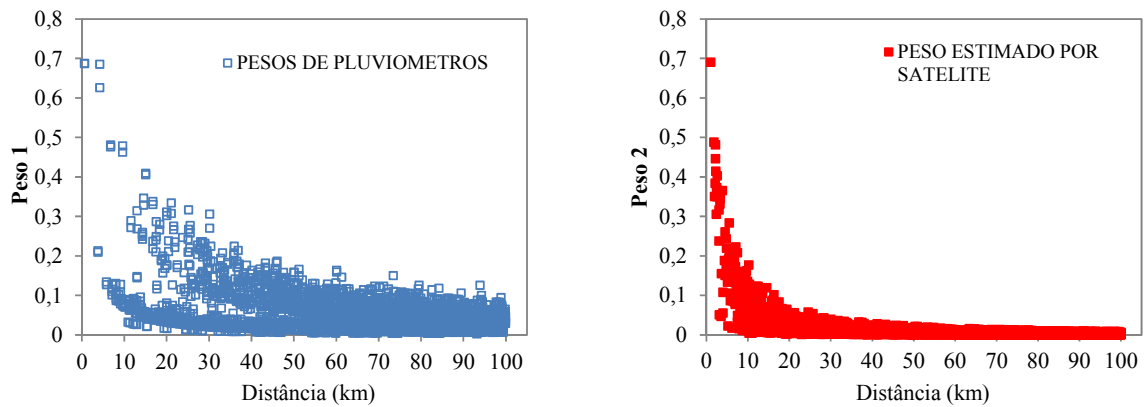


Figura 4.8 Valores dos pesos referente aos postos pluviométricos e de grade de satélite.

$$\text{Peso 1} = \frac{\sum_{i=1}^{np} w_p}{\sum_{i=1}^{np} w_p + \sum_{j=1}^{ns} w_s} \quad \text{Eq. 4.1}$$

$$\text{Peso 2} = \frac{\sum_{j=1}^{ns} w_s}{\sum_{i=1}^{np} w_p + \sum_{j=1}^{ns} w_s} \quad \text{Eq. 4.2}$$

onde i indica o posto pluviométrico; j indica o centro da célula de grade da estimativa de chuva por satélite; np é o número de postos pluviométricos utilizados na interpolação; ns é o número de pontos da grade da estimativa de chuva por satélite; w_p é o ponderador aplicado aos dados dos pluviômetros e w_s é o ponderador aplicado aos dados do satélite e são relacionados á Eq. 3.2 e a Eq. 3.3 do capítulo 3.2 da tese. Os pesos calculados pelos pluviômetros e pelo satélite TRMM-3B42RT variam entre um valor próximo a zero até um valor próximo a 0,70, sendo que, quanto menor é a distância, fica maior o peso.

Em base aos dados de precipitação dos postos pluviométricos, da base de precipitação de satélite de TRMM-3B42RT e do método de interpolação de precipitação CHUVSAT, realizaram-se campos de precipitação em cada centro da célula da grade, como está mostrado na Figura 4.9 para dois dias: 1/janeiro/2006 e 25/fevereiro/2006. O campo de precipitação de CHUVSAT calcula precipitação em regiões onde os pluviômetros detectaram e os satélites não, como na primeira linha da Figura 4.9 marcada em círculo. Em regiões onde houver detecção de precipitação para ambas as fontes, ANA e TRMM-3B42RT, CHUVSAT consegue interpolar entre ambas as fontes como marcado em quadrado, na segunda linha da Figura 4.9.

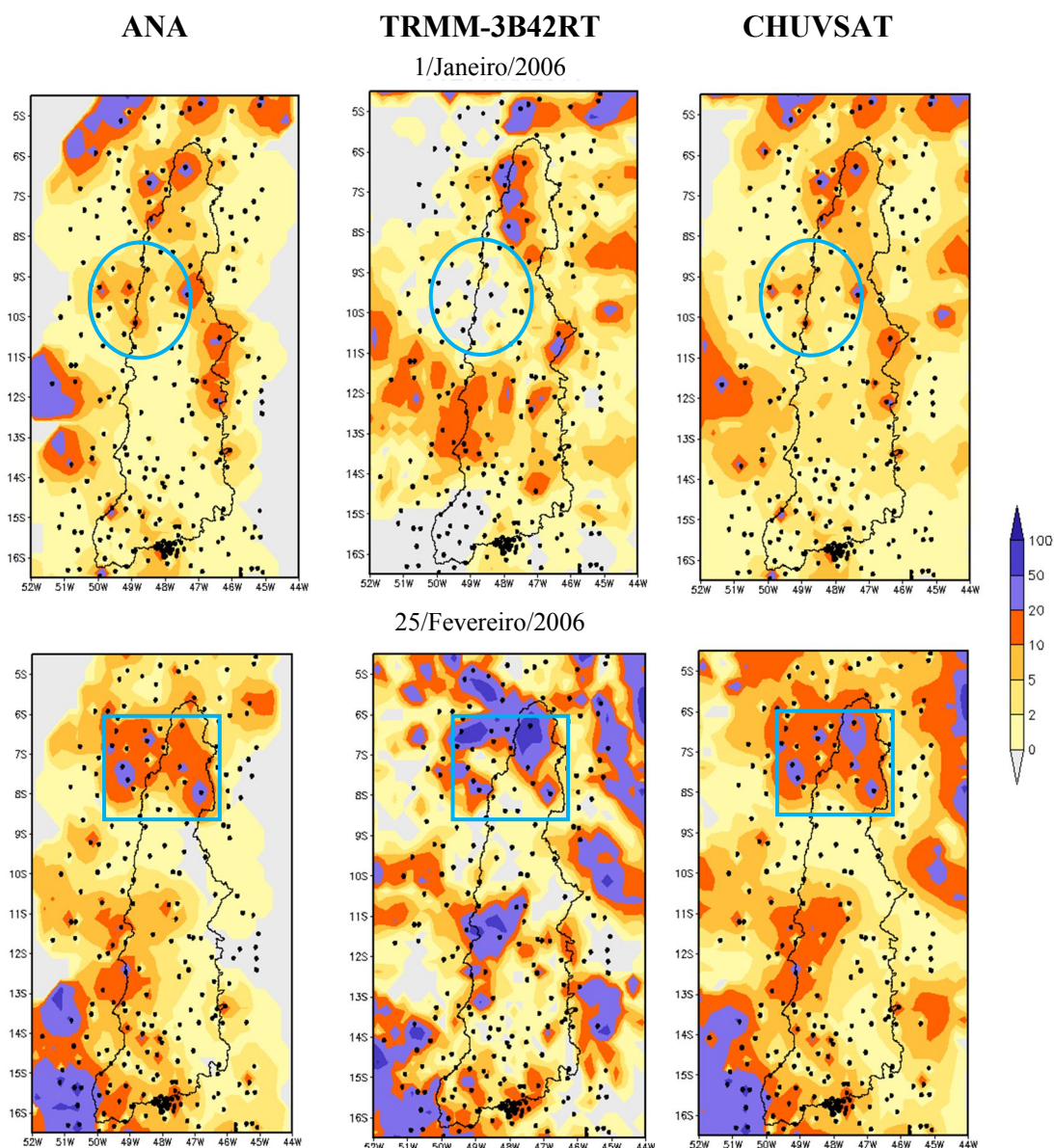


Figura 4.9 Campos de precipitação na bacia do rio Tocantins para os dias 1/01/2006 e 25/02/2006; lado esquerdo: com base aos postos pluviométricos da ANA; intermédio: TRMM-3B42RT; lado direito: CHUVSAT.

Para demonstrar o efeito da combinação de dados de satélite e de pluviômetros na interpolação, foram analisados os dados de chuva média ponderada em uma das sub-bacias de cabeceira. A Figura 4.10 apresenta os resultados na sub-bacia do rio Paranã, a montante do posto fluviométrico Ponte Paranã. A Figura 4.10a mostra um gráfico das séries temporais de precipitação média nessa sub-bacia, em intervalo diário, no período de julho/2000 a dezembro/2000. A Figura 4.10b apresenta um gráfico de dispersão, em que os valores de chuva média estimada pelo método TRMM-3B42RT (apenas dados de satélite) e pelo método CHUVSAT (combinação de dados de satélite e pluviômetros), são comparados com os dados

de chuva média estimada com os dados de pluviômetros (ANA). No período de janeiro/2000 e dezembro/2003 (etapa de calibração), o coeficiente de correlação linear entre os dados de chuva média do método CHUVSAT e os dados de chuva média obtida apenas com base nos pluviômetros é de 0,97. Nesse mesmo período, esse mesmo coeficiente é de 0,78 quando são comparados os dados de chuva média obtidos com o TRMM-3B42RT com os dados de chuva média obtidos com os pluviômetros. Na etapa de verificação (período de janeiro/2004 a dezembro/2006), esse mesmo padrão é mantido, conforme pode se observar nas Figura 4.10c e Figura 4.10d. Os resultados da Figura 4.10b e Figura 4.10d mostram que a utilização dos dados de pluviômetros em combinação com os dados de satélite permitiu criar uma série de dados de chuva mais semelhante à série baseada apenas nos dados de pluviômetros.

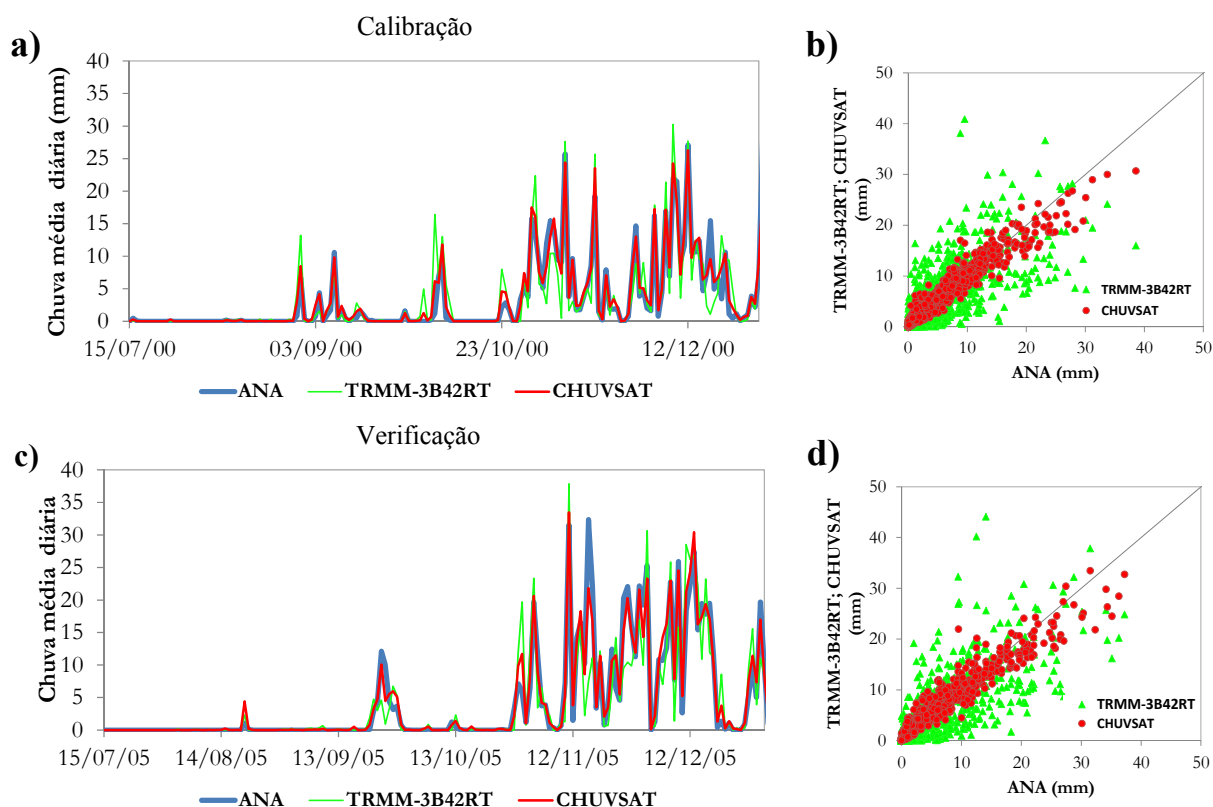


Figura 4.10 Chuva média diária sobre a sub-bacia da Ponte Paraná (30.000 km²) para três fontes de chuva ANA, TRMM e CHUVSAT. Acima: Etapa de calibração; Abaixo: Etapa de verificação.

Também foram mostrados em termos de chuva média anual calculada para cada mini-bacia para o período de 2000-2006 e comparados com as isoietas da base de dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) para o período de 1977 a 2006 (Pinto *et al.*, 2011), como está mostrado na Figura 4.11. Todas as fontes analisadas mostram uma diminuição da chuva de noroeste para sudeste da bacia. Os resultados mostram maiores semelhanças para ANA e

CHUVSAT comparadas com as isoietas do CPRM e maior sub-estimativa para TRMM-3B42RT.

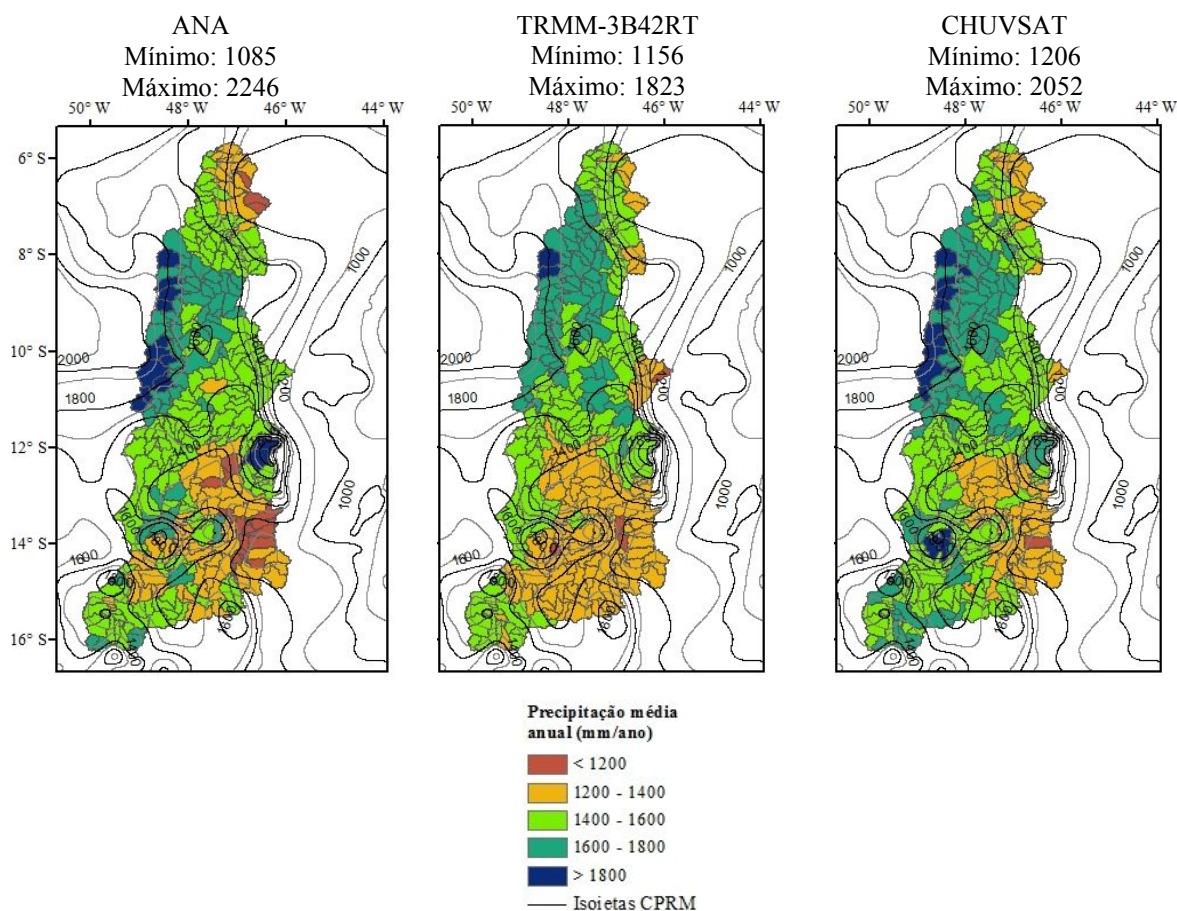


Figura 4.11 Chuva média anual sobre as mini-bacias da discretização do modelo hidrológico para as fontes de chuva ANA, TRMM, CHUVSAT para o período de 2000-2006.

4.5.3 Resultados da simulação hidrológica diária

Durante a simulação hidrológica diária, trabalhou-se com precipitação obtida dos postos pluviométricos de ANA, precipitação por satélite do produto TRMM-3B42RT e três fontes de precipitação combinada CHUVSAT, MERGE (Rozante *et al.*, 2010) e MergeHQ. A simulação foi realizada para o período de 1/1/1998 - 31/12/2006. Os parâmetros do modelo hidrológico foram calibrados com base nos dados de pluviômetros (ANA) e esses mesmos parâmetros foram considerados para simular com as outras fontes de precipitação. Os resultados foram mostrados por meio de hidrogramas nas estações com vazões observadas e por meio de uma análise estatística. A Figura 4.12 e Figura 4.13 mostram os hidrogramas para quatro postos fluviométricos: Itacaja, Porto Real, Jacaré e Ponte Paranã durante o período de set/2004 - set/2006.

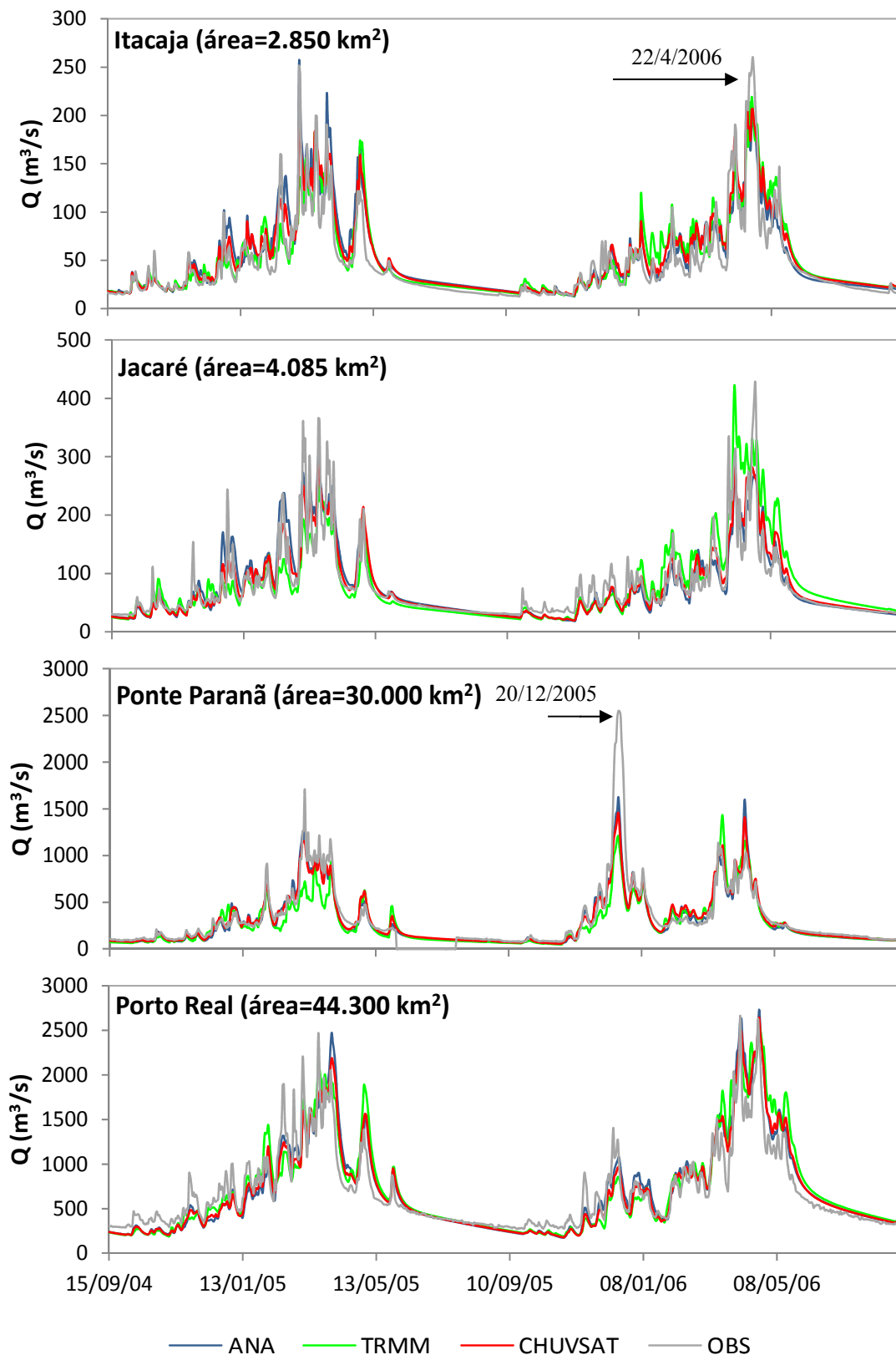


Figura 4.12 Comparação dos hidrogramas de vazões diárias observados e calculados, durante o período de 15/09/2004 a 15/09/2006 para quatro estações fluviométricas, com as três fontes de precipitação sobre a bacia do rio Tocantins.

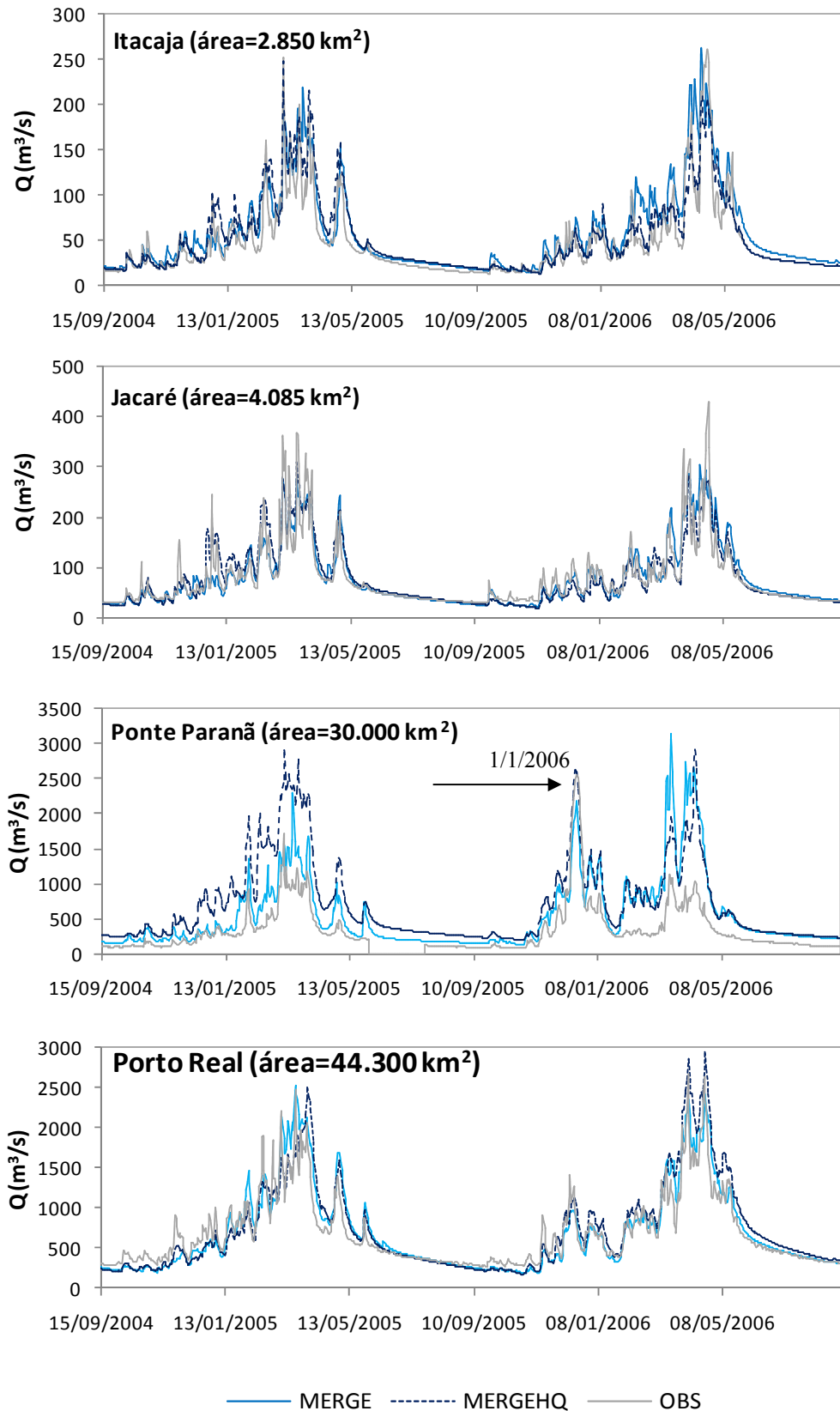


Figura 4.13 Comparação dos hidrogramas de vazões diárias observados e calculados, durante o período de 15/9/2004 a 30/9/2006, para quatro estações fluviométricas, para as fontes de precipitação MERGE e MergeHQ sobre a bacia do rio Tocantins.

Observam-se, em ambas as figuras, que a variabilidade sazonal é bem representada por todas as fontes de precipitação. O modelo hidrológico conseguiu representar vários eventos de cheia, porém outros alguns picos não foram bem representados, como em Itacaja no dia 22/4/2006 e em Ponte Paranã em 20/12/2005, mostrando, em ambos os casos, vazões máximas calculadas que ficaram subestimadas usando como dado de entrada CHUVSAT e TRMM. Os hidrogramas comparando as duas fontes de precipitação combinada MERGE e MERGEHQ mostraram semelhança na forma do hidrograma, porém diferenças existem, sendo mais notório para Ponte Paranã. Essas diferenças podem ser causadas porque se trabalhou com diferentes resoluções espaciais, sendo que para MERGE é de 0,2 e MERGEHQ é de 0,25.

A Figura 4.14 mostra o valor do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe em função da área de drenagem de cada posto fluviométrico, para a simulação com ANA, CHUVSAT e TRMM. Observa-se que há uma tendência de aumento do valor de NS com o aumento da área de drenagem e que nas bacias com maior área de drenagem o valor de NS é semelhante, quando são usados dados de ANA ou CHUVSAT. Entretanto, é importante destacar que, numa faixa de áreas de drenagem entre aproximadamente 2.000 km² e aproximadamente 10.000 km², os resultados obtidos utilizando CHUVSAT são consistentemente superiores aos obtidos utilizando apenas os dados de pluviômetros. Finalmente, a mesma figura mostra que os valores de NS obtidos com TRMM são mais baixos do que os valores de NS obtidos com a chuva dos pluviômetros (ANA) e com o método combinado (CHUVSAT).

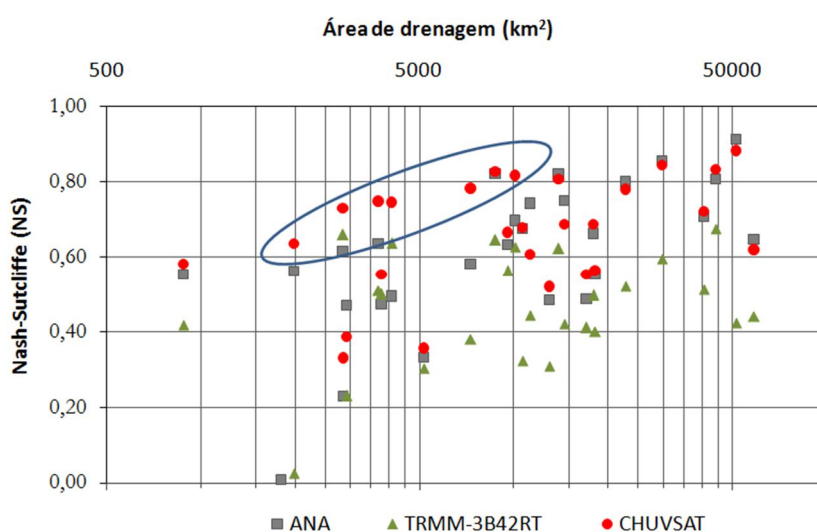


Figura 4.14 Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) em função da área de drenagem para a bacia do rio Tocantins.

A Tabela 4.4 mostra valores estatísticos como Nash-Sutcliffe (NS), Nash-Sutcliffe dos logaritmos da vazão (NS_{\log}) e erro no volume (dV) das 27 estações fluviométricas ordenados de menor para maior área de drenagem. Os valores marcados em negrito representam os valores dos testes estatísticos das estações que se mostram nos hidrogramas das Figura 4.12 e Figura 4.13. A tabela mostra, também, que há uma tendência de aumento do valor de NS com o aumento da área de drenagem. Esse comportamento é similar em outras regiões como mostrado em Pan *et al.* (2010) sobre o rio Ohio nos Estados Unidos, em Hong *et al.* (2007), quando analisa várias bacias em todo globo, e em Collischonn *et al.* (2008) na bacia do rio Tapajós no Brasil.

É interessante observar que a média do NS, em todos os postos fluviométricos da bacia, cresce de 0,60 para 0,63, quando é utilizado o método CHUVSAT, em relação ao método de referência, que utiliza apenas os dados de pluviômetros (ANA). Isto sugere que a incorporação de informação estimada por satélite melhora o desempenho do modelo hidrológico nesta bacia. A mesma tabela também mostra que, quando são usadas apenas as estimativas de chuva por satélite, todas as estatísticas são piores. O NS cai de 0,60 para 0,42 e o erro de volume passa de +2,04% para -12,6%.

Os valores médios de NS obtidos com TRMM são mais baixos do que os obtidos com a chuva dos pluviômetros e com os métodos combinados (MERGE e MERGEHQ). Esse resultado pode ser explicado, em parte, porque o modelo hidrológico foi calibrado com base nos dados de ANA. Ressalta o fato que em vários postos fluviométricos, o valor do NS obtido com CHUVSAT foram superiores aos por ANA, apesar do modelo hidrológico não ter sido calibrado especificamente para o conjunto de dados CHUVSAT. Essas estações são São Jacaré, Flores de Goiás, Colonha, Doisir mãos, Goiantins, Barra Palma e Porto Real.

Tabela 4.4 Valores das estatísticas de todos os postos fluviométricos para todas as fontes de precipitação em análises diárias sobre a bacia do rio Tocantins, para o período de simulação de 1998-2006.

SUB-BACIA	AREA	ANA			TRMM			MERGE			MERGEHQ			CHUVSAT		
		NS	Nslog	dV	NS	Nslog	dV	NS	Nslog	dV	NS	Nslog	dV	NS	Nslog	dV
Ponte rio preto	881	0,55	0,76	-5,99	0,42	0,68	-8,80	0,49	0,66	5,68	0,57	0,68	8,33	0,58	0,61	18,86
Porto Alegre	1803	0,01	-0,27	3,40	-0,33	-0,30	16,18	-0,68	-0,32	20,00	-0,19	-0,28	6,74	-0,05	-0,12	13,05
Jaragua	1983	0,56	0,75	-10,83	0,03	0,13	-50,26	0,41	0,72	-19,21	0,54	0,78	1,83	0,64	0,78	-16,32
Itacaja	2849	0,61	0,72	22,55	0,66	0,76	16,75	0,60	0,76	21,59	0,58	0,70	24,63	0,73	0,80	14,71
Fazenda Veneza	2859	0,23	-1,33	-1,91	-0,05	-0,92	10,02	-0,01	-1,96	-3,88	-0,42	-1,05	23,22	0,33	-1,03	0,98
Cachoeira	2933	0,47	0,46	-9,95	0,23	-0,10	-38,86	-0,14	-2,45	-58,02	0,48	0,46	-10,29	0,39	0,18	-34,88
Uruana	3695	0,64	0,81	3,61	0,51	0,62	-19,86	0,64	0,73	-2,18	0,49	0,81	18,12	0,75	0,84	-0,85
Alvorada Norte	3787	0,47	0,59	7,82	0,50	0,57	-4,69	-0,07	-1,92	-29,29	0,35	0,51	21,05	0,55	0,66	-0,61
Jacare	4085	0,49	0,73	8,86	0,64	0,75	-1,20	0,66	0,74	3,73	0,53	0,73	9,95	0,75	0,82	1,59
Fazenda Farinha	5176	0,33	-0,38	-18,63	0,30	0,28	-6,25	0,29	0,26	5,27	0,08	-0,78	-11,30	0,36	-0,03	-15,94
Flores de goias	7288	0,58	0,80	7,48	0,38	0,59	-44,22	0,50	0,66	-41,39	0,74	0,84	2,20	0,78	0,85	-13,37
Colonha	8741	0,82	0,68	10,92	0,65	0,63	-5,34	0,65	0,67	-20,94	0,78	0,63	22,96	0,83	0,68	3,94
Doisir maos	9546	0,63	0,74	15,06	0,56	0,78	-5,19	0,64	0,78	-3,41	0,65	0,75	13,84	0,67	0,80	5,85
Goiatins	10098	0,70	0,76	1,07	0,63	0,69	-8,41	0,71	0,62	-13,71	0,69	0,75	2,75	0,82	0,80	-7,34
Ceres	10668	0,68	0,86	5,22	0,32	0,50	-20,54	0,53	0,71	-5,46	0,33	0,80	28,01	0,68	0,85	8,23
Ponte Quebra Linha	11275	0,74	0,85	3,71	0,44	0,59	-22,60	0,65	0,83	-1,32	0,44	0,70	35,79	0,61	0,80	24,17
Rio da palma	12992	0,48	0,62	2,61	0,31	0,18	-25,32	0,43	0,09	-27,02	0,52	0,65	1,69	0,52	0,58	-19,46
Jacinto	13938	0,82	0,58	10,23	0,62	0,54	-2,38	0,65	0,53	-8,94	0,79	0,52	24,32	0,81	0,57	6,11
Fazenda Lobeira	14517	0,75	0,85	9,02	0,42	0,71	7,32	0,53	0,69	30,54	0,69	0,78	25,57	0,69	0,79	16,83
Jatobá	17076	0,49	0,25	-5,28	0,41	0,04	-20,88	0,46	-0,22	-18,79	0,38	0,25	1,72	0,55	0,21	-16,59
Barra Palma	17989	0,66	0,65	7,91	0,50	0,64	-12,52	0,61	0,69	-17,74	0,67	0,65	8,80	0,69	0,74	-9,63
Novo Acordo	18187	0,55	0,26	-7,68	0,40	0,03	-22,10	0,47	-0,35	-21,59	0,46	0,29	0,24	0,56	0,23	-16,98
Nova Roma	22774	0,80	0,89	2,56	0,52	0,77	-17,08	0,43	0,37	-26,81	0,80	0,88	8,92	0,78	0,88	-4,97
Ponte Parana	29791	0,86	0,91	-0,89	0,60	0,82	-12,09	0,56	0,63	-16,36	0,85	0,92	10,43	0,85	0,92	-1,39
Montante Barra Palma	40526	0,71	0,72	-4,68	0,51	0,66	-16,23	0,54	0,52	-18,22	0,70	0,73	5,18	0,72	0,73	-6,39
Porto Real	44293	0,81	0,83	6,70	0,68	0,76	-3,34	0,75	0,76	0,04	0,75	0,80	12,47	0,83	0,85	0,90
Parana	58568	0,65	0,66	-7,74	0,44	0,60	-21,32	0,51	0,56	-24,22	0,65	0,66	-1,93	0,62	0,66	-14,96
	Mínimo	0,01	-1,33	-18,63	-0,33	-0,92	-50,26	-0,68	-2,45	-58,02	-0,42	-1,05	-11,30	-0,05	-1,03	-34,88
	Médio	0,60	0,55	2,04	0,42	0,44	-12,56	0,44	0,21	-10,80	0,51	0,52	10,93	0,63	0,57	-2,39
	Máximo	0,86	0,91	22,55	0,68	0,82	16,75	0,75	0,83	30,54	0,85	0,92	35,79	0,85	0,92	24,17

A Figura 4.15 mostra a variação do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) e do erro no volume (dV) em função de faixas da área de drenagem. As bacias foram classificadas em áreas pequenas ($A < 5.000 \text{ km}^2$), médias ($5.000 < A < 20.000 \text{ km}^2$) e grandes ($A > 20.000 \text{ km}^2$). Os resultados mostram que, para áreas pequenas e médias a fonte de precipitação com CHUVSAT forçado ao modelo hidrológico se mostrou superior em termos de Nash-Sutcliffe e menor erro de volume relativo nas vazões comparado às outras fontes de precipitação estudadas. Em outras palavras, a inclusão da estimativa de chuva por satélite trouxe benefício maior nas bacias com áreas de drenagem menores a 20.000 km^2 .

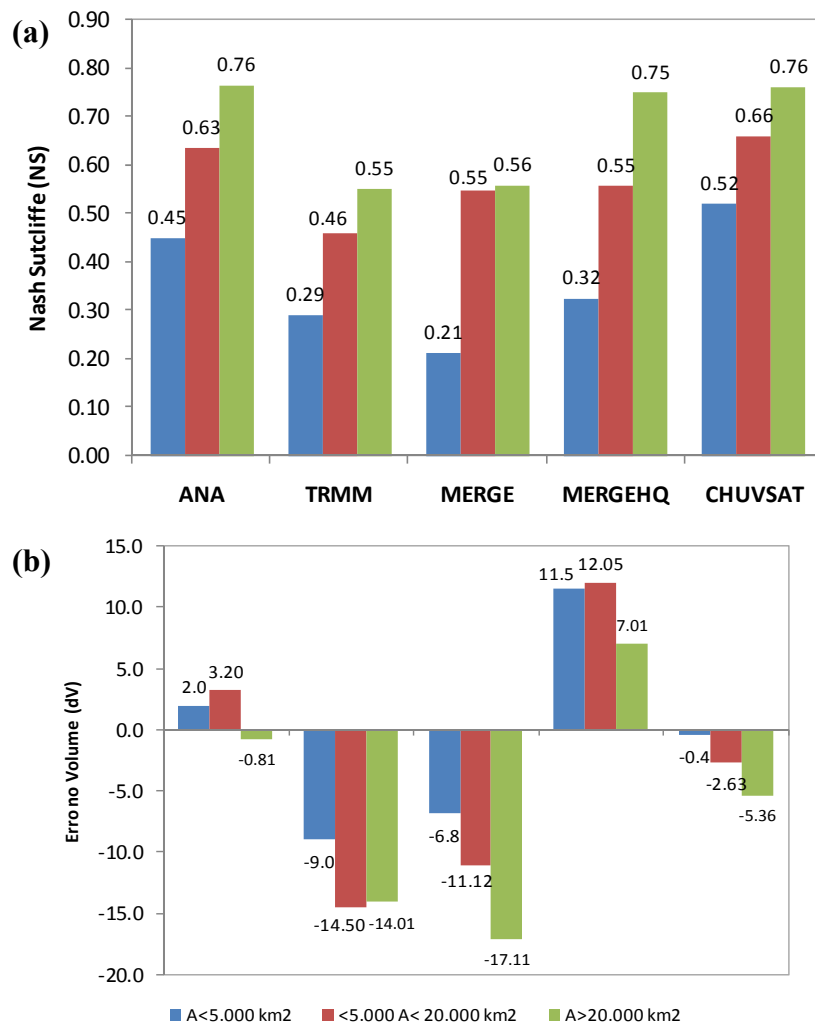


Figura 4.15 Coeficientes estatísticos médios classificados por área de drenagem sobre a bacia do rio Tocantins a) Nash-Sutcliffe, b) Erro no volume.

4.6 Simulação hidrológica horária

4.6.1 Dados observados

Os dados de precipitação foram obtidos de 50 estações telemétricas distribuídas dentro e no entorno da bacia do rio Tocantins mostradas na Figura 4.16 e listadas no Anexo A.3. Observa-se uma distribuição espacial com maior concentração delas na região central e maior dispersão na região sudeste da bacia com densidade calculada de aproximadamente 1 pluviômetro por cada 6000 km². As fontes de precipitação não convencional estão conformadas pelos produtos de estimativa de chuva por satélite em tempo quase real produzido pelo TRMM-TMPA. Trabalhou-se com TRMM-3B42RT fornecidos em arquivos individuais de três em três horas (oito arquivos por cada 24 horas) e para propósito de obter precipitação horária se usou o produto TRMM-3B42RT de 3 horas desagregada no intervalo de horas usando os dados do produto TRMM-3B41RT (com resolução temporal de 1 hora) e que, daqui a diante, serão chamados dados de 3B42RT1h.

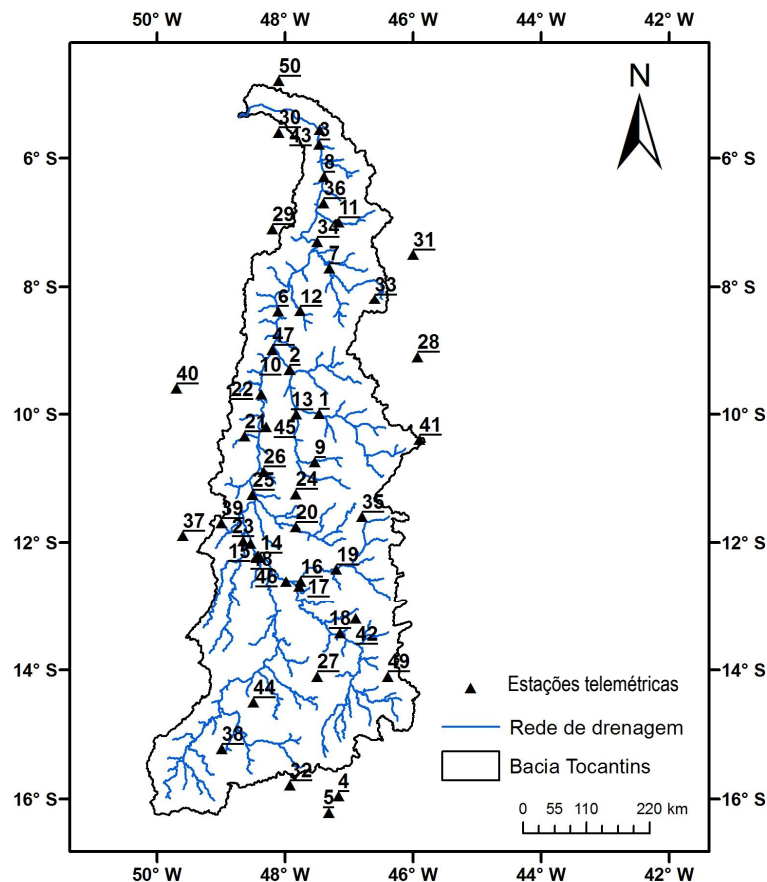


Figura 4.16 Distribuição das estações telemétricas de precipitação horária na bacia do rio Tocantins.

Os dados de vazão foram obtidos de estações fluviométricas fornecidas pelas empresas Consórcio Estreito Energia (CESTE), Energia Peixe Angical (ENERPEIXE) e a Agência Nacional de Águas (ANA). Todas essas estações e suas características são mostradas na Figura 4.17 e listadas na Tabela 4.5. Assim mesmo, existem seis (6) usinas hidrelétricas, instaladas na rede principal do rio Tocantins e listadas na Tabela 4.6 No caso das estações com usinas hidrelétricas, utilizaram-se as séries diárias naturalizadas divulgadas pela ONS (Operador Nacional de Sistema Elétrico), e esses valores diários foram desagregados para cada hora realizando uma interpolação linear.

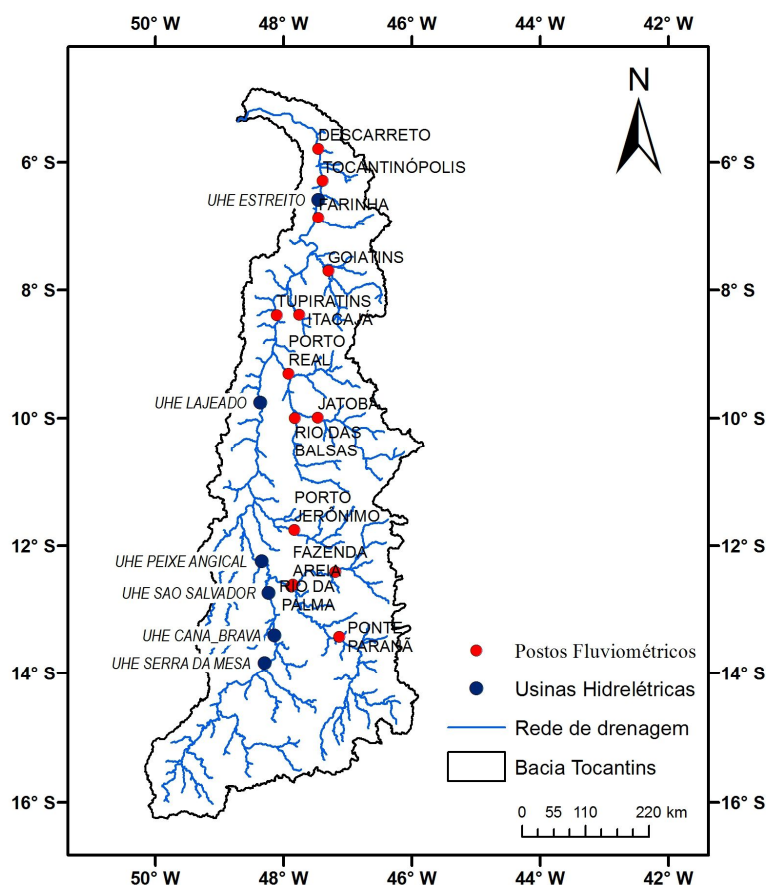


Figura 4.17 Distribuição das estações fluviométricas e locais com usinas hidrelétricas na bacia do rio Tocantins com dados horários.

Tabela 4.5 Estações fluviométricas de vazão na bacia do rio Tocantins.

Id	Código	Nome	Latitude (°)	Longitude (°)	Área de drenagem (x 10³ km²)
1	21600000	Ponte Paranã	-13,43	-47,14	30,1
2	21650000	Fazenda Santana	-12,69	-47,78	40,7
3	21850000	Rio da Palma	-12,42	-47,20	13,0

4	21890000	Fazenda Areia	-12,61	-47,76	18,1
5	22220000	Porto Jerônimo	-11,76	-47,84	10,2
6	EC33F136	Jatobá	-9,99	-47,47	17,2
7	EC340306	Rio das Balsas	-10,00	-47,83	12,2
8	EC3425EA	Porto Real	-9,30	-47,92	44,3
9	EC339450	Itacajá	-8,39	-47,76	2,8
10	EC33B2BC	Goiatins	-7,71	-47,31	10,1
11	EC338726	Farinha	-6,8689	-47,4603	5,3

Tabela 4.6 Estações com usinas hidrelétricas na bacia do rio Tocantins.

Id	Código	Nome	Latitude (°)	Longitude (°)	Área de drenagem (x 10³ km²)
1	270	UHE Serra da Mesa	-13,84	-48,30	52
2	191	UHE Cana Brava	-13,40	-48,14	59
3	253	UHE São Salvador	-12,74	-48,24	64
4	257	UHE Peixe Angical	-12,25	-48,35	127
5	273	UHE Lajeado	-9,76	-48,37	186
6	271	UHE Estreito	-6,59	-47,46	289

4.6.2 Métodos de combinação de precipitação

Trabalhou-se com as duas técnicas de combinação de precipitação (MERGEHQ e CHUVSAT) para realizar a simulação e previsão hidrológica com dados horários. Em ambos os casos, foi gerada a precipitação em cada célula de 0,25°, posteriormente interpolada nos centroides da bacia em cada intervalo de tempo da simulação. Para a geração da precipitação combinada, foram utilizadas 50 estações telemétricas e 2584 células de 0,25° de precipitação por satélite 3B42RT1h. Para gerar os campos de chuva pelo método MERGEHQ, procedeu-se com a metodologia original de Merge (Rozante *et al.*, 2010). No caso da geração dos campos da chuva pelo método CHUVSAT com intervalo de tempo horário, modificou-se o programa original considerando-se dois raios de influência no cálculo da resposta, sendo esses o raio de busca para os pluviômetros R_{pluv} e o raio de busca para os centros de célula de grade de

satélite R_s (ver Figura 4.18). Essa alteração foi feita por causa das estações telemétricas estarem mais distantes entre si, portanto requerendo um raio de busca maior, enquanto a influencia da precipitação por satélite requerida pode ser capturada com um raio de busca menor.

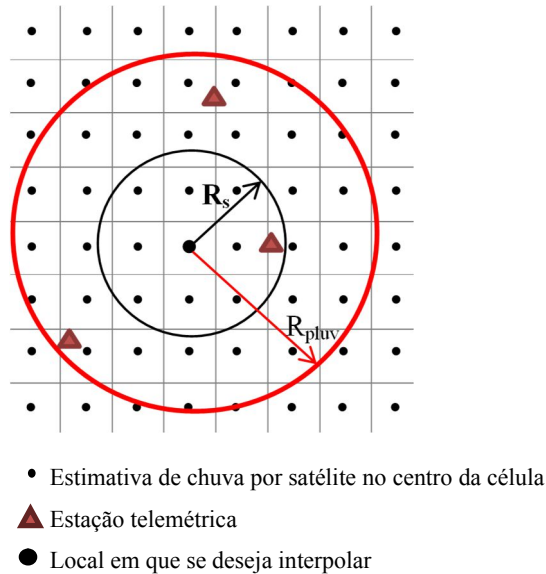


Figura 4.18 Representação esquemática da metodologia de CHUVSAT para simulação horária.

Nesse sentido, foi definido um período de calibração que vai desde janeiro/2011 até dezembro/2012, onde o algoritmo de interpolação foi repetido para diferentes raios de busca, que vão desde 20 - 100 km para R_s e 20 - 300 km para R_{pluv} . Assim, dessa maneira, foi criada uma superfície com os valores da função objetivo a partir de valores pontuais, como mostrado na Figura 4.19. Dessa mesma forma, foram geradas diferentes superfícies para cada um dos quatro parâmetros do método de interpolação, onde o parâmetro α varia na faixa de valores de 125 - 240, o parâmetro β entre 50 - 150, o parâmetro γ entre 0,4 - 1,1 e o parâmetro θ entre 0 - 1, como mostrado Figura 4.20. De acordo com o primeiro gráfico da distribuição espacial da função objetivo, a eleição de R_s e R_{pluv} está associada ao valor ótimo (quando o valor da função objetivo for zero). Isso significa que a escolha deve ser para distâncias maiores do que 300 km e 100 km para os postos pluviométricos e de precipitação por satélite, respectivamente, achando raios de busca não adequados para propósitos do estudo. Sendo assim, optou-se por escolher raios de busca obtidos por outras fontes.

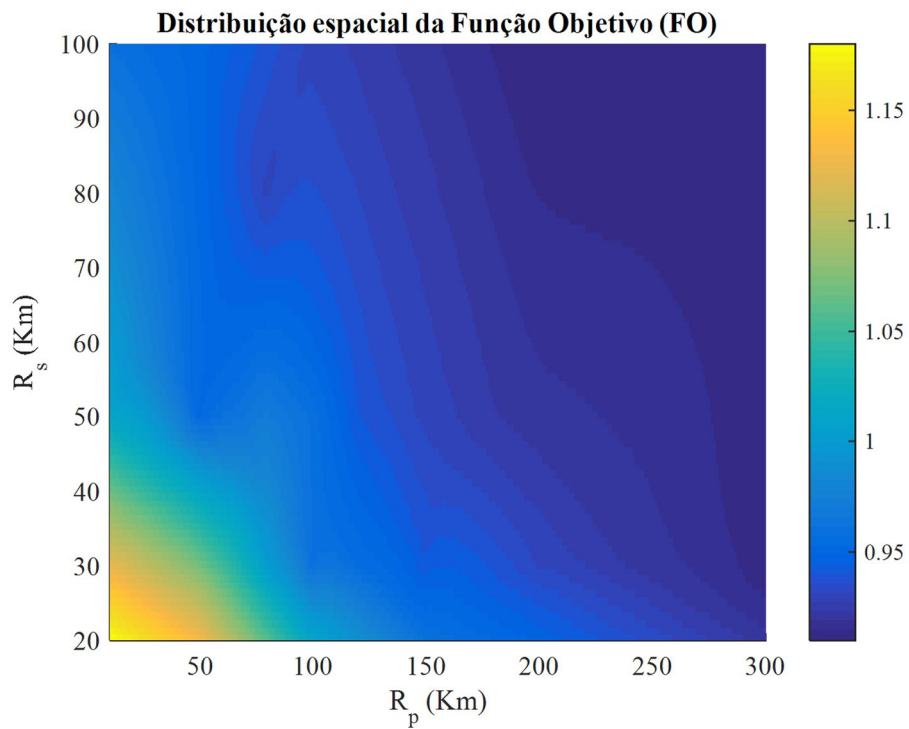


Figura 4.19 Superfície de valores da função objetivo do método de interpolação CHUVSAT para a região da bacia do rio Tocantins.

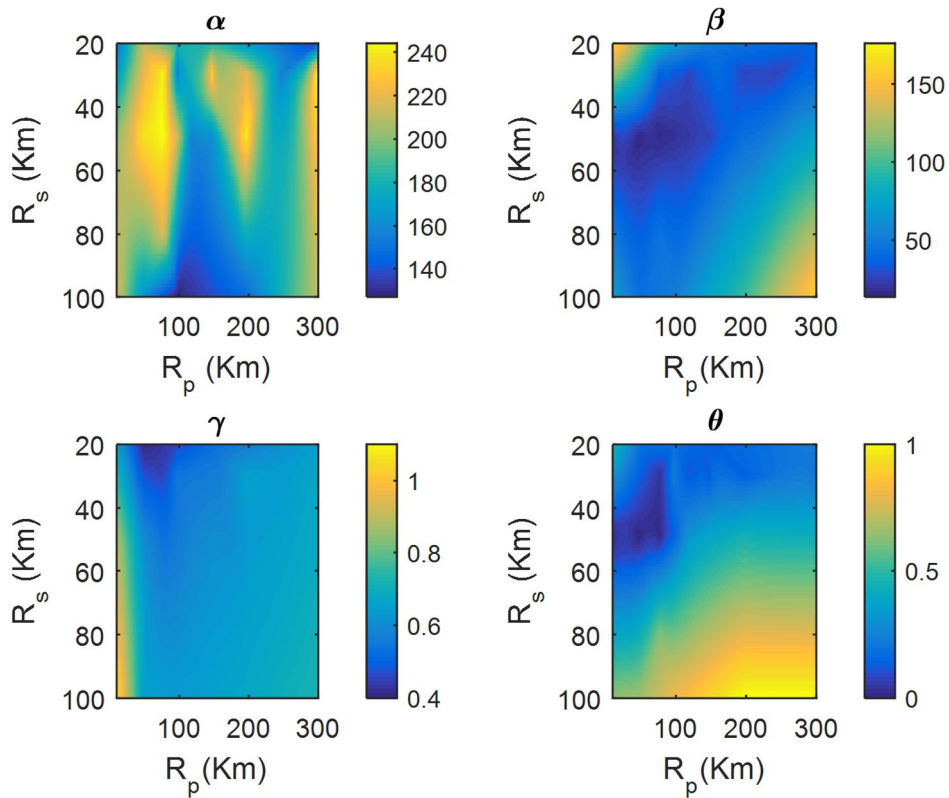


Figura 4.20 Superfície de valores dos parâmetros do método de interpolação CHUVSAT para a região da bacia do rio Tocantins.

Nesse sentido, a eleição dos raios de busca foi baseada nas sugestões feitas em outros trabalhos que utilizaram uma metodologia semelhante com aquela de CHUVSAT, onde se considera que a influência dos pluviômetros em um ponto qualquer de América do Sul é de aproximadamente 150 km (Vila *et al.* 2009) e 70 km (Rozante *et al.* 2010). Em tal sentido, escolheu-se arbitrariamente 80 km para o valor de R_{pluv} . O valor de R_s igual a 40 km foi selecionado para escolher pelo menos um valor nas oito direções no entorno da célula a interpolar. Então com esses dois raios de busca, os parâmetros do método de interpolação foram obtidos diretamente da Figura 4.20, onde os valores escolhidos foram $\alpha = 240$; $\beta = 24$; $\gamma = 0,50$ e $\theta = 0,03$.

Com o conjunto de parâmetros já definidos anteriormente, esses valores foram utilizados no modelo hidrológico distribuído MGB para uma primeira análise. Observou-se que as vazões simuladas com CHUVSAT apresentaram uma baixa correlação com as vazões observadas na região sudeste de bacia do rio Tocantins durante a cheia de 2012. Sendo assim, decidiu-se tentar melhorar os resultados (principalmente para atingir os valores de vazão máxima) alterando os valores de cada parâmetro isoladamente e de forma arbitrária por um procedimento de tentativa e erro. Após várias tentativas, percebeu-se que o parâmetro θ (parâmetro que influi nos valores da precipitação por satélite) apresentou especial sensibilidade na resposta. O incremento desse parâmetro deu maior peso aos valores pontuais de precipitação por pluviômetro. Finalmente, obtiveram-se os valores de $\alpha = 240$; $\beta = 24$; $\gamma = 0,50$ e $\theta = 2,0$ como valores ótimos dos parâmetros do método de interpolação CHUVSAT. É importante salientar que a metodologia adotada para obter os valores ótimos dos parâmetros funcionou bem para a presente bacia, porém maiores testes devem ser feitos para sua generalização, sendo que cada bacia pode apresentar certos comportamentos particulares.

Os campos de precipitação mostradas nas Figura 4.21, Figura 4.22, Figura 4.23, Figura 4.24 e Figura 4.25 representam eventos de precipitação, quatro no mês de janeiro de 2012 e um evento em janeiro de 2013 para as fontes de precipitação por TELEMETRIA, SATELITE, CHUVSAT e MERGEHQ. O campo de precipitação SATELITE corresponde à precipitação estimada por satélite 3B42RT1h. Para gerar o campo de precipitação por telemetria foi usado o método de interpolação do quadrado da distância calculado para cada centro da célula de $0,25^\circ$.

O campo de precipitação por TELEMETRIA mostrou eventos com maior extensão de área chuvosa comparada com os outros campos de precipitação dentro da bacia. O campo de precipitação por rede telemétrica mostrou diferenças com o campo de precipitação por SATELITE, essas diferenças são marcadas com quadro preto nas Figuras. Essas cenas mostram precipitações horárias maiores a favor de SATELITE, onde se detectou precipitações superiores na faixa de 30 mm – 50 mm, enquanto o campo por TELEMETRIA detectou menor quantidade de precipitação na faixa de 5 – 10 mm (vide Figura 4.21). O contrário também existe, eventos em que o campo por TELEMETRIA detectou e o de SATELITE não identificou (vide Figura 4.24)

As figuras que representam os campos de precipitação pelos métodos combinados (CHUVSAT e MERGEHQ) apresentam algumas características da chuva obtida pela rede telemétrica e estimada por satélite. No entanto, ligeiras diferenças são encontradas, por exemplo, na forma da área precipitável. Essas diferenças são basicamente porque quando a interpolação é feita por MERGEHQ o novo campo de precipitação é calculado em células distantes menores do que 70 km em torno do posto pluviométrico, enquanto que CHUVSAT interpola em todas as células. Observa-se essa diferença na Figura 4.22, que mostra uma área da bacia dentro do círculo azul, próxima à região chuvosa onde CHUVSAT calculou precipitação na faixa de 0,5 – 1 mm e MERGEHQ apresentou precipitação zero.

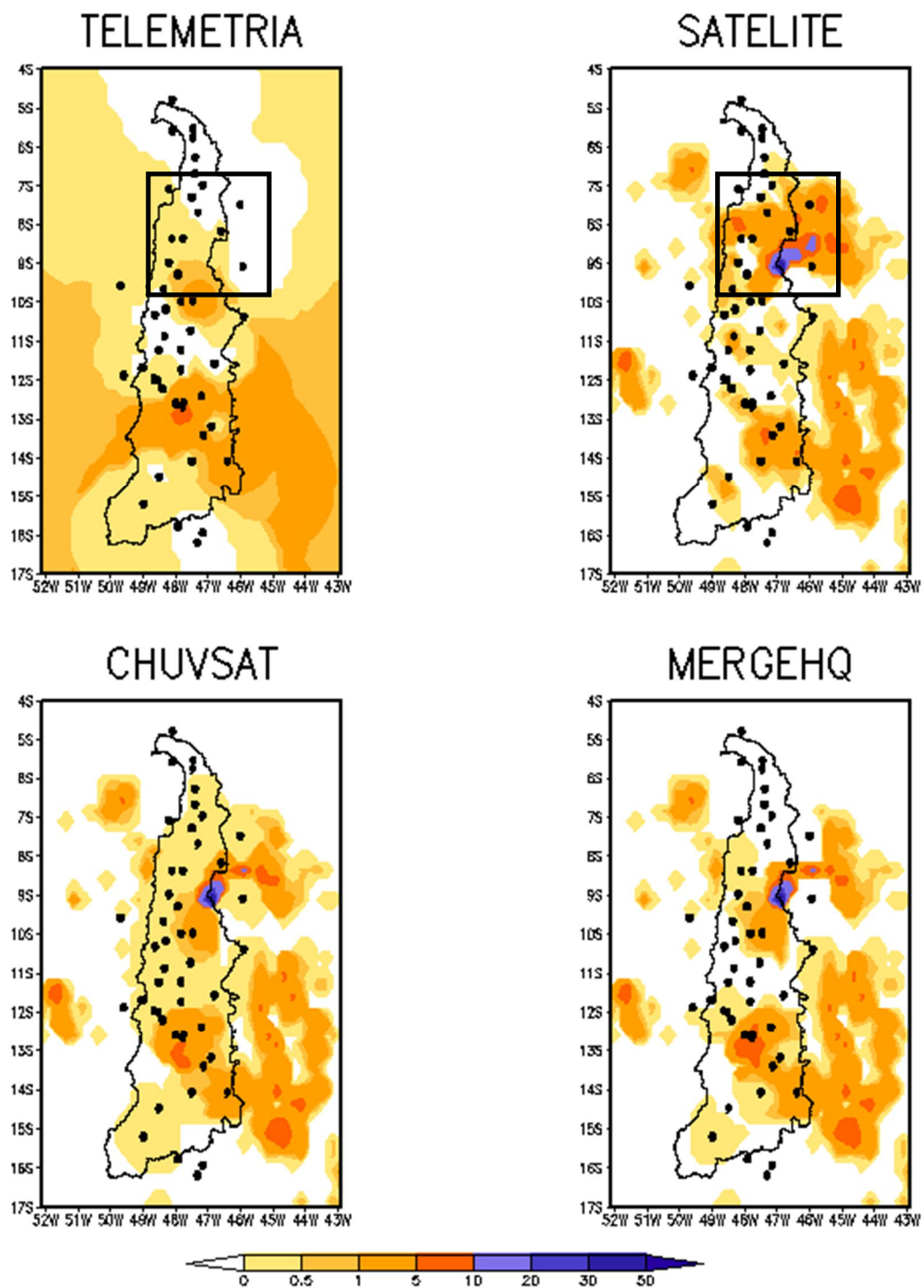


Figura 4.21 Campos de precipitação sobre a região do rio Tocantins para o dia 3/Janerio/2012 12:00 para a precipitação TELEMETRIA, 3B42RT1h (SATELITE), MERGEHQ e CHUVSAT.

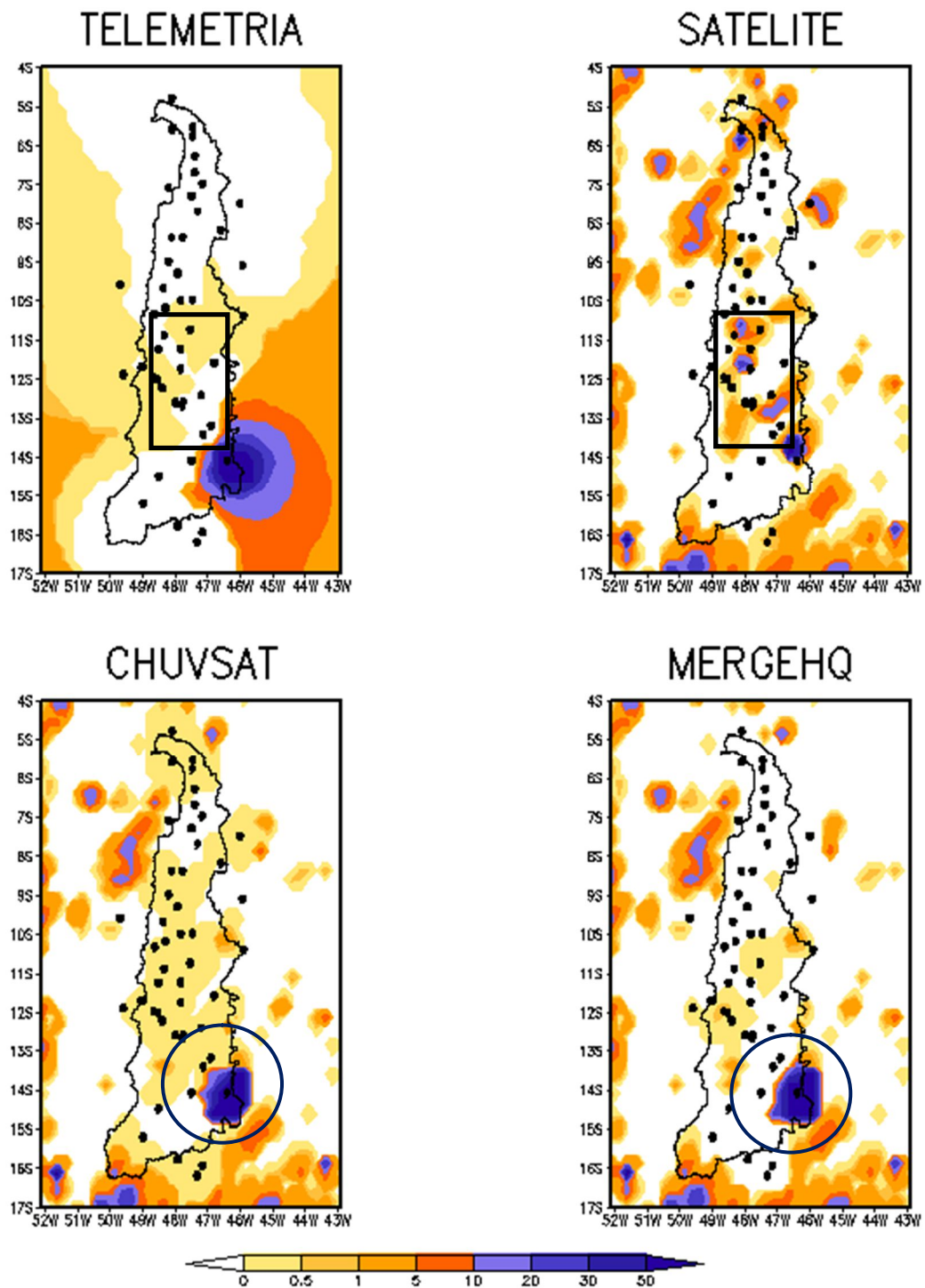


Figura 4.22 Campos de precipitação sobre a região do rio Tocantins para o dia 6/janeiro/2012 21:00 para a precipitação TELEMETRIA, 3B42RT1h (SATELITE), MERGEHQ e CHUVSAT.

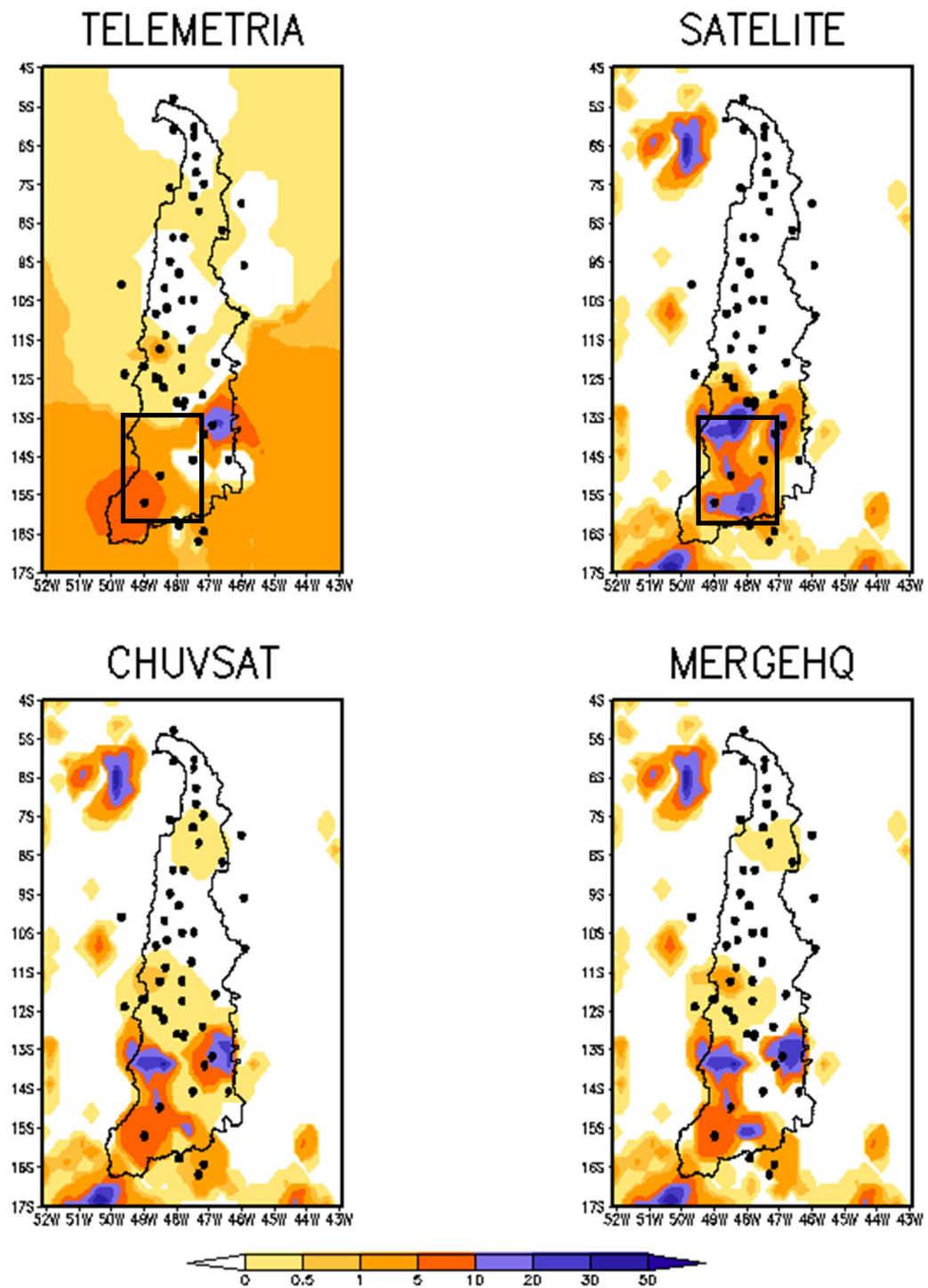


Figura 4.23 Campos de precipitação sobre a região do rio Tocantins para o dia 7/janeiro/2012 03:00 para a precipitação TELEMETRIA, 3B42RT1h (SATELITE), MERGEHQ e CHUVSAT.

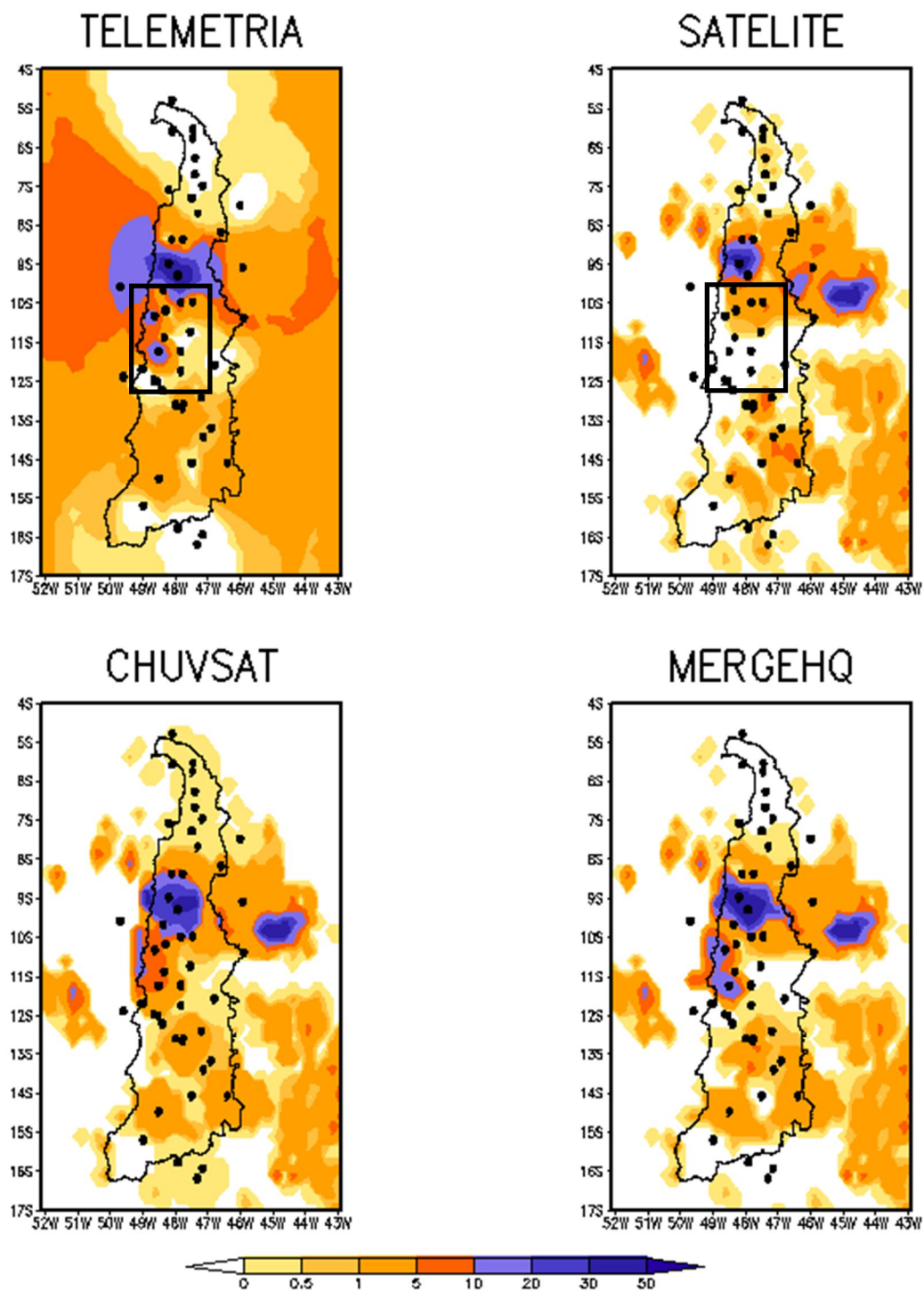


Figura 4.24 Campos de precipitação sobre a região do rio Tocantins para o dia 3/Janeiro/2012 15:00 para a precipitação TELEMETRIA, 3B42RT1h (SATELITE), MERGEHQ e CHUVSAT.

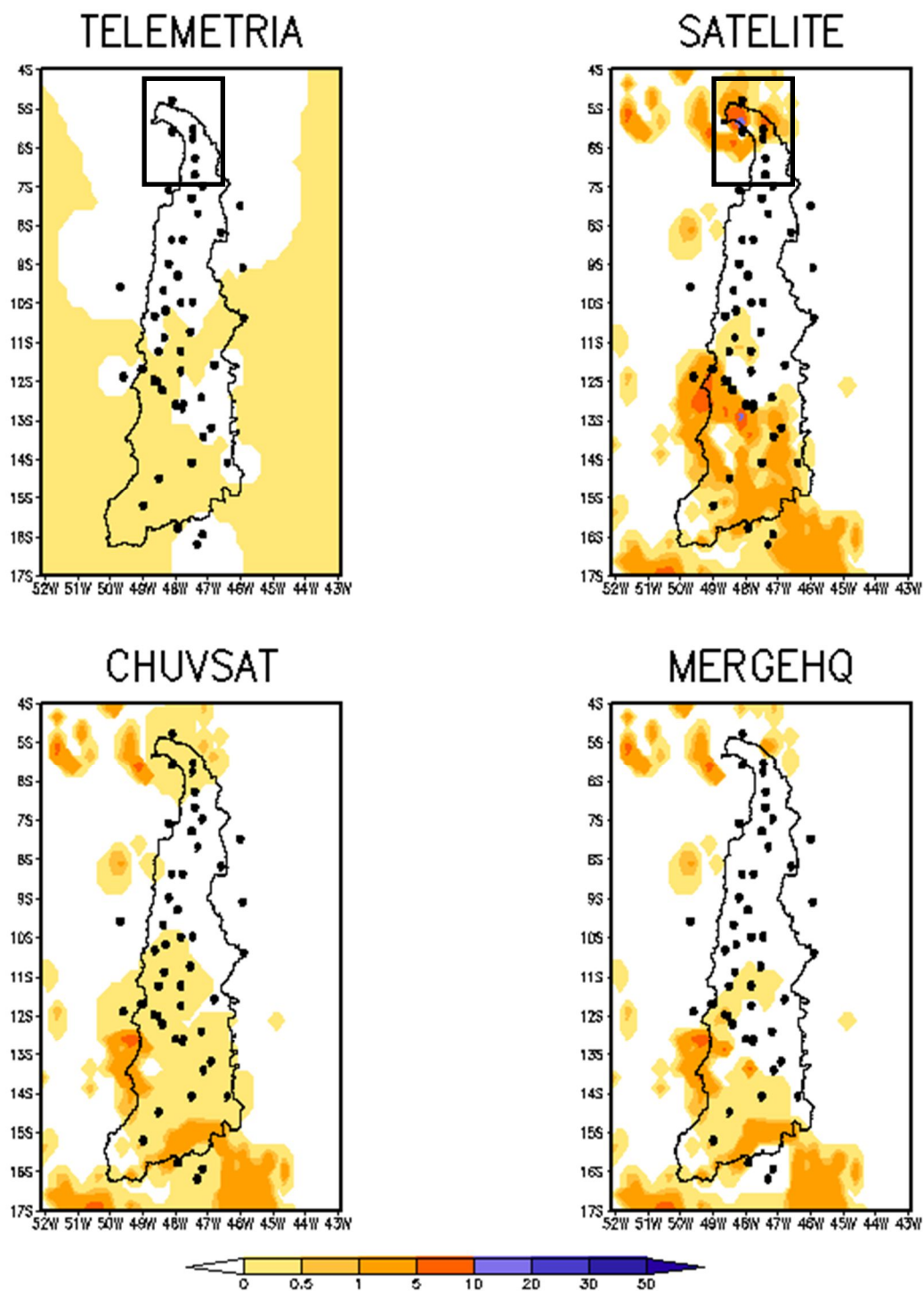


Figura 4.25 Campos de precipitação sobre a região do rio Tocantins para o dia 10/Janeiro/2013 04:00 para a precipitação TELEMETRIA, 3B42RT1h (SATELITE), MERGEHQ e CHUVSAT.

4.6.3 Análise dos campos de precipitação

Neste item, efetua-se uma análise da precipitação de todas as fontes em estudo: TELEMETRIA, CHUVSAT, MERGEHQ, 3B42RT1h, 3B41RT. A análise compreende precipitação média anual e mensal em cada pixel de 0,25° dentro da bacia do rio Tocantins calculada durante o período de tempo desde janeiro de 2008 até dezembro de 2013.

A Figura 4.26 representa a distribuição espacial da precipitação média anual derivada das cinco fontes de precipitação em estudo. Os campos de precipitação são semelhantes entre elas, observando-se que todos eles apresentam um gradiente aumentando desde a região sudeste para a porção noroeste. Em termos de valores absolutos, a região noroeste apresenta precipitação próxima aos 1800 mm, enquanto, na região sudeste a precipitação é de aproximadamente 1200 mm. Maiores precipitações são observadas para o produto de satélite 3B42RT1h, onde a precipitação máxima é de 2340 mm para a região norte da bacia. As mínimas precipitações são observadas para os campos de precipitação de satélite 3B41RT e de TELEMETRIA, ambas com precipitações mínimas de 849 mm e 1006 mm, respectivamente.

As isoietas obtidas da base de dados do Serviço Geológico do Brasil para o período de 1977 a 2006 (Pinto *et al.*, 2011) foram uma linha de base para fazer as intercomparações. As isoietas, que são obtidas a partir de estações instaladas na superfície terrestre, apresentam diferenças inclusive com TELEMETRIA. Realizando uma inspeção visual, as isolinhas são mais parecidas na região norte para CHUVSAT e 3B42RT1h, sobre a faixa de 1800 a 2000 mm.ano⁻¹ na região mais chuvosa na porção norte. Sabendo que as fontes combinadas são o resultado de integrar as fontes de precipitação por satélite e das estações telemétricas, observa-se um incremento na chuva média anual comparada à TELEMETRIA, em 7% para MERGEHQ e 12% para CHUVSAT.

A Figura 4.27 mostra a precipitação média mensal das cinco fontes de precipitação calculado para o período de janeiro/2008 – dezembro/2013. Todas as fontes de precipitação representam os períodos secos e úmidos, sendo que, nos períodos secos, todas as fontes de precipitação possuem maior concordância, existindo uma maior diferença nos meses úmidos. Para as estações Ponte Paranã e Farinha, as estimativas de precipitação 3B41RT apresenta maior subestimação, sobretudo nos meses de janeiro até abril. Já para as estações Estreito e

Peixe Angical, a precipitação média mensal de todas as fontes mostram-se semelhantes em todos os meses.

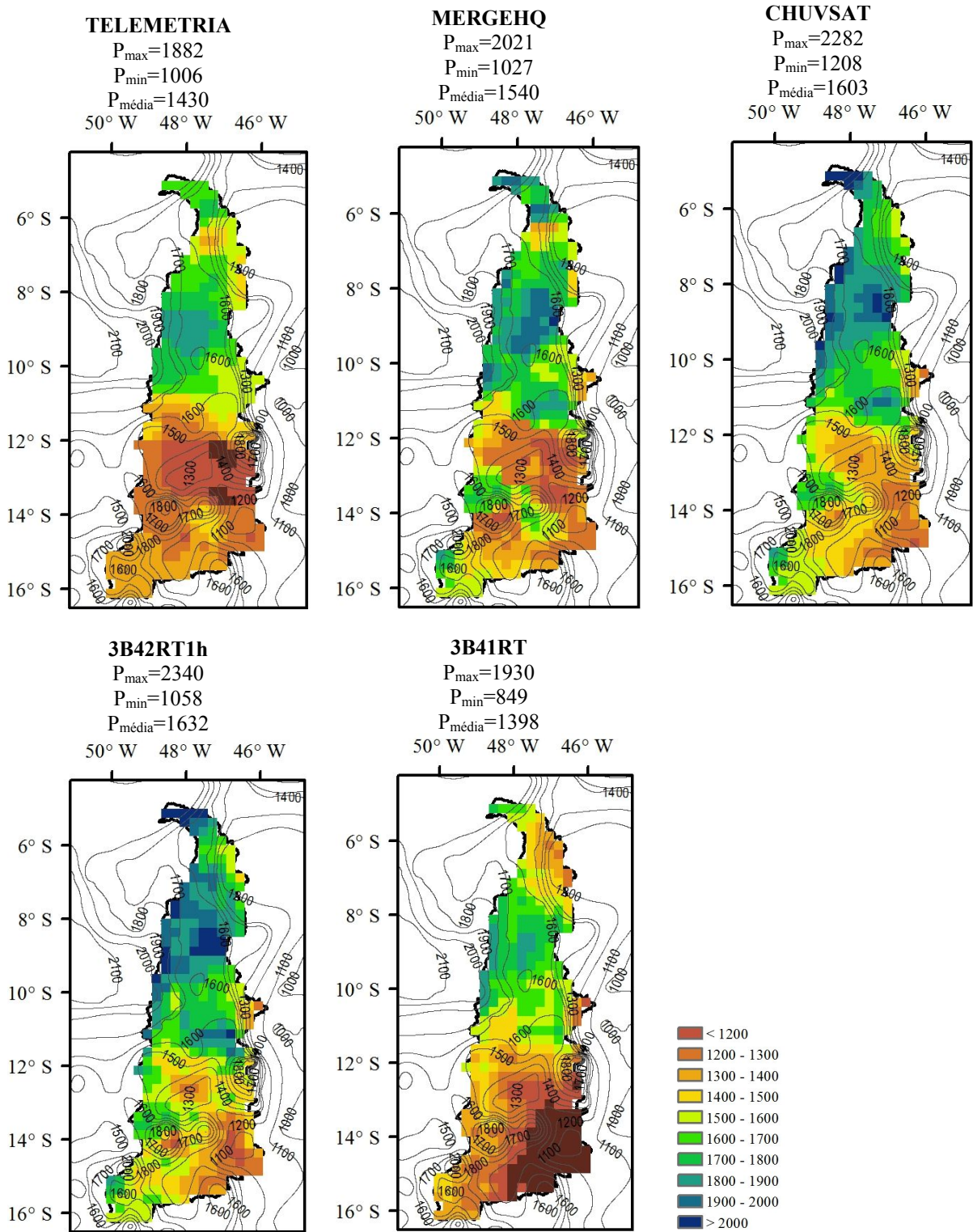


Figura 4.26 Distribuição espacial da precipitação média anual para o período de 2008-2013 derivado das quatro fontes de precipitação considerada para a intercomparação (TELEMETRIA, MERGEHQ, CHUVSAT, 3B42RT1h e 3B41RT). P_{\max} , P_{\min} e $P_{\text{média}}$ representa a precipitação média anual máxima, mínima e média, respectivamente sobre a bacia do rio Tocantins.

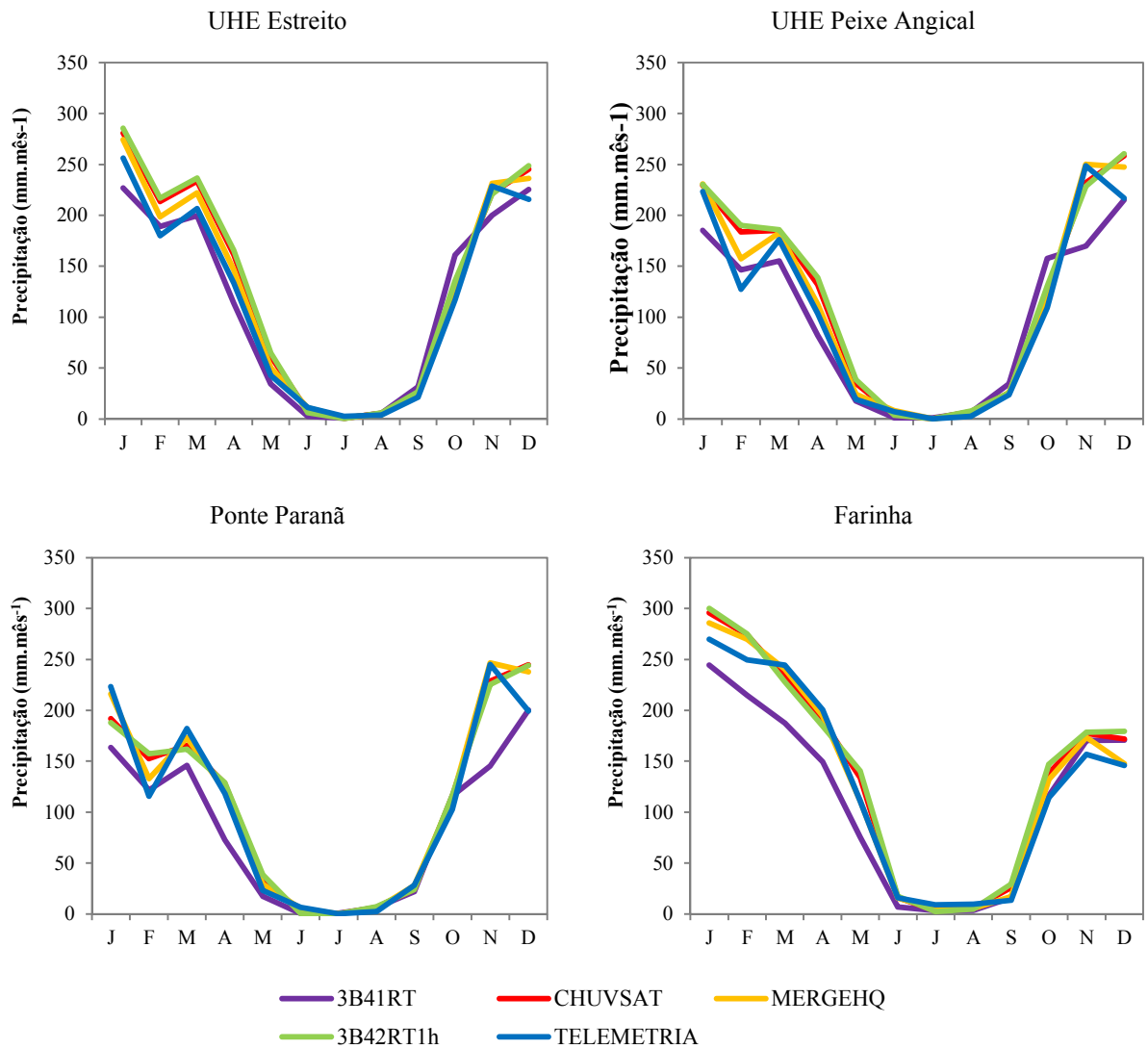


Figura 4.27 Precipitação média mensal calculado para o período de janeiro/2008 – dezembro/2013 para as sub-bacias UHE Estreito, UHE Peixe Angical, Ponte Paranã e Farinha usando cinco fontes de precipitação TELEMETRIA, CHUVSAT, MERGEHQ, 3B42RT1h e 3B41RT.

4.6.4 Resultados da simulação hidrológica horária

A simulação hidrológica no passo de tempo horário foi feita para todas as estações fluviométricas e locais com usinas hidrelétricas usando como dados de entrada ao modelo a precipitação observada por telemetria (TELEMETRIA), estimada por satélite 3B42RT1h e 3B41RT e duas fontes de precipitação combinada MERGEHQ e CHUVSAT. Primeiramente, realizou-se um processo de calibração manual de parâmetros do modelo para cada fonte de precipitação e para cada estação e local com usina durante o período de janeiro/2008 - junho/2012. Em seguida, esses parâmetros do modelo foram verificados para o período de julho/2012 – junho/2013.

Os parâmetros do modelo hidrológico foram alterados seguindo a técnica de tentativa e erro, observando-se tanto os hidrogramas calculados e observados assim como os valores das medidas de desempenho com o fim de garantir um ajuste entre a vazão observada e calculada na saída do ponto de controle. Para o procedimento da calibração do modelo hidrológico, vários parâmetros, especialmente aqueles relacionados com as propriedades no solo, que controlam a infiltração e armazenamentos nos reservatórios, que controlam a umidade no solo, foram os mais sensíveis. Para o bloco (ou unidade de resposta hidrológica) que corresponde à vegetação de baixo porte com solo profundo obteve-se maior porcentagem de área total. Esse bloco apresentou uma amplitude de valores entre 180 – 500 mm na estação São Salvador analisando-se as cinco fontes de precipitação. O valor desse parâmetro foi incrementado em relação à área de drenagem, onde, na Estação Estreito, apresentou uma faixa de valores de 800 – 980.

Os resultados em três medidas de desempenho, Nash-Sutcliffe (NS), Nash-Sutcliffe para logaritmos (NSlog) e erro relativo de volume (dV) são apresentados na Tabela 4.7 para as estações fluviométricas na Tabela 4.8 para os locais com usinas. Os valores das medidas de desempenho, para as estações com postos fluviométricos, mostraram, em média, que a precipitação combinada (MERGEHQ e CHUVSAT) forçada ao modelo tiveram ótimo desempenho estatístico. O NS para MERGEHQ e CHUVSAT foi de 0,55 e 0,53, respectivamente; NSlog é de 0,54 e 0,52, e o valor médio de dV é de +0,16% e -4,85%, respectivamente. Quando se usou precipitação por telemetria no modelo, a média de NS foi de 0,36. Para precipitação por satélite com 3B42RT1h e 3B41RT foi de 0,26 e -0,57, respectivamente. Esses últimos valores indicaram baixo desempenho em termos estatísticos.

Já para os locais com usinas, a média das medidas de desempenho mostrou maior vantagem quando a precipitação combinada (MERGEHQ e CHUVSAT) foi forçada ao modelo hidrológico. O NS para MERGEHQ e CHUVSAT foi de 0,83 e 0,80; NSlog é de 0,91 e 0,89, e o valor médio de dV foi de -3,18% e -4,78%, respectivamente. Quando se usou telemetria no modelo, a média de NS foi de 0,35, enquanto, para precipitação por satélite com 3B42RT1h e 3B41RT, foi de 0,66 e 0,50, respectivamente. Destacam-se os resultados nos locais de Serra da Mesa, cana Brava e São Salvador. A calibração dos parâmetros nesses locais mostrou que as medidas em desempenho NS não foram ótimas, sendo que NS apresentou valores não maiores do que 0,15 quando a precipitação por Telemetria foi forçada ao modelo hidrológico. Uma razão do baixo desempenho é devido a poucas estações telemétricas registradas nesse local. Nesse sentido, as fontes de precipitação por satélite se apresentaram-se como uma melhor opção na simulação nesses locais. As três medidas estatísticas para 3B42RT1h mostraram-se ótimas superando o valor de 0,60 e o erro relativo das vazões ficaram menores do que $\pm 10\%$, quanto que, para 3B41RT, ficaram no entorno do valor de 0,45 de NS. No caso de Estreito, os valores de desempenho ficaram semelhantes entre as fontes de precipitação combinada e observada por telemetria, dando uma ligeira vantagem para CHUVSAT. O valor de NS ficou superior a 0,85, e o dV ficou menor a $\pm 10\%$.

A Figura 4.28 mostra os coeficientes de Nash-Sutcliffe e erro relativo de volume em função da área de drenagem para todas as estações fluviométricas e locais com usinas para o período de calibração. Os resultados mostram que as duas fontes precipitação combinadas (MERGEHQ e CHUVSAT) possuem melhor desempenho em NS para áreas de drenagem superior aos 30.000 km² sendo que CHUVSAT comportou-se ligeiramente superior em algumas estações. Por outro lado, os que ficaram com pior desempenho são as fontes de precipitação por satélite 3B41RT e TELEMETRIA. O erro relativo de volume com CHUVSAT ficou próximo ao valor zero. As outras fontes de precipitação incluindo MERGEHQ concentraram seus valores fora da faixa de valores $\pm 10\%$.

Os resultados antes mencionados confirmam que a precipitação combinada acrescentou o desempenho estatístico nas três medidas estatísticas para todas as estações estudadas da bacia do rio Tocantins. Os resultados também mostram que a precipitação por satélite de 3B42RT1h pode substituir a precipitação observada quando não existe estações telemétricas. Essa substituição tem maior vantagem em locais sobre a rede de drenagem principal nos locais de Serra da Mesa, Cana Brava e São Salvador.

Tabela 4.7 Valores estatísticos em postos fluviométricos durante a calibração para o período de Janeiro/2008 - Junho/2012.

Região	Área (10 ³ km ²)	CHUVSAT			TELEMETRIA			MERGEHQ			3B42RT1h			3B41RT		
		NS	NSlog	dV	NS	NSlog	dV	NS	NSlog	dV	NS	NSlog	dV	NS	NSlog	dV
Itacaja	2.8	0.48	0.47	-0.27	0.26	0.12	15.52	0.33	0.25	6.26	0.38	0.42	12.15	-0.05	0.02	12.02
Farinha	5.3	0.12	-0.13	-11.89	-0.21	-0.94	-24.43	-0.25	-0.34	-5.30	0.44	0.54	8.23	0.38	0.29	-3.77
Goiatins	10.1	0.09	0.04	-12.54	0.01	-0.07	-16.98	0.06	-0.03	-12.74	0.07	0.27	3.25	-0.05	-0.22	-9.59
Rio das balsas	12.2	-0.94	-0.47	-0.36	-2.75	-1.18	6.33	-2.12	-0.89	7.67	-0.43	-0.35	9.38	-2.92	-4.93	-22.91
Rio da Palma	13.0	0.32	0.51	-9.38	0.25	0.28	-17.82	0.35	0.52	-8.48	-0.15	0.31	-6.40	0.21	0.46	-16.43
Jatoba	17.2	0.18	-0.01	-13.41	-0.48	-0.46	5.98	0.25	0.08	-7.49	-0.07	0.03	5.28	-3.00	-4.44	-8.12
Fazenda Areia	18.1	0.73	0.66	-5.50	0.72	0.47	-7.39	0.73	0.64	-3.90	0.24	0.44	5.62	0.17	0.38	-4.48
Ponte Parana	30.1	0.77	0.84	3.51	0.66	0.76	-1.46	0.75	0.83	8.72	0.63	0.84	5.13	0.48	0.59	-18.5
Fazenda Santana	40.7	0.73	0.83	9.61	0.64	0.78	9.30	0.68	0.79	18.31	0.59	0.79	15.78	0.44	0.6	-12.64
Porto Real	44.3	0.42	0.26	-13.92	0.39	0.35	-0.58	0.53	0.40	-6.23	0.29	0.22	0.17	-1.71	-2.44	-8.66
	Mínimo	0.18	-0.01	-13.92	-0.48	-0.46	-17.82	0.25	0.08	-8.48	-0.15	0.03	-6.40	-3.00	-4.44	-18.50
	Médio	0.53	0.52	-4.85	0.36	0.36	-2.00	0.55	0.54	0.16	0.26	0.44	4.26	-0.57	-0.81	-11.47
	Máximo	0.77	0.84	9.61	0.72	0.78	9.30	0.75	0.83	18.31	0.63	0.84	15.78	0.48	0.60	-4.48

Tabela 4.8 Valores estatísticos em locais com usinas durante a calibração para o período de Janeiro/2008 - Junho/2012.

Região	Área (10 ³ km ²)	CHUVSAT			TELEMETRIA			MERGEHQ			3B42RT1h			3B41RT		
		NS	NSlog	dV	NS	NSlog	dV	NS	NSlog	dV	NS	NSlog	dV	NS	NSlog	dV
Serra Mesa	52	0.70	0.82	-9.03	-0.10	0.45	-5.52	0.78	0.86	-8.73	0.60	0.82	-7.64	0.44	0.78	-8.93
Cana Brava	59	0.74	0.83	-9.37	0.04	0.50	-8.51	0.80	0.88	-8.45	0.63	0.84	-6.56	0.45	0.78	-10.17
São Salvador	64	0.76	0.85	-9.81	0.15	0.51	-12.73	0.81	0.88	-9.64	0.63	0.85	-5.66	0.45	0.78	-10.35
Peixe Angical	127	0.83	0.93	-4.08	0.50	0.82	-6.81	0.84	0.93	-1.56	0.71	0.87	4.77	0.55	0.84	-7.63
Lajeado	186	0.88	0.96	-1.08	0.64	0.83	-14.34	0.87	0.95	1.85	0.65	0.89	8.63	0.58	0.84	-12.25
Estreito	289	0.90	0.94	4.72	0.85	0.92	-3.07	0.89	0.93	7.45	0.73	0.88	9.31	0.50	0.73	2.02
	Mínimo	0.70	0.82	-9.81	-0.10	0.45	-14.34	0.78	0.86	-9.64	0.60	0.82	-7.64	0.44	0.73	-12.25
	Médio	0.80	0.89	-4.78	0.35	0.67	-8.50	0.83	0.91	-3.18	0.66	0.86	0.48	0.50	0.79	-7.89
	Máximo	0.90	0.96	4.72	0.85	0.92	-3.07	0.89	0.95	7.45	0.73	0.89	9.31	0.58	0.84	2.02

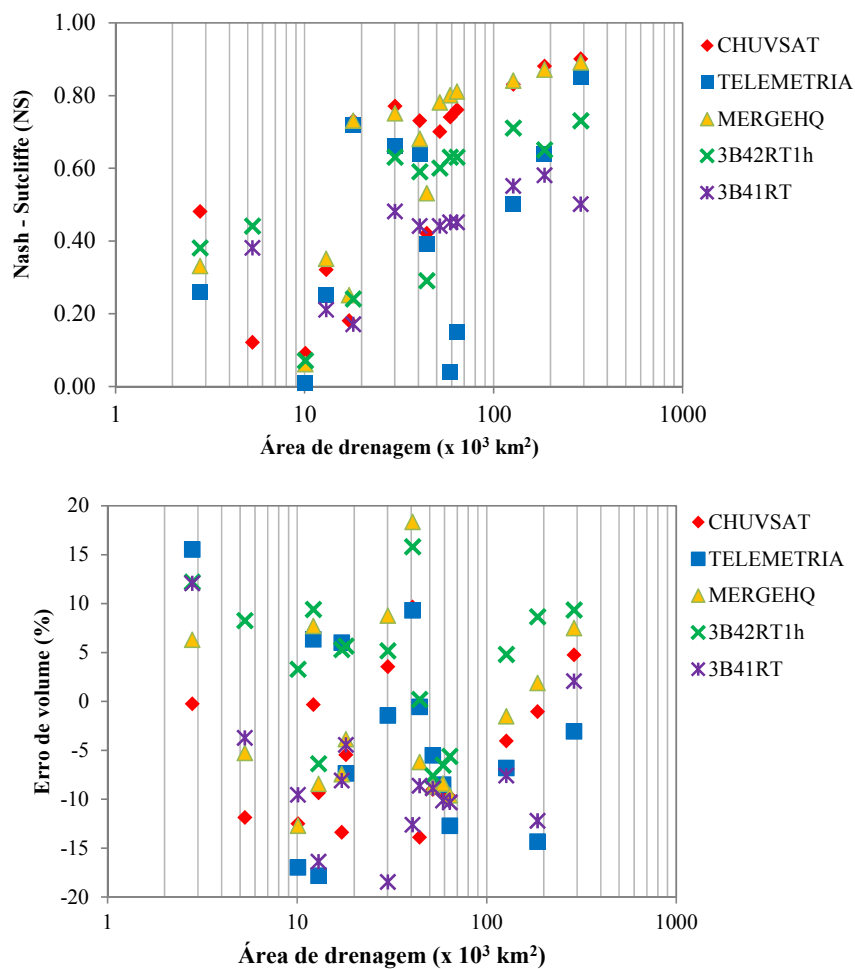


Figura 4.28 Coeficientes estatísticos de Nash-Sutcliffe e erro relativo de vazão em função da área de drenagem sobre a bacia do rio Tocantins durante o período de calibração dos parâmetros do modelo hidrológico.

A Figura 4.29 mostra os histogramas para as três medidas de desempenho estatístico classificadas para cinco faixas de áreas de drenagem em unidades de 10^3 km^2 ($A < 10$; $10 < A < 20$; $20 < A < 50$; $50 < A < 100$ e $A > 100$). Os resultados das medidas de desempenho estatístico mostraram que, para todos os casos de precipitação, os valores de NS e NSlog forem incrementando em função da maior área de drenagem e que o dV ficou dentro da faixa de valores $\pm 10,0$ (com exceção de algumas estações com 3B41RT). Em média, ressalta os valores da eficiência de NS superior a 0,60 com áreas de drenagem maiores do que 20.000 km^2 para as fontes de precipitação combinada (MERGEHQ e CHUVSAT). Para quando se usou TELEMETRIA no modelo a média de NS para estações com área de drenagem maior do que 100.000 km^2 foram superiores a 0,60. Quando se usou 3B42RT1h a média de NS para estações com área de drenagem maior a 50.000 km^2 foi superior a 0,60. A média NS quando se usou 3B41RT mostrou-se inferior para todas as faixas de áreas de drenagem analisadas.

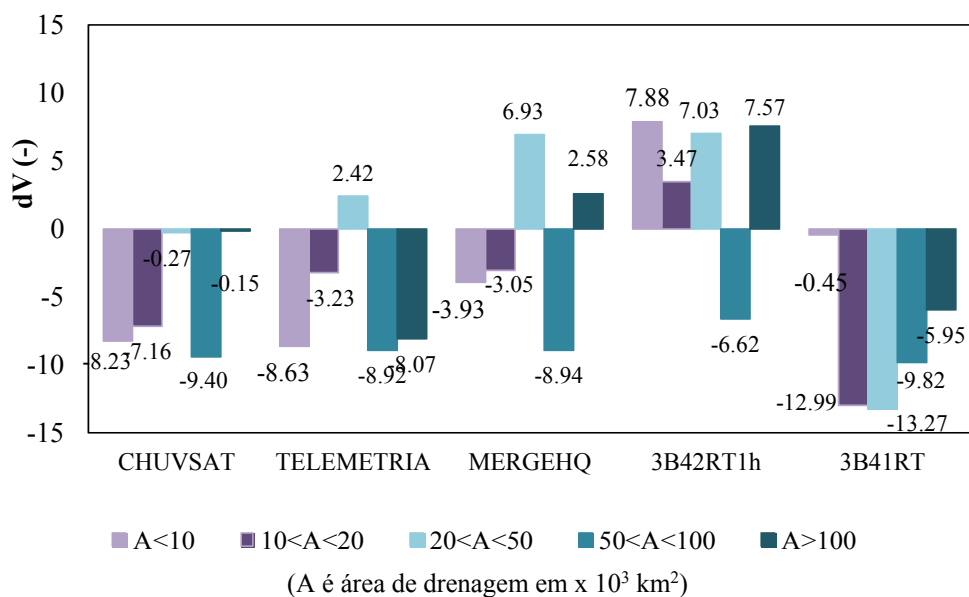
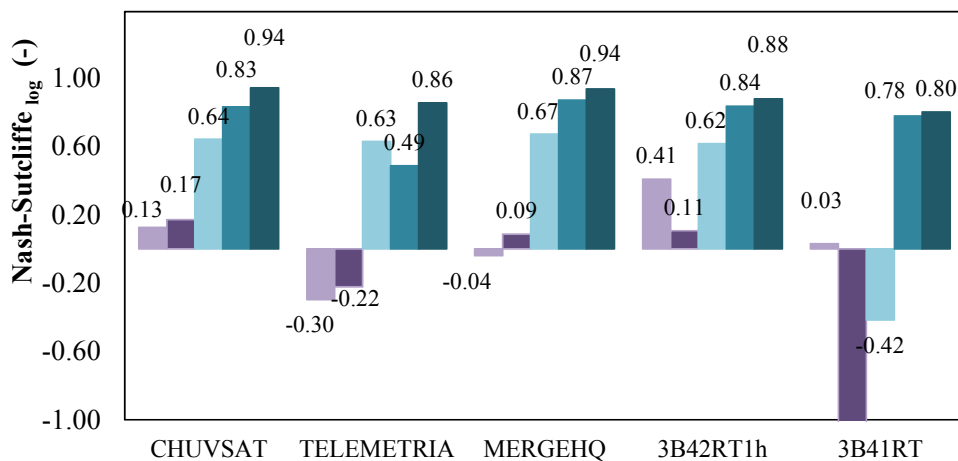
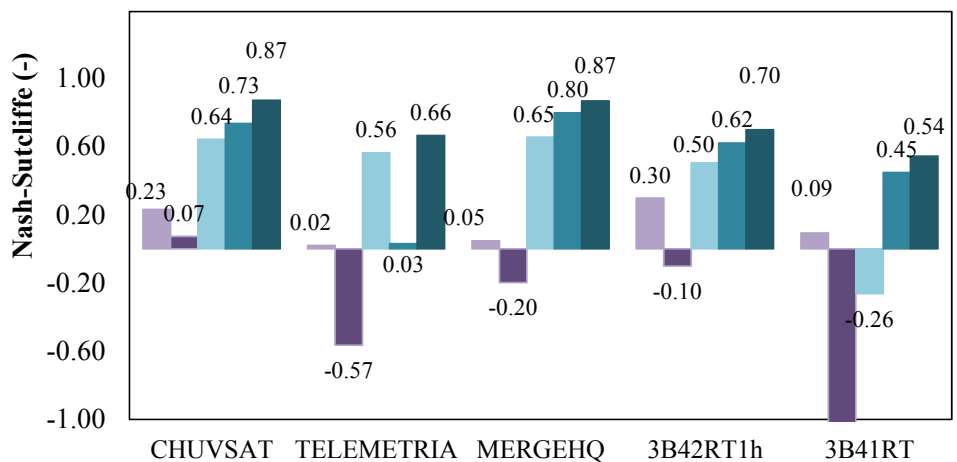


Figura 4.29 Coeficiente estatísticos médios de Nash - Sutcliffe, Nash-Sutcliffe para logaritmos e erro relativo de volume durante a etapa de calibração classificado por área de drenagem sobre a bacia do rio Tocantins.

Com o fim de antecipar os resultados na etapa da previsão hidrológica, realizou-se uma etapa de verificação dos parâmetros calibrados do modelo hidrológico para o período compreendido entre julho/2012 e junho/2013. Os resultados das três medidas de desempenho, Nash-Sutcliffe (NS), Nash-Sutcliffe para logaritmos (NSlog) e erro relativo de volume (dV) são apresentados na Tabela 4.9 para as estações fluviométricas e na Tabela 4.10 para os locais com usinas.

Para as estações com postos fluviométricos, a média de NS para as fontes de chuva combinada (MERGEHQ e CHUVSAT) mostrou-se com melhor desempenho comparado com as outras fontes de precipitação quando foram forçadas ao modelo. Observando o valor médio de NS para todas as estações fluviométrica, a precipitação combinada mostrou valores de 0,54 e 0,34 para CHUVSAT e MERGEHQ, respectivamente. Várias estações, sobretudo as localizadas na região sudeste ficaram com melhor desempenho estatístico nesse período de verificação comparado com o período de calibração. Por exemplo, a estação Ponte Paranã teve o valor de NS para Telemetria de 0,66 durante a calibração e 0,71 durante a verificação. Por outro lado, observa-se um baixo desempenho quando o modelo foi forçado com precipitação por satélite, 3B41RT, teve um baixo ajuste indicado por Nash-Sutcliffe e maior erro relativo de volume, apresentando índices inferiores a 0,60 e fora da faixa de $\pm 10\%$, respectivamente.

Para o caso dos locais com usinas, o desempenho refletido nos testes estatísticos NS e NSlog mostrou-se bem aceitável para todos os casos de precipitação quando foram forçados ao modelo, com exceção de telemetria nos locais de Serra da Mesa, Cana Brava, São Salvador e Peixe Angical. Nesses últimos locais, o modelo com telemetria ficou com um baixo desempenho até a bacia Peixe Angical. O fraco ajuste nas vazões refletiu-se no erro relativo de volume que se mostrou superior a faixa de valores de $\pm 10\%$. Para o local de Estreito, observa-se um melhor ajuste em termos estatísticos para todos os casos de precipitação, salvo exceção de 3B42RT1h, que mostrou um valor de -14% no dV. A Figura 4.30 mostra os coeficientes estatísticos de Nash-Sutcliffe e o erro relativo de volume em função da área de drenagem para o período de verificação. Os resultados mostram que CHUVSAT possui melhor desempenho em NS para áreas de drenagem superior aos 40.000 km². A mesma Figura mostra também que o erro relativo de volume ficou fora da faixa de $\pm 10\%$ na maioria dos locais de controle.

Tabela 4.9 Valores estatísticos em postos fluviométricos durante a verificação para o período de Julho/2012 - Junho/2013.

Região	Área (10 ³ km ²)	CHUVSAT			TELEMETRIA			MERGEHQ			3B42RT1h			3B41RT		
		NS	NSlog	dV	NS	NSlog	dV	NS	NSlog	dV	NS	NSlog	dV	NS	NSlog	dV
Itacaja	2.8	0.57	0.71	16.05	0.40	0.52	18.48	0.51	0.65	15.73	-0.06	0.55	48.32	0.24	0.35	33.44
Farinha	5.3	0.43	0.39	1.60	0.03	0.21	18.66	-0.50	0.07	37.71	0.33	0.43	-24.75	0.27	0.34	-23.37
Goiatins	10.1	0.73	0.73	-0.05	0.76	0.77	0.13	0.73	0.74	-1.14	0.52	0.56	21.24	0.46	0.67	15.61
Rio das balsas	12.2	0.63	0.53	-9.28	0.73	0.61	-2.57	0.68	0.53	-2.93	0.54	0.52	20.12	0.19	0.10	-23.67
Rio da Palma	13	0.35	0.65	-30.52	0.20	0.60	-22.40	0.35	0.65	-28.05	0.46	0.61	-20.46	0.33	0.60	-31.45
Jatoba	17.2	0.15	0.40	18.71	-0.96	-0.21	36.66	-0.39	0.15	24.73	-1.74	-0.30	26.57	-4.44	-7.37	-10.23
Fazenda Areia	18.1	0.29	0.19	-6.01	-0.88	-0.19	5.00	-0.14	0.09	5.41	0.04	0.16	7.62	0.48	0.48	-8.17
Ponte Parana	30.1	0.78	0.89	3.73	0.71	0.85	8.70	0.76	0.89	8.81	0.83	0.91	0.96	0.66	0.67	-12.61
Fazenda Santana	40.7	0.77	0.84	3.84	0.70	0.77	10.62	0.72	0.83	12.86	0.72	0.87	6.10	0.79	0.66	-6.64
Porto Real	44.3	0.87	0.81	5.17	0.58	0.76	22.60	0.75	0.75	15.77	-0.40	0.56	39.35	-0.95	0.10	19.01
Mínimo		0.15	0.19	-30.52	-0.96	-0.21	-22.40	-0.39	0.09	-28.05	-1.74	-0.30	-20.46	-4.44	-7.37	-31.45
Médio		0.54	0.63	-0.85	0.06	0.43	10.20	0.34	0.56	6.59	-0.02	0.47	10.02	-0.52	-0.81	-8.35
Máximo		0.87	0.89	18.71	0.71	0.85	36.66	0.76	0.89	24.73	0.83	0.91	39.35	0.79	0.67	19.01

Tabela 4.10 Valores estatísticos em locais com usinas durante a verificação para o período de Julho/2012 - Junho/2013.

Região	Área (10 ³ km ²)	CHUVSAT			TELEMETRIA			MERGEHQ			3B42RT1h			3B41RT		
		NS	NSlog	dV	NS	NSlog	dV	NS	NSlog	dV	NS	NSlog	dV	NS	NSlog	dV
Serra Mesa	52	0.55	0.69	16.61	-0.61	-0.09	29.12	0.64	0.72	14.19	0.62	0.76	10.10	0.62	0.70	24.56
Cana Brava	59	0.65	0.75	13.52	-0.31	0.11	24.54	0.70	0.77	12.01	0.67	0.79	8.38	0.68	0.74	22.03
São Salvador	64	0.68	0.77	13.95	-0.07	0.23	20.21	0.74	0.80	11.35	0.70	0.81	8.36	0.71	0.76	21.12
Peixe Angical	127	0.87	0.93	16.72	0.32	0.83	25.05	0.80	0.89	19.99	0.77	0.82	16.70	0.83	0.83	18.46
Lajeado	186	0.91	0.96	12.22	0.70	0.90	13.13	0.83	0.93	18.31	0.70	0.85	22.75	0.88	0.89	11.89
Estreito	289	0.92	0.95	1.87	0.88	0.94	-3.31	0.89	0.92	8.22	0.75	0.82	14.35	0.69	0.89	-0.84
Mínimo		0.55	0.69	1.87	-0.61	-0.09	-3.31	0.64	0.72	8.22	0.62	0.76	8.36	0.62	0.70	-0.84
Médio		0.76	0.84	12.48	0.15	0.49	18.12	0.77	0.84	14.01	0.70	0.81	13.44	0.74	0.80	16.20
Máximo		0.92	0.96	16.72	0.88	0.94	29.12	0.89	0.93	19.99	0.77	0.85	22.75	0.88	0.89	24.56

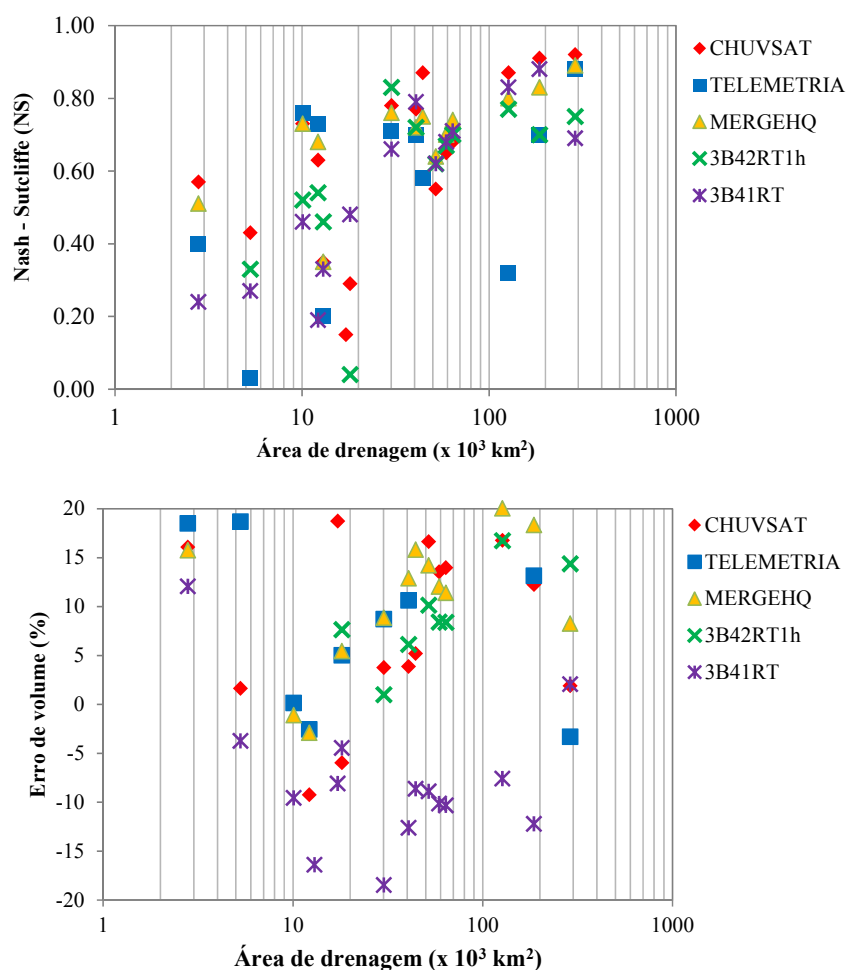


Figura 4.30 Coeficientes estatísticos de Nash-Sutcliffe e Erro de volume em função da área de drenagem sobre a bacia do rio Tocantins durante o período de verificação dos parâmetros do modelo hidrológico.

A Figura 4.31 mostra os histogramas para as três medidas de desempenho estatístico classificadas em cinco faixas de áreas de drenagem em unidades de 10^3 km^2 ($A < 10$; $10 < A < 20$; $20 < A < 50$; $50 < A < 100$ e $A > 100$). Para as fontes de precipitação combinada, elas mostram valores de eficiência média NS superiores a 0,60 para áreas de drenagem superiores a 20.000 km^2 , enquanto que, para TELEMETRIA, apresenta valores de eficiência inferiores ao valor de 0,66 para todas as faixas de área. Entre as duas fontes de precipitação por satélite, o 3B41RT apresentou valores inferiores de eficiência NS. No entanto, a eficiência de Nash-Sutcliffe para logaritmos mostrou-se com valores aceitáveis para áreas de drenagem superiores a 20.000 km^2 . Os valores do erro relativo no volume mostraram-se positiva para todos os casos de precipitação. Apenas CHUVSAT apresentou erros aceitáveis, para áreas de drenagem menores do que 50.000 km^2 , enquanto que o resto das fontes de precipitação ficou com dV fora do limite aceitável, atingindo +25% para TELEMETRIA e -18% para 3B41RT.

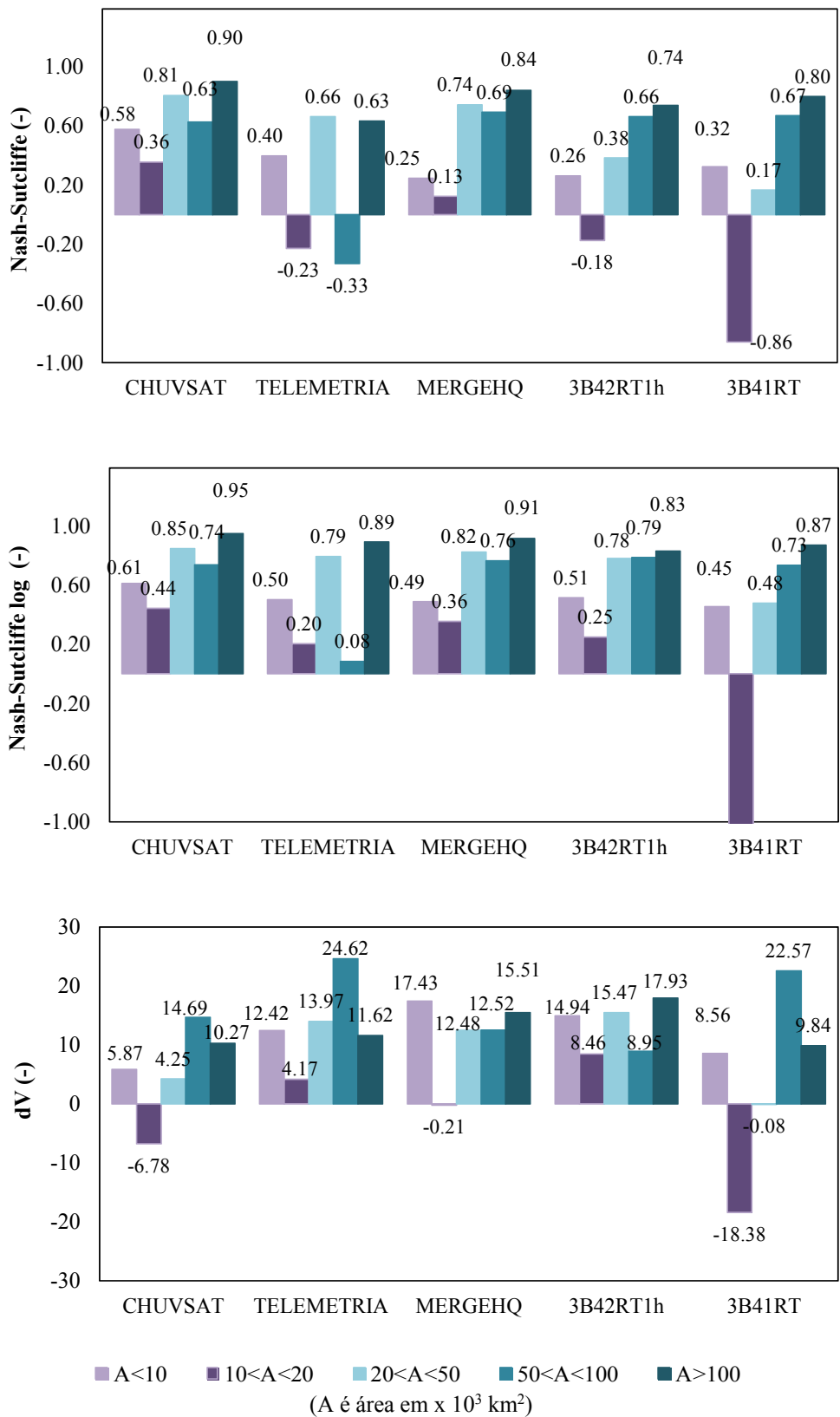


Figura 4.31 Coeficientes estatísticos médios de Nash - Sutcliffe, Nash-Sutcliffe para logaritmos e erro relativo no volume durante a etapa de verificação classificado por área de drenagem em postos fluviométricos sobre a bacia do rio Tocantins.

A análise na etapa de simulação hidrológica também incluiu uma revisão visual dos hidrogramas simulados, considerando todas as fontes de precipitação: TELEMETRIA, MERGEHQ, CHUVSAT e as fontes de precipitação por satélite 3B42RT1h e 3B41RT. Os hidrogramas mostrados na Figura 4.32 até a Figura 4.37 representam os resultados no período de simulação e verificação para seis estações fluviométricas mais representativas da bacia do rio Tocantins.

As Figuras mostram que as fontes de precipitação analisadas forçadas ao modelo hidrológico distribuído MGB-IPH conseguiram representar adequadamente os processos de cheias e estiagem, porém, existindo diferenças de subestimação em vazões picos com cheia e superestimação de períodos regulares. Os hidrogramas mostrados na Figura 4.32, na Figura 4.33 e na Figura 4.34 correspondem a três bacias que drenam em direção à usina Peixe Angical na região sudeste: Ponte Paranã, Fazenda Areia e Fazenda Santana. No caso da estação Ponte Paranã que apresenta um vazão pico observado de $1.815 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ no dia 10/1/2012, a simulação com precipitação por telemetria, CHUVSAT e MERGEHQ mostraram um valor simulado próximo ao valor observado, no entanto as vazões simuladas com precipitação estimada por satélite apresentaram valores subestimados. Essa tormenta registrada em janeiro de 2012 afetou as vazões em outras estações como Fazenda Areia, Fazenda Santana, Rio da palma e a cheia propagada nessas estações afetou as vazões na usina Estreito. O fato de que esse evento não tenha sido bem representado pelas precipitações de satélite no modelo hidrológico não é raro. Essa região caracteriza-se por ter relevo montanhoso e os produtos de precipitação apresentam dificuldade em detectar eventos de grande magnitude. Essa dificuldade pode ser devido aos erros do sistema reportado em outros trabalhos feitos de simulação hidrológica em regiões montanhosas, como em Nikolopoulos *et al.* (2013), Getirana *et al.* (2011) e Quiroz (2009), Quiroz *et al.* (2011).

Para as bacias Jatobá, Porto Real e Farinha, todas elas localizadas na região nordeste da bacia onde seus rios percorrem diretamente em direção a usina Estreito, observam-se os hidrogramas com variabilidade sazonal próximo ao observado. Porém essas estações possuem curto período de tempo com série de vazões observadas para calibrar o que poderia interferir num adequado processo de calibração dos parâmetros.

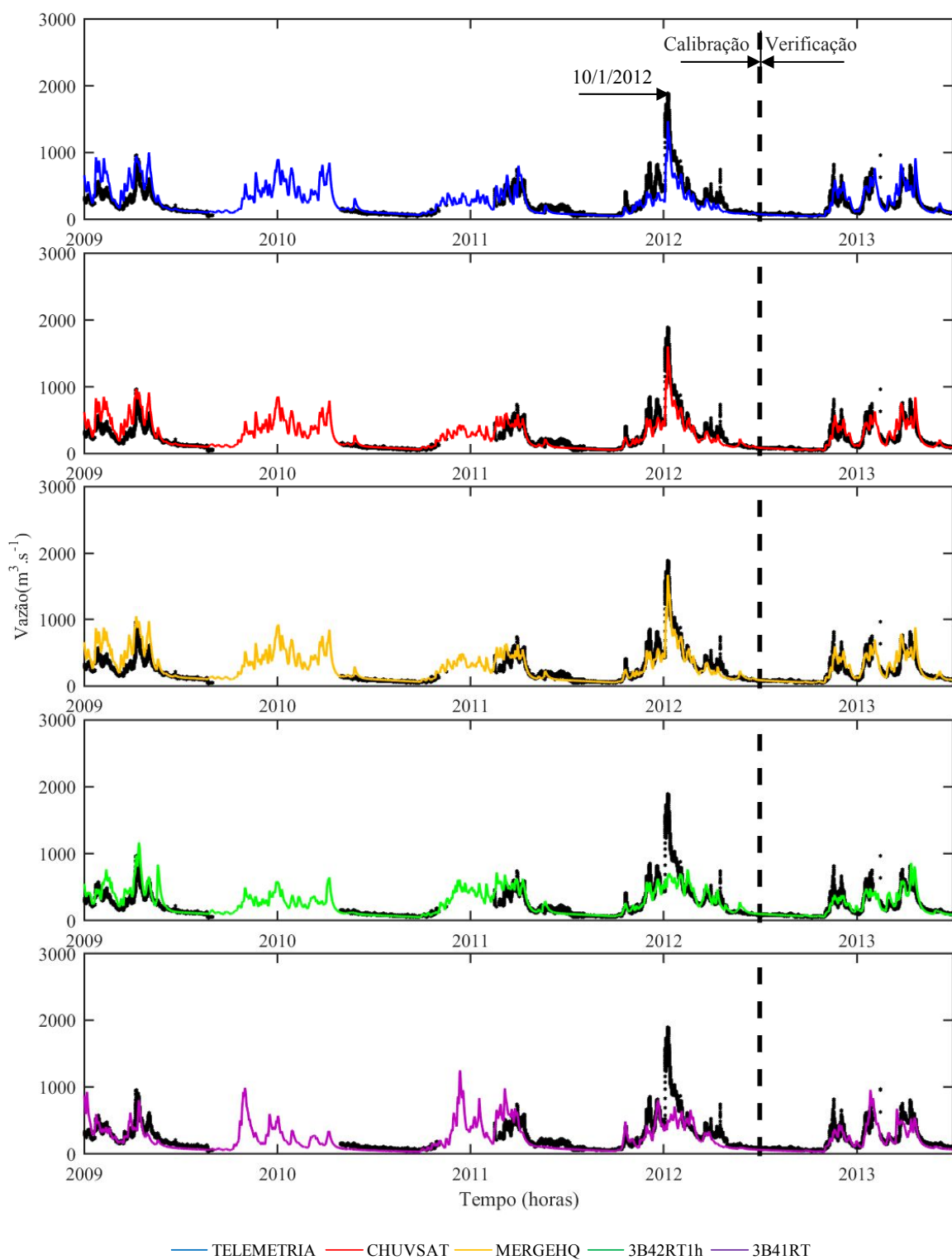


Figura 4.32 Hidrogramas para a estação Ponte Paraná calculados pelo modelo hidrológico MGB-IPH usando como dados de entrada a precipitação observada por TELEMETRIA, CHUVSAT, MERGEHQ, 3B42RT1h e 3B41RT (ordenados de cima para abaixo).

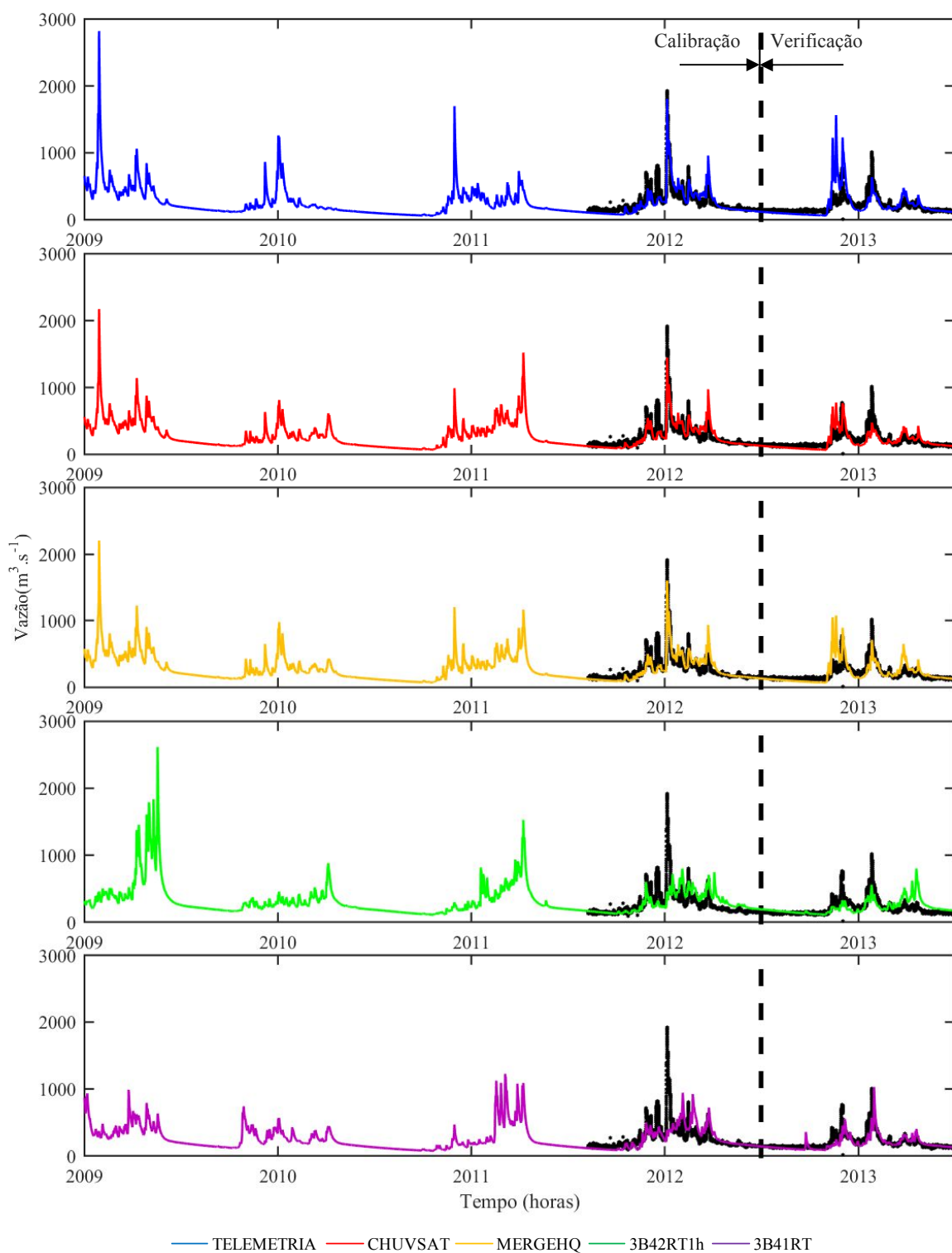


Figura 4.33 Hidrogramas calculados para a estação Fazenda Areia calculados pelo modelo hidrológico MGB-IPH usando como dados de entrada a precipitação observada por TELEMETRIA, CHUVSAT, MERGEHQ, 3B42RT1h e 3B41RT (ordenados de cima para abaixo).

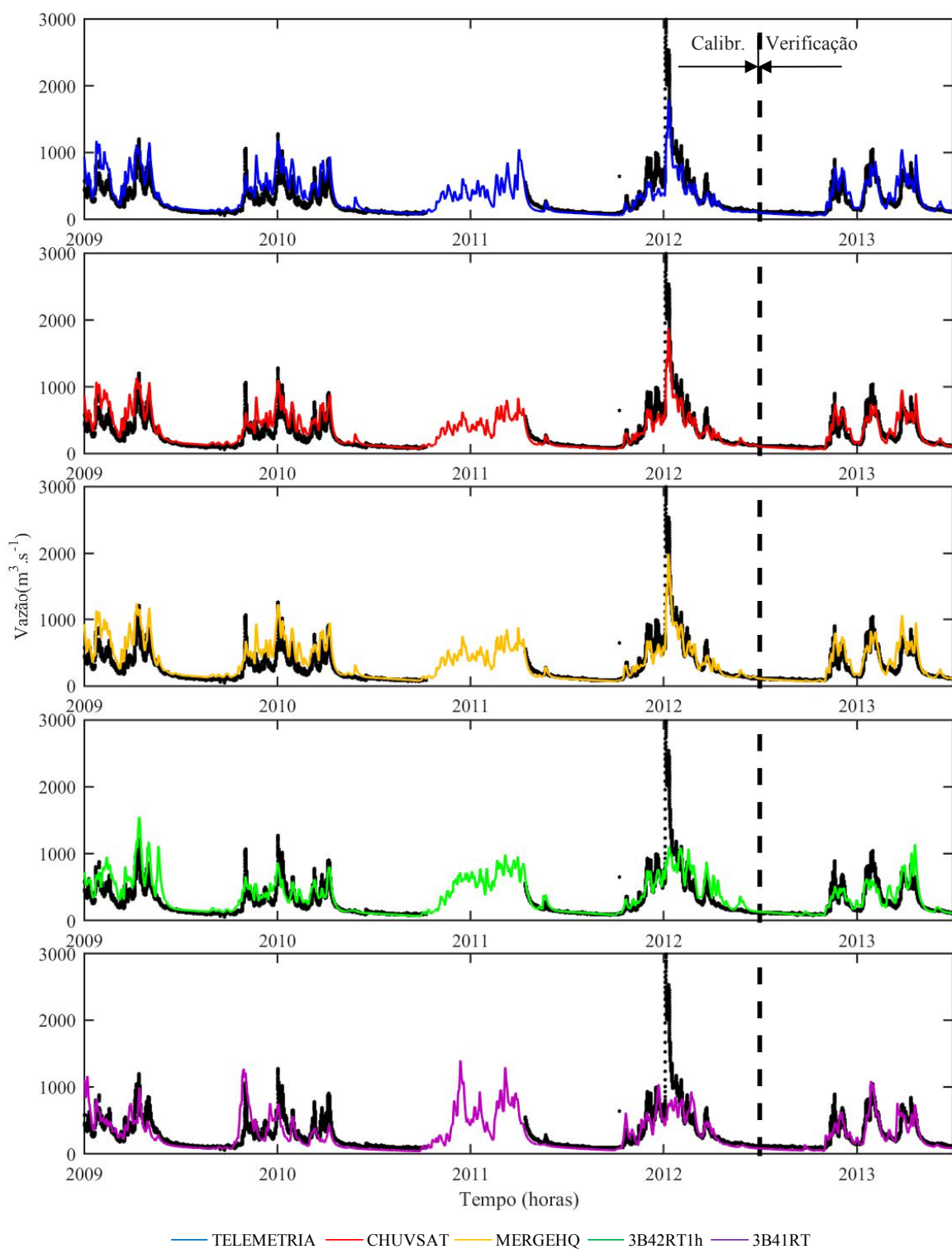


Figura 4.34 Hidrogramas calculados para a estação Fazenda Santana calculados pelo modelo hidrológico MGB-IPH usando como dados de entrada a precipitação observada por TELEMETRIA, CHUVSAT, MERGEHQ, 3B42RT1h e 3B41RT (ordenados de cima para abaixo).

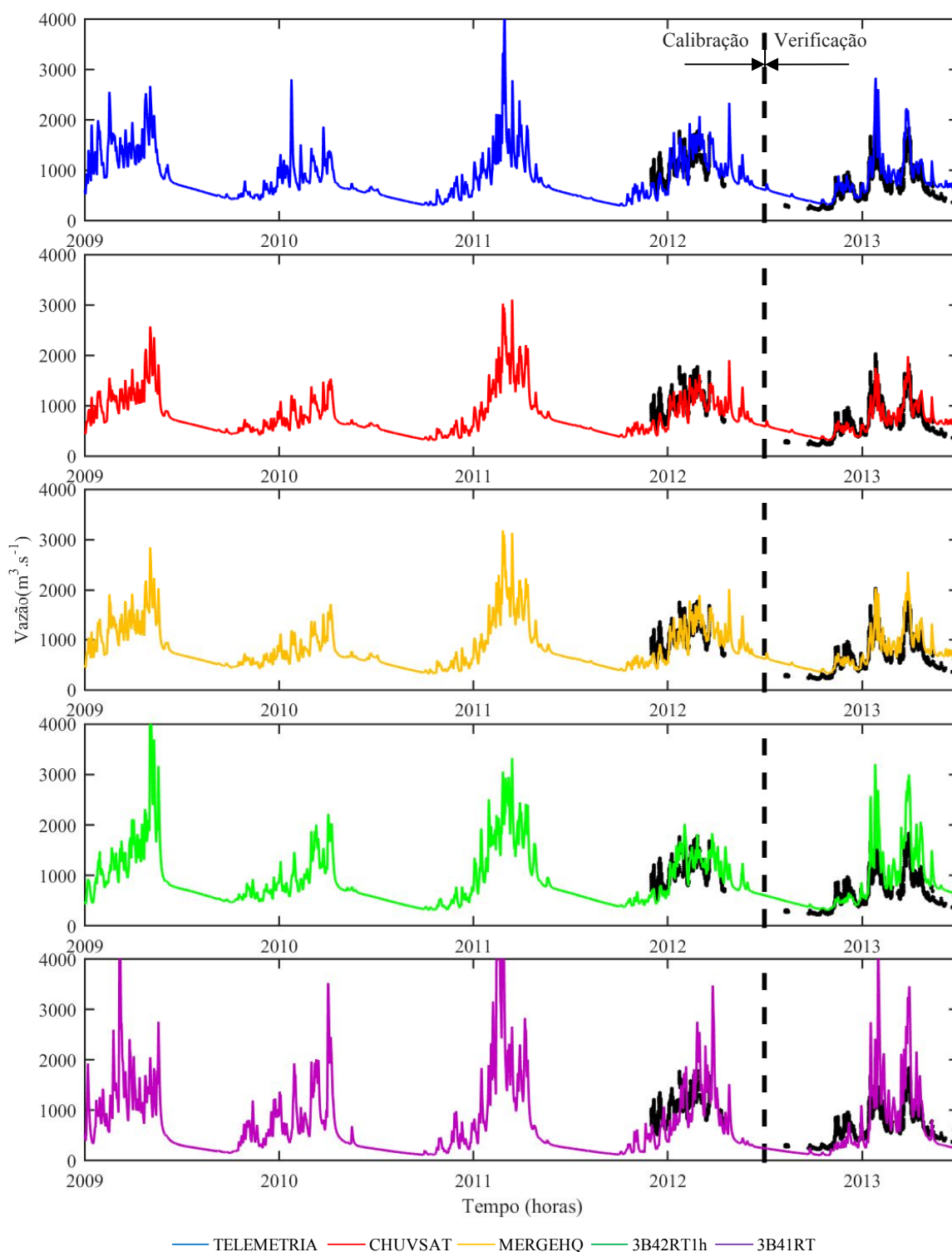


Figura 4.35 Hidrogramas calculados para a estação Porto Real calculados pelo modelo hidrológico MGB-IPH usando como dados de entrada a precipitação observada por TELEMETRIA, CHUVSAT, MERGEHQ, 3B42RT1h e 3B41RT (ordenados de cima para abaixo).

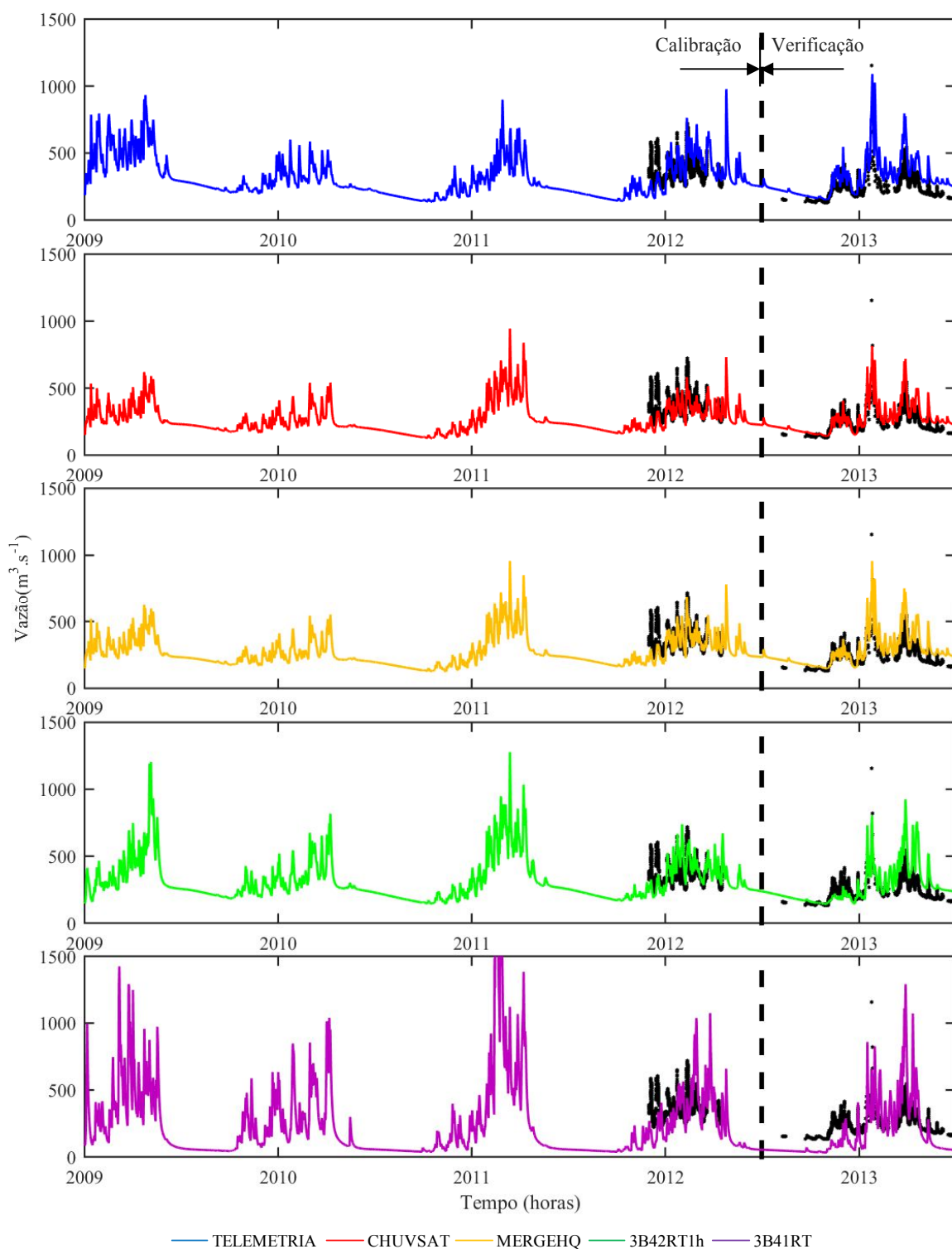


Figura 4.36 Hidrogramas calculados para a estação Jatoba calculados pelo modelo hidrológico MGB-IPH usando como dados de entrada a precipitação observada por TELEMETRIA, CHUVSAT, MERGEHQ, 3B42RT1h e 3B41RT (ordenados de cima para abaixo).

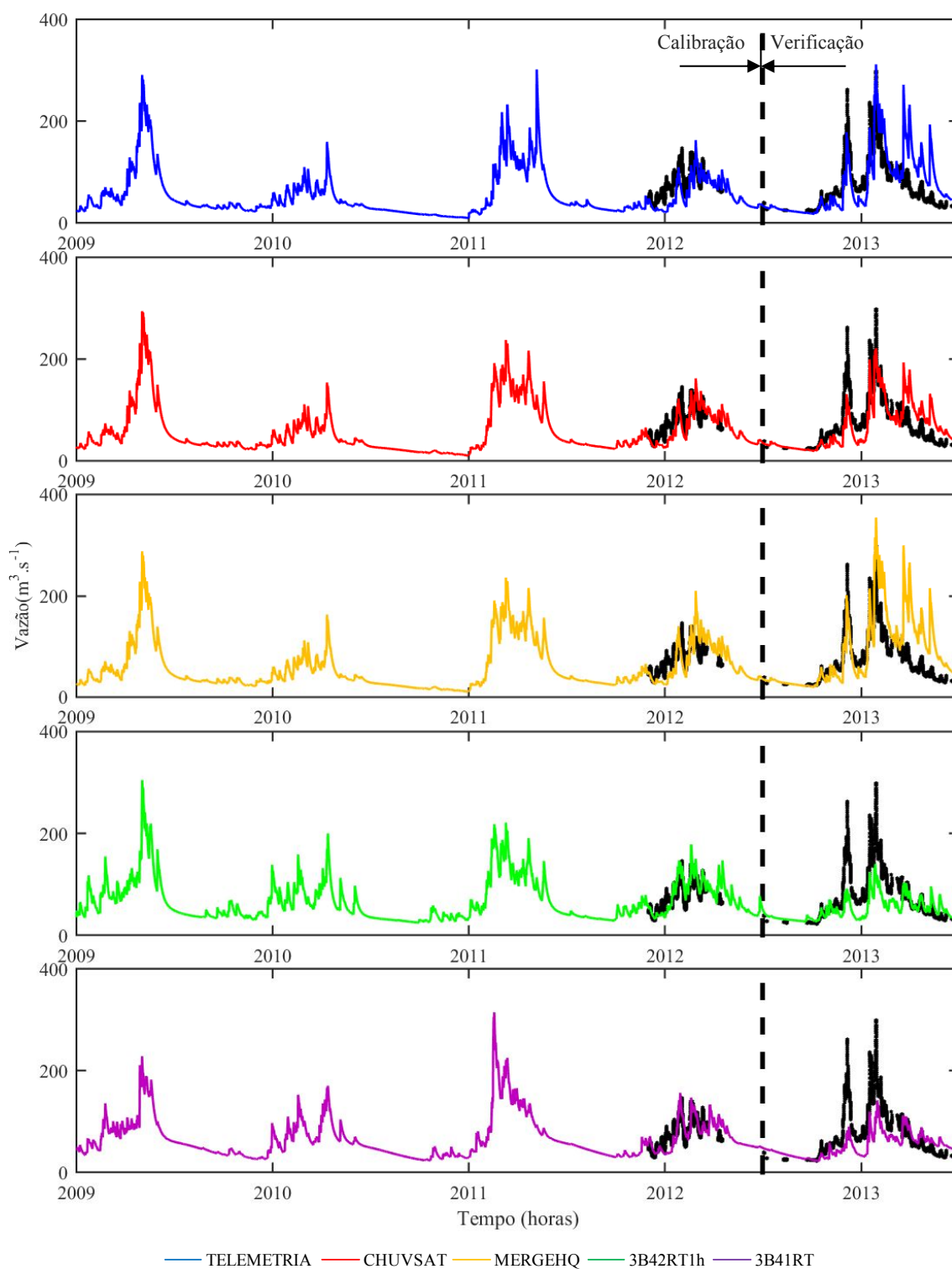


Figura 4.37 Hidrogramas calculados para a estação Farinha calculados pelo modelo hidrológico MGB-IPH usando como dados de entrada a precipitação observada por TELEMETRIA, CHUVSAT, MERGEHQ, 3B42RT1h e 3B41RT (ordenados de acima para abaixo).

Os hidrogramas mostrados na Figura 4.38, Figura 4.39, Figura 4.40 e Figura 4.41 representam os hidrogramas em locais com usina São Salvador, Peixe Angical, Lajeado e Estreito, respectivamente. Os hidrogramas em locais com usinas de Serra da Mesa e Cana Brava apresentam resposta similar à usina de São Salvador. Os hidrogramas nestes locais caracterizam-se porque possuem áreas de drenagem considerável a partir de 50.000 km². Esses locais são de interesse para a região porque as usinas estão atualmente em operação e uma análise de simulação hidrológica com fontes de precipitação alternativa ajudaria a entender melhor o sistema hídrico que se caracteriza com baixo monitoramento de rede telemétrica.

Observa-se, nos hidrogramas, que a variabilidade sazonal é bem representada pelas cinco fontes de precipitação. Porém alguns picos máximos calculados não foram bem representados. Por exemplo, analisando-se os picos simulados com a fonte de precipitação por satélite 3B41RT, observa-se sempre uma subestimação comparada às vazões observadas, note-se esse mesmo padrão em todos os locais com usinas. Esses resultados coincidem com trabalhos prévios como Harris *et al.* (2007) e Hossain e Anagnostou (2004) que apresentaram similares características de subestimativa nas vazões máximas simuladas em modelos hidrológicos usando esse mesmo produto de precipitação por satélite em outras regiões do mundo. Esse fato pode ser explicado devido ao erro sistemático introduzido pelos algoritmos com base nos sensores de infravermelho, uma vez que eles são capazes de estimar apenas a radiação no topo das nuvens como base para estimar a precipitação que atinge a superfície terrestre.

Uma descrição geral dos resultados das simulações de vazões com diversas fontes de precipitação indica adequada representatividade das vazões simuladas na etapa de verificação para as fontes de precipitação combinada. Poderia, completamente, ser mais conveniente analisar um período mais longo, onde se analisariam um maior número de vazões de picos máximos semelhante à magnitude achada no período de calibração.

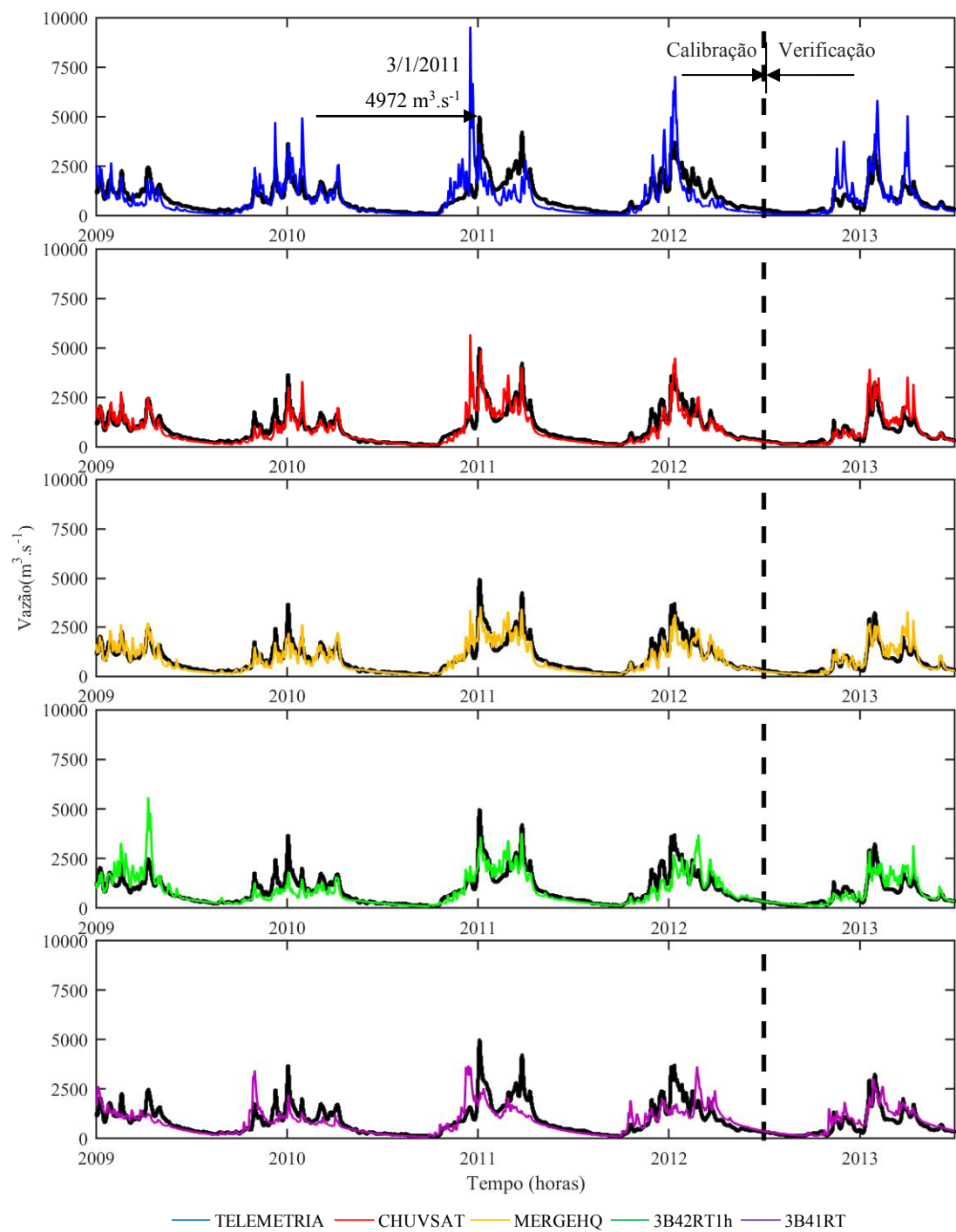


Figura 4.38 Hidrogramas calculados para a estação São Salvador calculados pelo modelo hidrológico MGB-IPH usando como dados de entrada a precipitação observada por TELEMETRIA, CHUVSAT, MERGEHQ, 3B42RT1h e 3B41RT (ordenados de acima para abaixo).

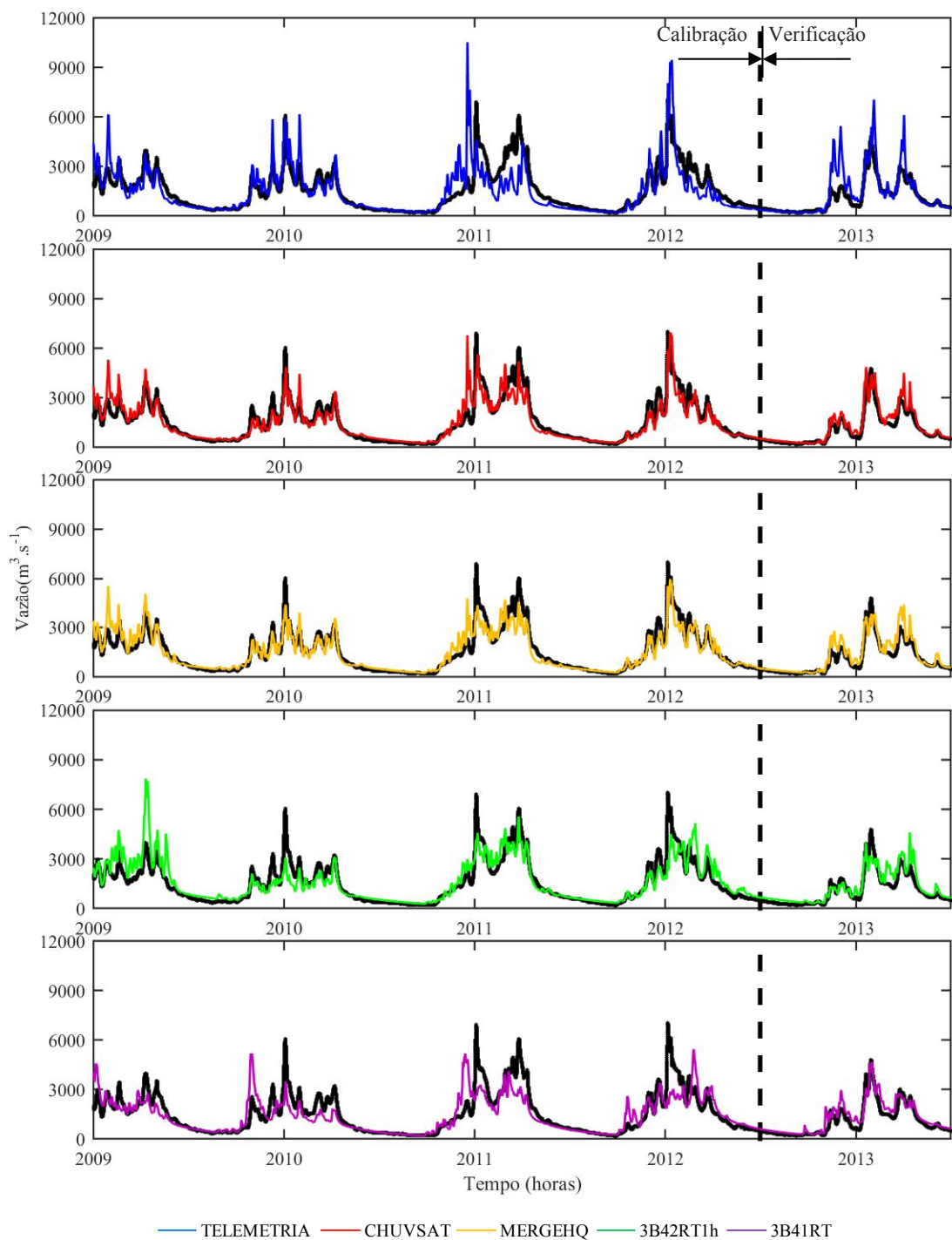


Figura 4.39 Hidrogramas calculados para a estação Peixe Angical gerados pelo modelo hidrológico usando como dados de entrada a precipitação observada por telemetria, CHUVSAT, MERGEHQ, 3B42RT1h e 3B41RT.

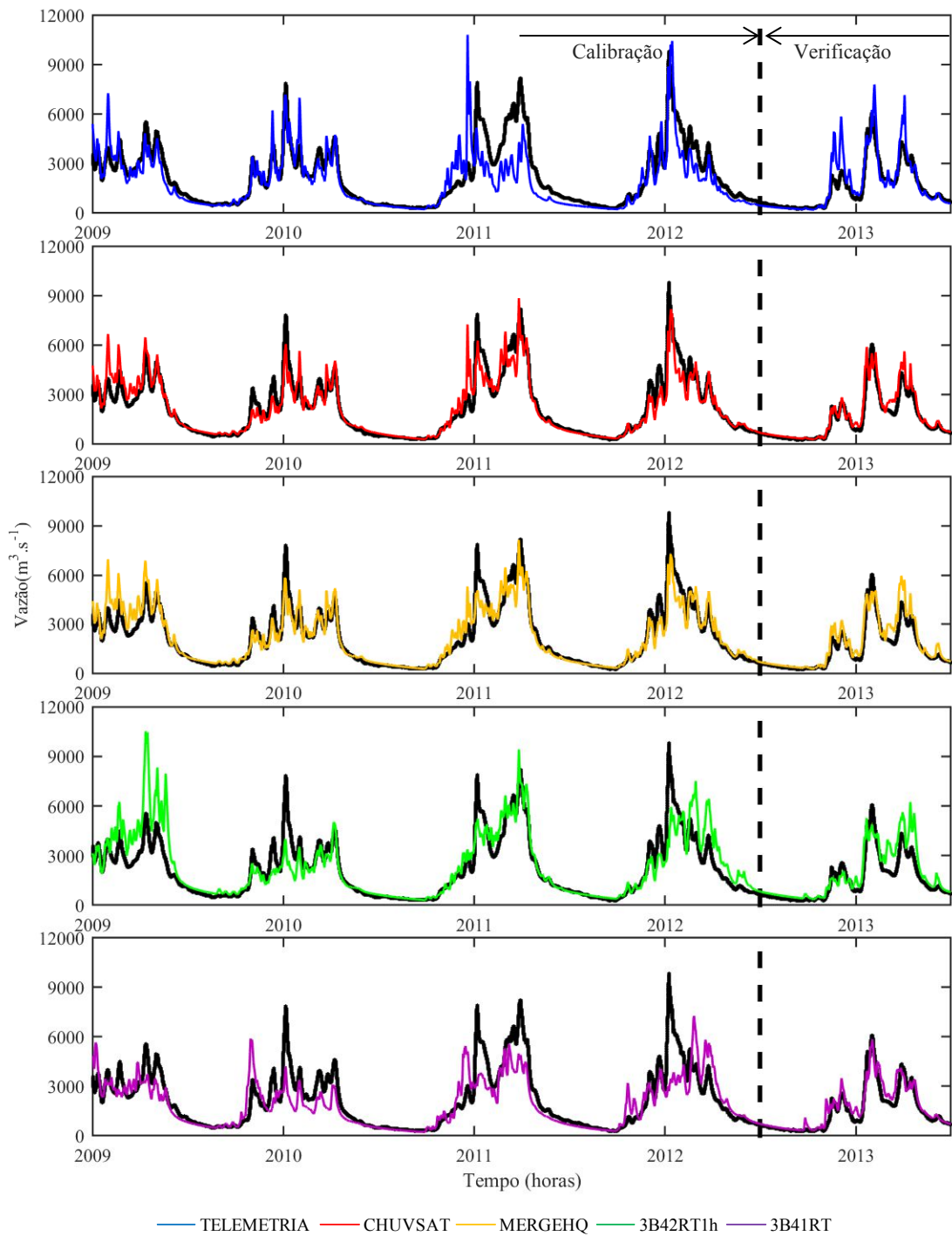


Figura 4.40 Hidrogramas calculados para a estação Lajeado calculados pelo modelo hidrológico MGB-IPH usando como dados de entrada a precipitação observada por TELEMETRIA, CHUVSAT, MERGEHQ, 3B42RT1h e 3B41RT (ordenados de cima para abaixo).

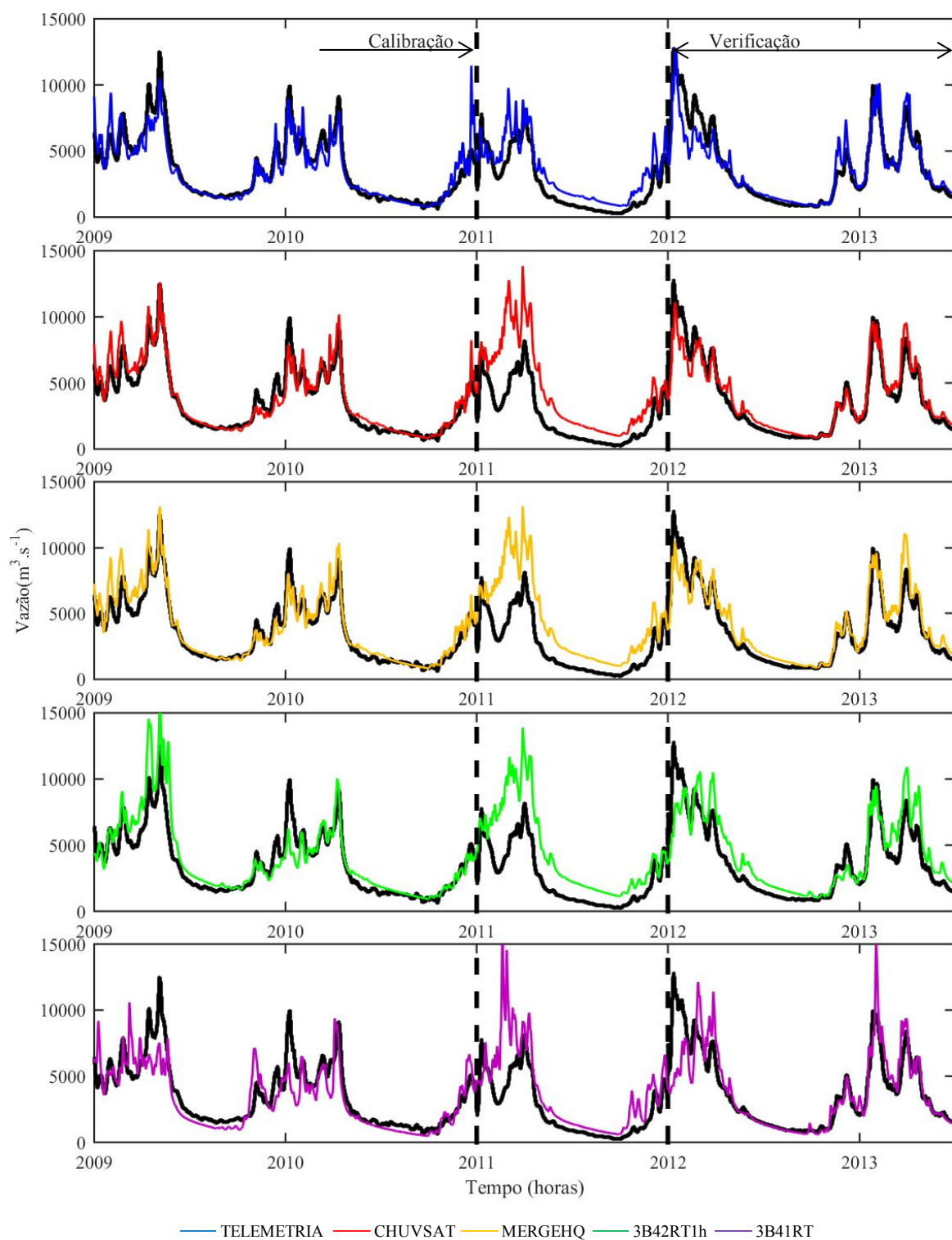


Figura 4.41 Hidrogramas calculados para a estação Estreito calculados pelo modelo hidrológico MGB-IPH usando como dados de entrada a precipitação observada por TELEMETRIA, CHUVSAT, MERGEHQ, 3B42RT1h e 3B41RT (ordenados de acima para abaixo).

4.7 Assimilação de dados e análise de transferência da informação

Antes de realizar a análise da previsão de vazões, foi de interesse demonstrar a capacidade do modelo hidrológico com diferentes fontes de precipitação para transmitir informação no momento de assimilar dados em algumas estações da bacia do rio Tocantins. Optou-se por usar a técnica de assimilação AsMGB para assimilar usando, como dado de entrada, as fontes de precipitação por telemetria, combinada (MERGEHQ, CHUVSAT) e as estimadas por satélite. Seguido, optou-se por estudar as técnicas de assimilação PF e EnKF usando apenas uma única fonte de precipitação. A eleição dessa fonte foi em função dos resultados mostrados na etapa de simulação e calibração dos parâmetros do modelo hidrológico. Nessa etapa, demonstrou-se a superioridade dos produtos combinados frente às fontes individuais, dados obtidos por telemetria e estimados por satélite. A eleição de qualquer das suas poderia ser feita, sendo selecionada MERGEHQ.

O período de análise foi de janeiro/2009 – dezembro/2011. Para essa análise, consideraram-se os locais de Lajeado e Estreito como locais para assimilar, sendo as outras para verificar a transferência de vazões, como mostrado na Figura 4.42.

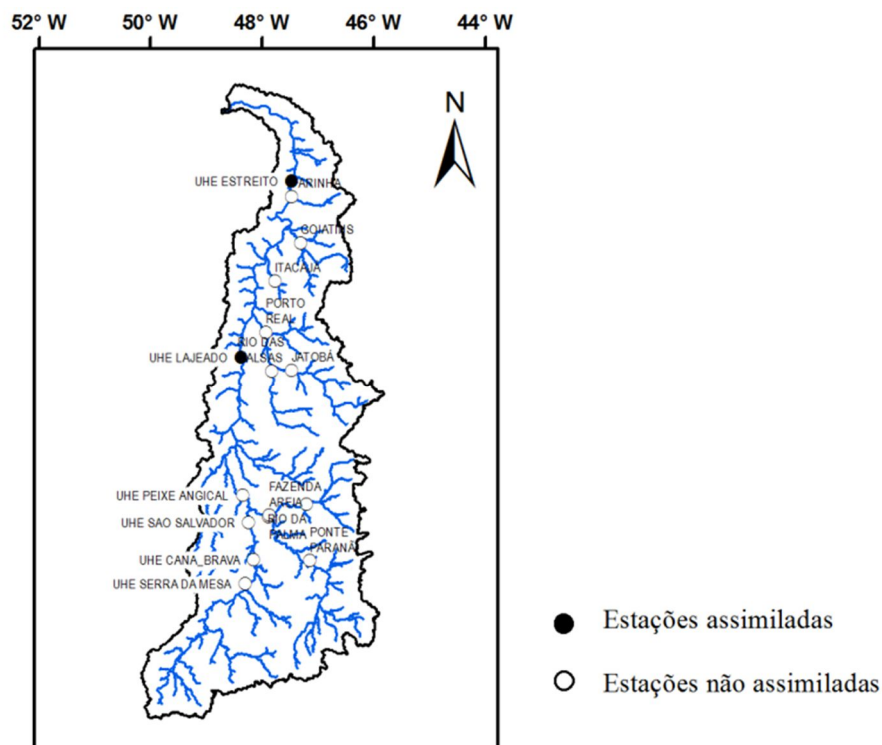


Figura 4.42. Estações assimiladas e não assimiladas para a análise de transferência das vazões na bacia do rio Tocantins

4.7.1 Transferência das vazões com AsMGB

A Figura 4.43 mostra os resultados de NS nos locais com usinas, em função da área de drenagem, para as diferentes fontes de precipitação observada, assimilando nas estações Lajeado e Estreito para o período de 2009-2011. Cada sub-quadro da Figura 4.43 mostra duas curvas, uma com linha contínua e a outra com linha tracejada, que correspondem aos resultados durante os períodos de assimilação (e verificação da assimilação) e sem assimilação (modo de simulação), respectivamente.

Os resultados mostram que o modelo hidrológico com assimilação conseguiu melhorar a eficiência de NS em todas as usinas para as diferentes fontes de precipitação observada. Isso quer dizer que o modelo conseguiu absorver o erro do modelo de simulação para Serra da Mesa, Cana Brava, São Salvador e Peixe Angical assimilando em Lajeado e Estreito. O valor de NS para Lajeado e Estreito marcam o valor de 1,00 (valor perfeito) por condição da técnica AsMGB, que considera que não existem erros nos locais que são assimilados.

Uma análise feita para cada fonte de precipitação observada mostrou ótimos valores de NS para a precipitação combinada (MERGEHQ e CHUVSAT), o que pode ser observado nas três primeiras estações com áreas de drenagem menores do que $150 \times 10^3 \text{ km}^2$. Valores ótimos de eficiência de NS foram também achados quando foi usada precipitação por satélite (3B42RT1h e 3B41RT). A assimilação conseguiu ultrapassar a medida de desempenho NS acima de 0,60 para todas as estações não monitoradas com exceção de quando dados de Telemetria foi forçada ao modelo de assimilação. O conjunto de parâmetros calibrados do modelo hidrológico não só prejudicou a simulação senão também a assimilação de dados nesse período. Esses resultados confirmam que, durante a assimilação de dados a precipitação contínua sendo uma variável dependente dos resultados do modelo de assimilação.

Outra observação de interesse é a diminuição do valor da eficiência NS em função da distância dos locais assimilados (Lajeado e Estreito). Existe uma correlação maior em locais não monitorados próximos aos locais que são assimilados localizados sobre a rede principal do rio Tocantins. Quando CHUVSAT foi dado de entrada ao modelo de assimilação AsMGB, a medida de eficiência NS foi de 0,93; 0,85 e 0,82 para Peixe Angical distante de Lajeado em 300 km, para São Salvador distante em 365 km e para Serra da Mesa distante em 500 km, respectivamente. A medida da eficiência NS para as outras fontes de precipitação forçado ao modelo de assimilação são mostradas na Tabela 4.11.

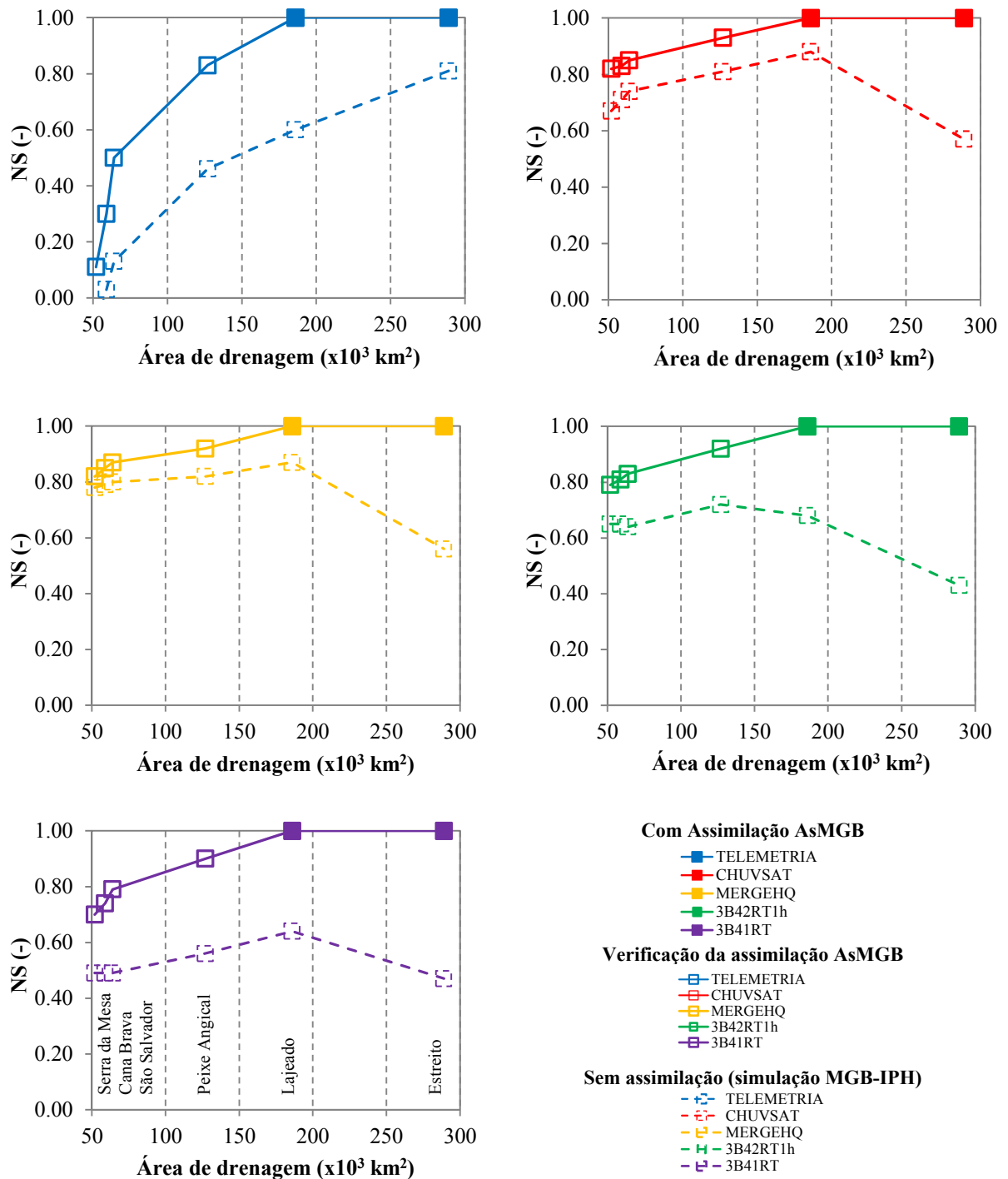


Figura 4.43 Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe para o período de 2009-2011 nos locais com usinas da bacia do rio Tocantins para as diferentes fontes de precipitação observada assimilando nas estações Lajeado e Estreito.

Tabela 4.11 Valores de coeficiente de Nash-Sutcliffe para o período de 2009-2011 em função à precipitação observada em locais com usina hidrelétrica assimilando nas estações Lajeado e Estreito com a técnica de assimilação AsMGB.

Estação	Área (10 ³ km ²)	TELEMETRIA	CHUVSAT	MERGEHQ	3B42RT1h	3B41RT
SEM ASSIMILAÇÃO (simulação)						
Serra da Mesa	52	-0,10	0,67	0,78	0,65	0,49
Cana Brava	59	0,03	0,71	0,79	0,65	0,49
São Salvador	64	0,13	0,74	0,80	0,64	0,49
Peixe Angical	127	0,46	0,81	0,82	0,72	0,56
Lajeado	186	0,60	0,88	0,87	0,68	0,64
Estreito	289	0,81	0,57	0,56	0,43	0,47
COM ASSIMILAÇÃO						
Serra da Mesa	52	0,11	0,82	0,82	0,79	0,70
Cana Brava	59	0,30	0,83	0,85	0,81	0,74
São Salvador	64	0,50	0,85	0,87	0,83	0,79
Peixe Angical	127	0,83	0,93	0,92	0,92	0,90
Lajeado (*)	186	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Estreito (*)	289	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

(*) Estações assimiladas

A análise feita anteriormente sobre as usinas foi realizada também sobre as estações fluviométricas localizadas no lado sudeste e nordeste da bacia do rio Tocantins. A Figura 4.44 mostra os resultados de NS para as diferentes fontes de precipitação observada sempre assimilando nas estações Lajeado e Estreito para o período de 2009-2011 e a Tabela 4.12 mostra seus valores numéricos para as estações localizadas na região sudeste e nordeste da bacia do rio Tocantins.

Quando MERGEHQ e precipitação estimada por satélite 3B42RT1h foram forçadas ao modelo de assimilação, a eficiência NS melhorou nas estações de Rio da Palma, Fazenda Areia, Ponte Paranã e Fazenda Santana. Quando se forçou com CHUVSAT no modelo, este melhorou em estações com maior área de drenagem (mais próximas a Lajeado). Com 3B41RT o desempenho melhorou na estação Fazenda Santana, sendo esta mais próxima a Lajeado, também. Contrariamente, a assimilação com Telemetria não mostrou uma relação nem com distância e nem com área de drenagem acumulada em relação a Lajeado. A eficiência NS com Telemetria foi inferior ao valor de 0,60 e que a assimilação em Lajeado não ajudou absorver os erros nessa região. Também, a assimilação em Lajeado e Estreito não conseguiu absorver os erros da simulação nas estações de Itacaja, Farinha, Goiantins, Jatoba

e Porto Real. Um maior registro de vazões observadas nesse período poderiam ter ajudado ao desenvolvimento da transferência de vazões nessa região da bacia.

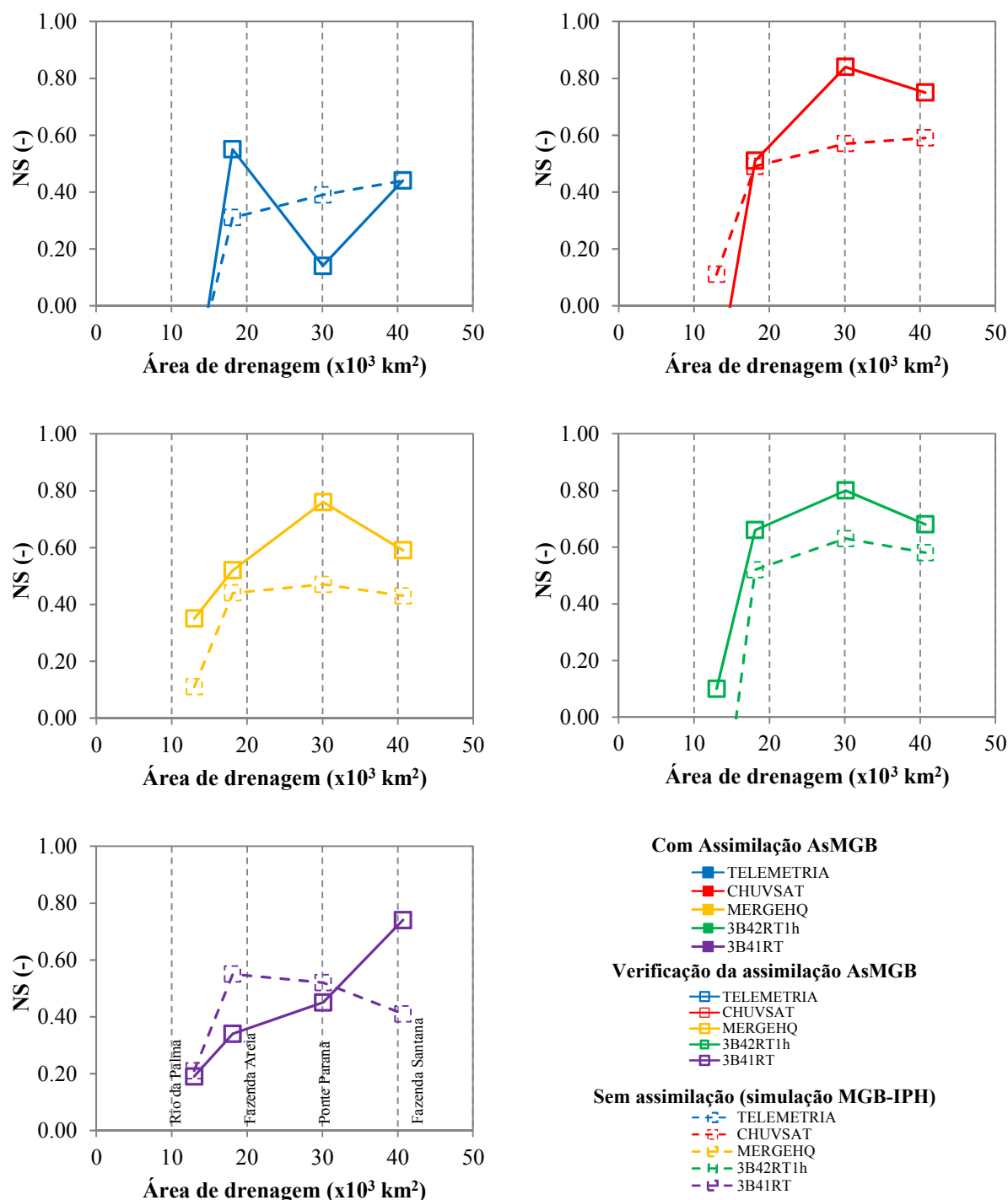


Figura 4.44 Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe para o período de 2009-2011 nas estações fluviométricas de rio da Palma, Fazenda Areia, Ponte Paranã e Fazenda Santana da bacia do rio Tocantins para as diferentes fontes de precipitação observada assimilando nas estações Lajeado e Estreito.

Tabela 4.12 Valores de coeficiente de Nash-Sutcliffe em função à precipitação observada em estações fluviométricas no lado leste (sudeste e nordeste) da bacia do rio Tocantins com a técnica de assimilação AsMGB.

Estação	Área (10 ³ km ²)	TELEME- TRIA	CHUVSAT	MERGEHQ	3B42RT1h	3B41RT
SEM ASSIMILAÇÃO (Simulação)						
rio da Palma	13	-0.24	0,11	0.11	-0.54	0.21
Fazenda Areia	18.1	0.31	0,49	0.44	0.52	0.55
Ponte Paranã	30.1	0.39	0,57	0.47	0.63	0.52
Fazenda Santana	40.7	0.44	0.59	0.43	0.58	0.41
Itacaja	2.8	-1.24	0.11	-0.61	0.38	-0.23
Farinha	5.3	-2.6	-1.47	-1.59	0.05	-0.24
Goiatins	10.1	-0.47	-0.35	-0.47	0.07	-0.32
Jatoba	17.2	-0.58	-0.77	-0.72	-0.24	-2.81
Porto real	44.3	-0.18	-0.63	-0.36	-0.7	-2.86
COM ASSIMILAÇÃO						
rio da Palma	13	-0.33	-0.28	0.35	0.1	0.19
Fazenda Areia	18.1	0.55	0,51	0.52	0.66	0.34
Ponte Paranã	30.1	0.14	0,84	0.76	0.8	0.45
Fazenda Santana	40.7	0.44	0,75	0.59	0.68	0.74
Itacaja	2.8	0.16	-0.32	-0.26	-0.75	-0.58
Farinha	5.3	-10.75	-9,29	-10.4	-7.33	-6.79
Goiatins	10.1	-5.44	-4,76	-5.94	-3.92	-3.89
Jatoba	44.3	-6.17	-6,03	-7.11	-5.77	-5.09
Porto real	2.8	-5.55	-7.35	-7.42	-6.95	-5.94

De forma geral, os resultados numéricos mostram que usando a precipitação combinada (MERGEHQ e CHUVSAT) e precipitação por satélite como dado de entrada no modelo de assimilação ajudam a transferir vazões para locais onde não se tem informação. Com base nos resultados anteriores, os locais onde se pode transferir informação de vazões seriam na rede principal do rio Tocantins e sobre a região sudeste da bacia. A baixa eficiência NS em função da precipitação telemétrica mostrou que os resultados de transferência de informação sobre a bacia do rio Tocantins é dependente da precipitação observada.

4.7.2 Transferência das vazões com PF, EnKF e AsMGB

Este item analisa a transferência de informação de vazões de locais monitorados para outros locais não monitorados comparando as técnicas de assimilação de dados do tipo sequencial (PF, EnKF) e a técnica AsMGB. Para todos os casos, trabalhou-se com MERGEHQ como a precipitação observada ao modelo de assimilação. Para a comparação das técnicas, foi primeiro feito uma análise de sensibilidade para determinar o número de partículas para o caso de PF (ou membros no caso de EnKF) entre outros parâmetros. Para o caso da técnica de assimilação AsMGB, os parâmetros foram obtidos do trabalho de Fan et al. (2014)

4.7.2.1 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade inclui determinar, além do número de partículas e número de membros, o erro relativo da precipitação (E ; %), decorrelação espacial (τ_x ; °) e decorrelação temporal (τ_t ; horas); os três últimos parâmetros formam parte do cálculo da perturbação da precipitação observada.

Na literatura, não existe uma norma para determinar o cálculo de número de partículas ou número de membros para as técnicas de assimilação de dados de tipo sequencial. No caso de bacias com uma estação de controle, é usual testar vários tamanhos de partículas e comparar com uma medida de desempenho entre as vazões observadas e assimiladas para um período determinado como em Weerts *et al* (2008), Vrugt *et al.* (2013), Vrugt *et al.* (2006), Nagarajan *et al* (2011), Chen *et al.* (2013). Outros trabalhos que incluem várias estações de controle optam livremente por testar um número de partículas (membros) como Mendoza *et al.* (2010) usaram 50 para uma bacia no sul do Chile. Ridler *et al.* (2014) consideraram 300, Rakovec *et al.* (2015) usaram 36, Rakovec *et al* (2012) usaram 64 e, Salomon e Feyen (2009) usaram 3200 para execução da assimilação tendo que se auxiliar de algoritmos de computação paralela.

Quando a bacia a estudar tem várias estações por assimilar e é de grande porte pode-se selecionar as estações que são para assimilar e outras para verificar o modelo de assimilação de dados como no trabalho de Paiva *et al* (2013). A metodologia de sensibilidade para cálculo de número de membros pela técnica de EnKF aplicada para a bacia do rio Amazonas conseguiu determinar um número de membros para todo o conjunto da bacia. Aqui a bacia do

rio Tocantins tem as mesmas características, sendo de grande porte e com várias estações para assimilar. Nesse sentido, optou-se por seguir a metodologia descrita por Paiva *et. al.* (2013).

Para essa análise, trabalhou-se com a estação Lajeado para conformar a série temporal de assimilação. Para a etapa de verificação, foram consideradas as séries temporais das estações de Serra da Mesa, Cana Brava, São Salvador, Peixe Angical e Estreito (vide Figura 4.45). O período de assimilação para essa análise foi de 1/1/2012 até 30/6/2012 (6 meses), onde se considerou quase um ano de período de aquecimento do modelo desde 1/1/2011 – 30/12/2011 (12 meses). A vazão de assimilação considerada nessa análise é a média do conjunto de vazões geradas para cada intervalo de tempo do processo de assimilação, com o fim de obter um valor representativo de todo o conjunto simulado. Os resultados foram avaliados em termos da variação média da raiz do erro quadrático médio (Δrms) entre séries temporais de vazão observada e simulada, calculada para duas amostras. A primeira amostra é composta por estações consideradas na assimilação, e a segunda amostra é composta por estações consideradas na verificação. Maiores valores negativos da variação do erro quadrático médio da raiz indicam melhor desempenho no esquema de sensibilidade.

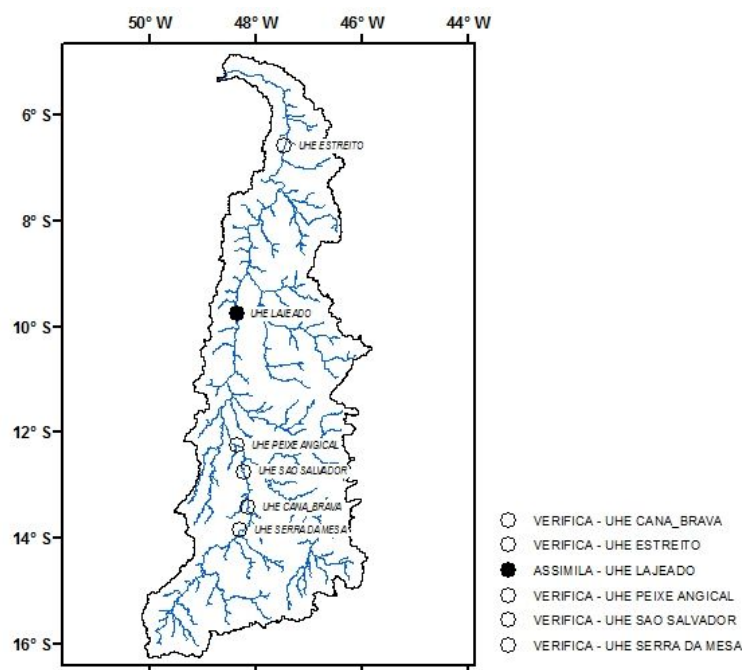


Figura 4.45 Estações para assimilação e verificação para determinação de parâmetros do método de assimilação de dados por filtro de Partículas (PF) e filtro Kalman por conjunto (EnKF)

Os erros nas medições são parametrizados em função das vazões observadas, sendo que os erros nas observações foram considerados como um valor em unidades de

porcentagem. Neste trabalho, foi definido em base a outros trabalhos feitos usando assimilação de dados em outras bacias do mundo, por exemplo, Paiva *et al.* (2013) usaram 13% para vazões diárias na região da Amazônia, Clark *et al.* (2008) usaram 10% para vazões horárias automáticas, Noh *et al.* (2013) usou 10% e Chen *et al.* (2013) usaram 20%. Aqui foi considerado o valor de 20% dado que as vazões horárias são o resultado da discretização temporal da série de vazões fornecidas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) o que poderiam apresentar ainda um maior erro das vazões naturais.

A Figura 4.46 mostra a relação entre os parâmetros em relação à variação da raiz do erro quadrático médio das vazões (Δ_{rms}). Maiores valores negativos de Δ_{rms} indicam melhor desempenho no esquema de assimilação de dados. A figura de sensibilidade dos parâmetros deve mostrar uma tendência de valores mais negativos (valores ótimos) da variação do erro com o maior número de partículas (ou membros). A série de vazões para a verificação é útil para marcar um limite na escolha dos parâmetros.

Com base nesses resultados, o esquema de assimilação é altamente dependente do número de partículas (N) e do erro relativo da precipitação (E). Por outro lado, possui baixa dependência na decorrelação espacial (τ_x) e temporal espacial (τ_t). Com série de vazões assimiladas, a variação do erro é mais positivo para pequenos números de partículas e mais negativo para maiores número de partículas.

A variação do erro durante a verificação diminui, assim, como na assimilação até o número de partículas terem o valor de $N = 300$, após esse valor, a variação média do erro da assimilação o mantém-se relativamente constante no entorno do valor de -50%, enquanto que, para a verificação, diminui para o valor 12% considerando invariável para maiores número de partículas. A Figura mostrou, também, a sensibilidade para o erro relativo da precipitação (E) onde a variação do erro durante a verificação diminui assim como na assimilação até o valor de $E = 60\%$. Após esse valor, a variação média do erro para a assimilação continua melhorando (mais negativo), enquanto que para a verificação piora (mais positivo). A mesma Figura mostrou também a baixa dependência da variação do erro com os parâmetros de decorrelação espacial e temporal. A variação média do erro para a assimilação e verificação mostrou que decorrelação espacial se mantém praticamente constante a partir do valor de 2° e que a decorrelação temporal apresentou qualquer variabilidade com as duas séries de vazões analisadas (assimilação e verificação) considerando o valor de 10 horas.

Análise de sensibilidade para filtro de Partículas (PF)

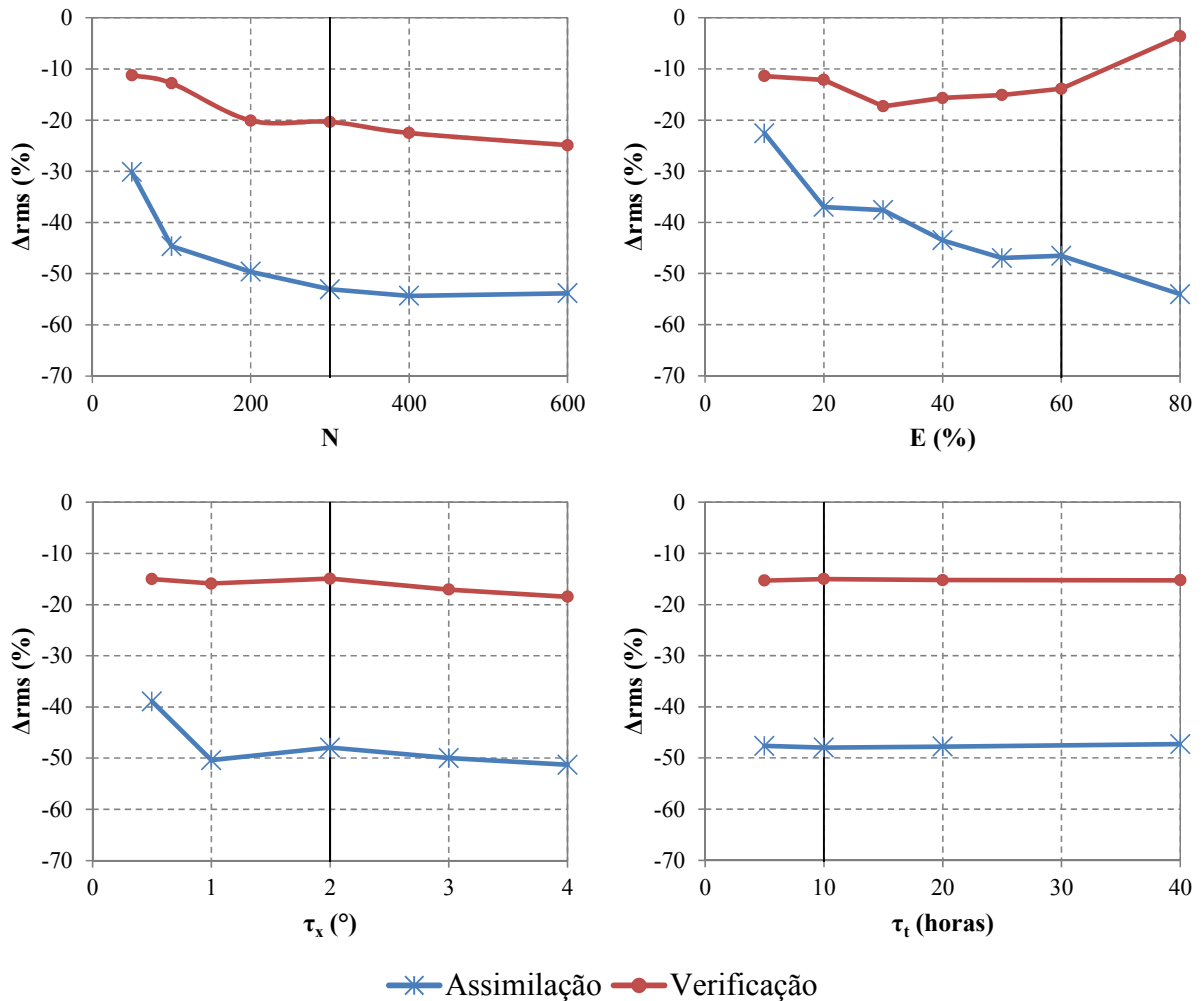


Figura 4.46 Resultados de teste de sensibilidade para determinar os parâmetros do modelo de perturbação da precipitação e o número de partículas para filtro de partículas (PF). Variação média do da raiz do erro quadrático médio para estações consideradas na assimilação (pontos com estrela) e verificação (pontos em círculos) em função do tamanho do conjunto (N), erro relativo da precipitação (E ; %), decorrelação espacial (τ_x , °) e decorrelação temporal (τ_t , horas).

A análise para determinar os parâmetros relacionados com a técnica PF é realizada para a técnica de filtro Kalman por conjunto (EnKF). De acordo com os resultados mostrados na Figura 4.47, a variação do erro durante a verificação diminui assim como na assimilação até o número de membros terem o valor de $N = 100$. A sensibilidade para o erro relativo da precipitação (E) foi dado quando a variação do erro durante a verificação diminui assim como na assimilação até o valor de $E = 50\%$ e para as decorrelações espacial e temporal, que tiveram baixa sensibilidade, optou-se por escolher 2° e 10 horas, respectivamente.

Análise de sensibilidade para filtro Kalman por conjunto (EnKF)

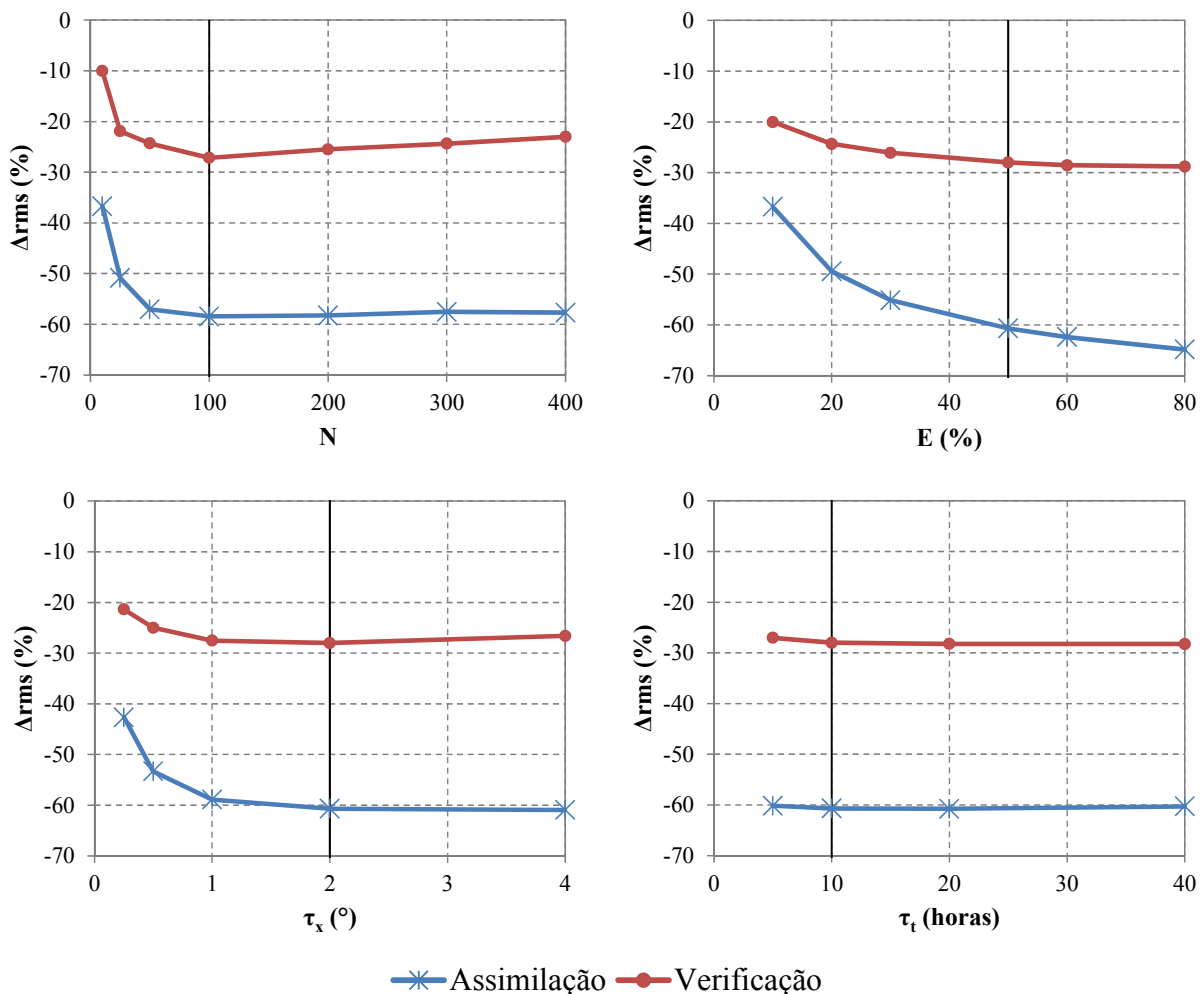


Figura 4.47 Resultados de teste de sensibilidade para determinar os parâmetros do modelo de perturbação da precipitação e o número de partículas para filtro Kalman por conjunto (EnKF). Variação média da raiz do erro quadrático médio para estações consideradas na assimilação (pontos com estrela) e verificação (pontos em círculos) em função do tamanho do conjunto (N), erro relativo da precipitação (E ; %), decorrelação espacial (τ_x , °) e decorrelação temporal (τ_t , horas).

A Tabela 4.13 mostra um resumo dos parâmetros obtidos para ambas as técnicas de assimilação de dados. Observa-se que o número de partículas para PF ficou maior para o número de membros EnKF. O número de partículas para PF ser maior que o número de membros para EnKF guarda relação com os resultados obtidos em outros trabalhos como em Weerts *et al.*(2006), Dechant e Moradkhani (2012) e Nagarajam *et al.* (2011), entre outros, onde são comparadas ambas técnicas e existe uma análise de sensibilidade.

Tabela 4.13 Resultados dos parâmetros de assimilação PF e EnKF para a bacia do rio Tocantins.

Técnica de Assimilação	Número de partículas (membros) (N)	Erro relativo da precipitação E (%)	decorrelação espacial (τ_x , °)	decorrelação temporal (τ_t , horas)
PF	300	60	2	10
EnKF(*)	100	50	2	10

(*) Denominação de número de membros para EnKF.

4.7.2.2 Transferência da informação

Após a determinação dos parâmetros do modelo de assimilação PF e EnKF, procede-se a analisar a capacidade do modelo hidrológico acoplado a ditas técnicas comparando como os resultados obtidos de AsMGB. Os resultados mostram os valores das medidas de desempenho estatístico de Nash-Sutcliffe (NS), raiz do erro quadrático médio (EQMR) e a variação média da raiz do erro quadrático médio (Δrms) quando se assimila em Lajeado e Estreito. A Figura 4.48 mostra os valores de EQMR e NS nos locais com usinas da bacia do rio Tocantins para o período de janeiro/2009 - dezembro/2011, e a Tabela 4.14 mostra os valores numéricos das medidas estatísticas. Observa-se que Peixe Angical é o único local onde se percebe com maior clareza um benefício. A eficiência de NS foi de 0,82 sem assimilação subindo para 0,87 com PF e 0,90 com EnKF, enquanto que, nas estações Serra da Mesa, Cana Brava e São Salvador as medidas estatísticas praticamente se mantêm numericamente estáveis. Os resultados usando AsMGB registrou menor EQMR e melhor NS para as estações não monitoradas comparado com as técnicas de EnKF e PF.

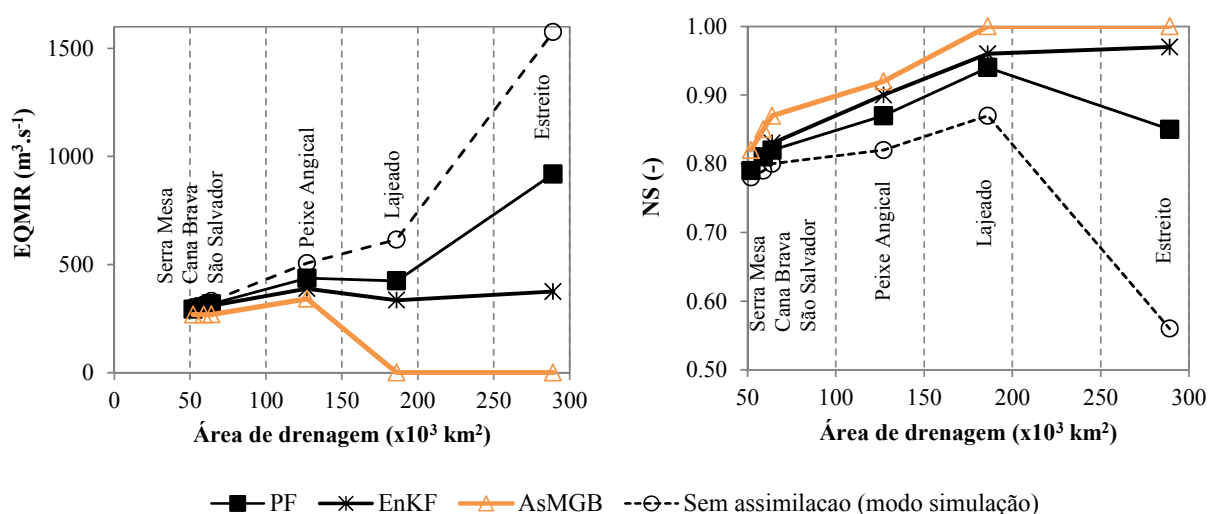


Figura 4.48 Raiz do erro quadrático médio (EQMR) e coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) para o período de 2009-2011 nos locais com usinas da bacia do rio Tocantins assimilando em Lajeado e Estreito.

Tabela 4.14 Valores de variação média do erro quadrático médio (Δ_{rms}), raiz do erro quadrático médio (EQMR) e Nash Sutcliffe (NS) das vazões para os locais com usinas usando PF, EnKF e AsMGB.

Estação	Área (10 ³ km ²)	Sem assimilação		filtro de partículas (PF)			filtro Kalman por conjunto (EnKF)			AsMGB		
		EQMR	NS	Δ_{rms}	EQMR	NS	Δ_{rms}	EQMR	NS	Δ_{rms}	EQMR	NS
Assimilando nas estações de Lajeado e Estreito												
Serra da Mesa	52	302	0,78	-3,0	293	0,79	-3,2	292	0,79	-11	269	0,82
Cana Brava	59	314	0,79	-3,4	303	0,81	-4,9	298	0,81	-15	268	0,85
São Salvador	64	331	0,80	-3,9	318	0,82	-6,4	309	0,83	-19	269	0,87
Peixe Angical	127	506	0,82	-13,7	437	0,87	-23,3	388	0,90	-33	342	0,92
Lajeado	186	615	0,87	-31,1	424	0,94	-45,6	335	0,96	-100	0,0	1,00
Estreito	289	1575	0,56	-41,6	919	0,85	-76,2	375	0,97	-100	0,0	1,00

A mesma análise foi feita para locais com estações fluviométricas. A Figura 4.49 mostra os resultados de EQMR e NS para as estações Rio da Palma, Fazenda Areia, Ponte Paranã e Fazenda Santana (estações localizadas no lado sudeste da bacia), sempre assimilando nos locais Lajeado e Estreito e a Tabela 4.15 mostra o desempenho estatístico das estações fluviométricas. A eficiência NS e o erro EQMR com assimilação PF e EnKF melhoram nas estações com exceção da estação Fazenda Areia comparado com os resultados de não assimilação. No entanto, a assimilação em estações monitoradas usando AsMGB mostrou um melhor desempenho estatístico para as estações não monitoradas comparado com o desempenho das técnicas de assimilação PF e EnKF.

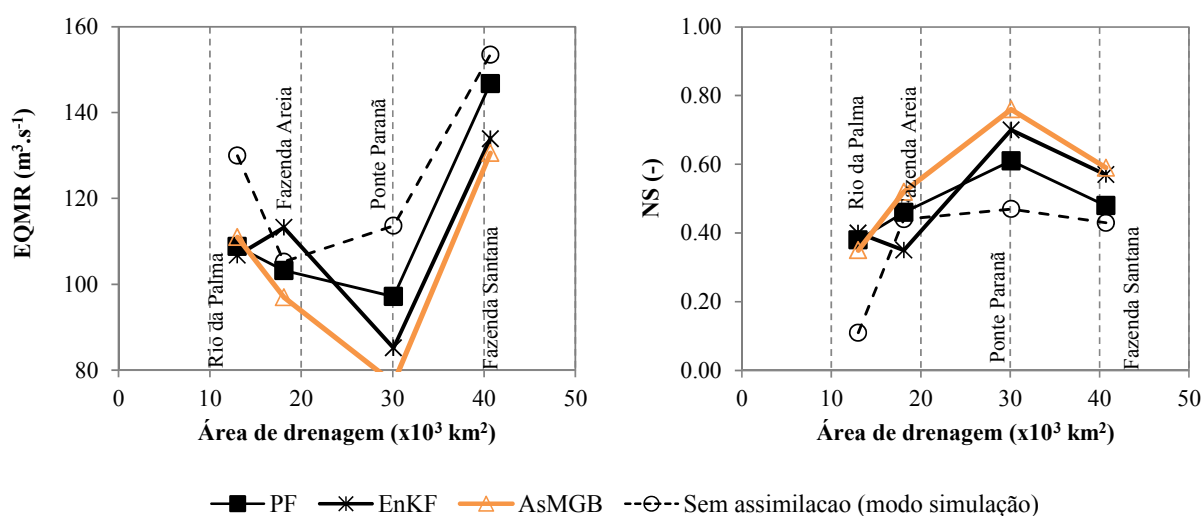


Figura 4.49 Raiz do erro quadrático médio e coeficiente de eficiência de Nash Sutcliffe nas estações fluviométricas rio da Palma, Fazenda Areia, Ponte Paranã e Fazenda Santana.

Tabela 4.15 Valores de variação média do erro quadrático médio (Δrms), raiz do erro quadrático médio (EQMR) e Nash Sutcliffe (NS) das vazões para as estações fluviométricas assimilando nas estações de Lajeado e Estreito PF, EnKF e AsMGB.

Estação	Área (10 ³ km ²)	Sem assimilação		filtro de partículas (PF)			filtro Kalman por conjunto (EnKF)			AsMG		
		EQ MR	NS	Δrms	EQ MR	NS	Δrms	EQ MR	NS	Δrms	EQMR	NS
		Assimilando nas estações de Lajeado e Estreito										
Rio da Palma	13.0	129	0,11	-16	108	0,38	-18	106	0,40	-15	111	0.35
Faz. Areia	18.1	105	0,44	-2	103	0,46	7,6	113	0,35	-8	97	0.52
Ponte Paranã	30.1	113	0,47	-14	97	0,61	-25	85	0,70	-32	77	0.76
Faz. Santana	40.7	153	0,43	-4	146	0,48	-13	133	0,57	-15	131	0.59
Itacaja	2.80	35	-0,61	-18	29	-0,08	34	47	-1,9	-12	31	-0.3
Farinha	5.30	18	-1,58	47	27	-4,57	103	37	-9,73	110	39	-10
Goiatins	10.1	82	-0,47	47	120	-2,16	142	199	-7,65	117	179	-5.9
Jatoba	17.2	124	-0,72	0,5	124	-0,74	127	282	-7,89	117	269	-7.1
Portoreal	44.3	238	-0,36	20	288	-0,98	185	680	-10,0	149	594	-7.4

A Figura 4.50 e Figura 4.51 mostram os hidrogramas das estações São Salvador e Peixe Angical, sendo que esses hidrogramas são o resultado de assimilar nestas estações de Lajeado e Estreito. Cada figura contém três sub-quadros que contém os resultados de assimilação com EnKF, PF e erro relativo das vazões assimiladas e são comparados com vazões observadas e simuladas com o modelo MGB-IPH durante o período de 2009-2011. Uma análise visual dos hidrogramas mostrou que a assimilação nas estações de Lajeado e Estreito não mostrou uma clareza de transferir informação nas estações de São Salvador e Peixe Angical. Essas diferenças foram mais notórias nas vazões máximas que não foram bem representadas pela consideração da assimilação (por exemplo, observar o evento de Janeiro/2011) e o erro relativo durante o período de análise se calculou na faixa de $\pm 100\%$.

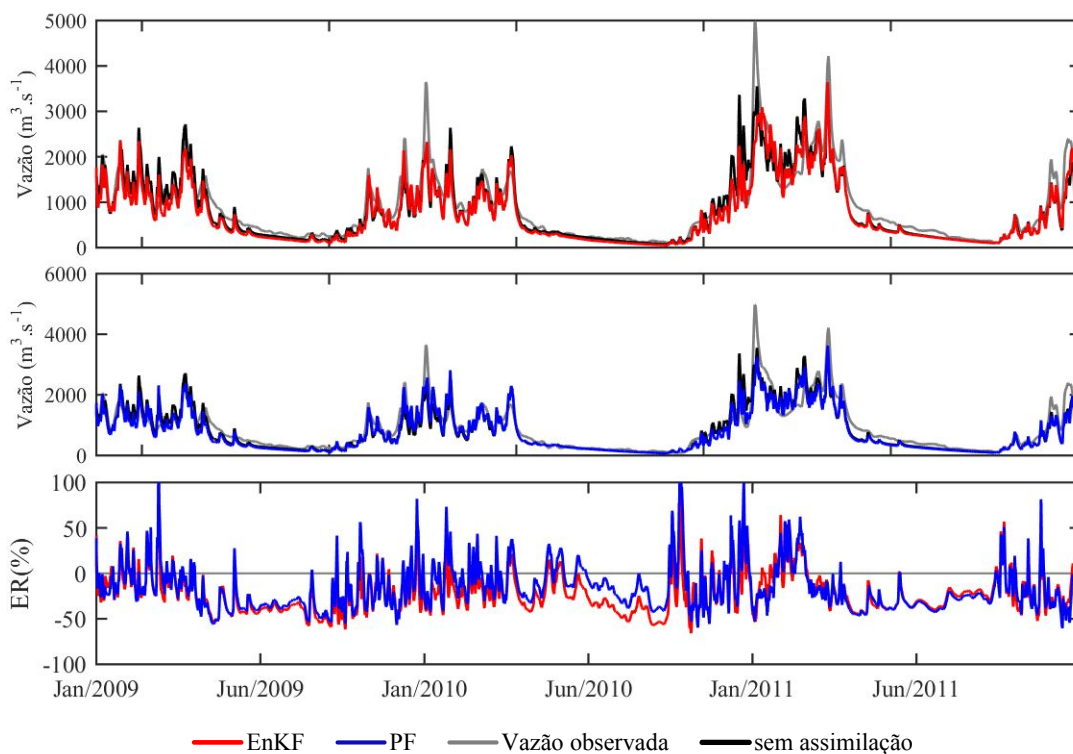


Figura 4.50 Hidrogramas de vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e erro relativo das vazões (%) para São Salvador em assimilação e com assimilação EnKF e PF assimilando nas estações Lajeado e Estreito.

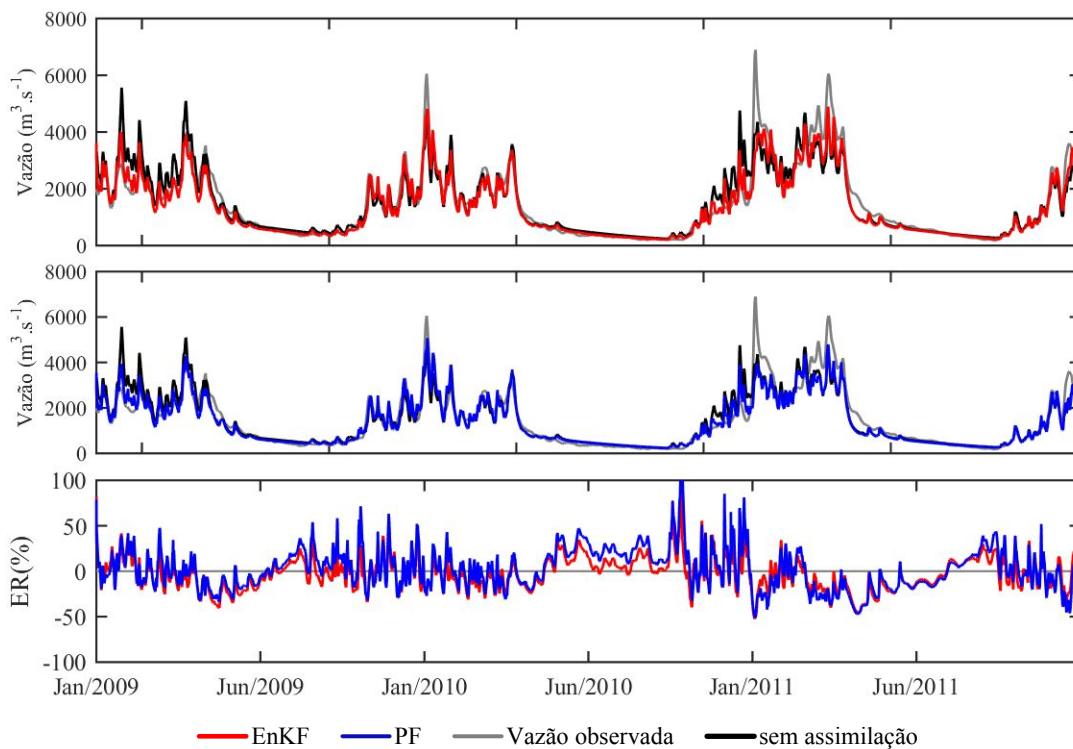


Figura 4.51 Hidrogramas de vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e Erro relativo (%) para Peixe Angical sem assimilação e com assimilação EnKF e PF assimilando nas estações Lajeado e Estreito.

A Figura 4.52 mostra os hidrogramas das vazões para a estação Lajeado, observa-se que a série de valores de erro relativo varia numa faixa de -50% a +50%. A variação do erro relativo não discrimina os meses, úmido ou seco, apresentando, inclusive uma maior variação positiva nos meses de estiagem (junho/2009 e Junho/2010). As vazões máximas durante verão de 2011 não conseguem ser assimiladas pelo modelo PF nem EnKF, sendo subestimadas nesse período.

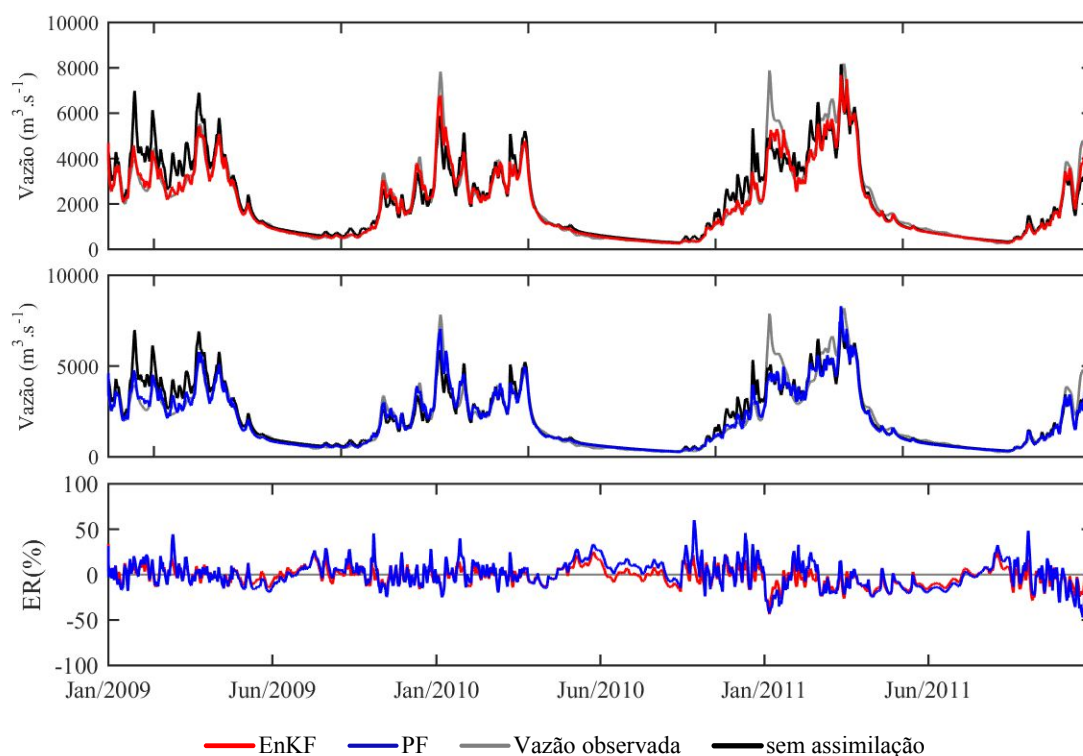


Figura 4.52 Hidrogramas de vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e Erro relativo (%) para Lajeado no período de 2009-2011 sem assimilação e com assimilação EnKF e PF.

A Figura 4.53 mostra os resultados de vazão e erro relativo para Estreito, nesse caso não existe uma clara diferença entre ambas as técnicas de assimilação entre o período de Janeiro de 2009 até Janeiro de 2011, sendo que ambas as técnicas mostraram erros relativamente semelhantes. Porém, no início do ano 2011, a assimilação com EnKF conseguiu assimilar melhor as vazões observadas comparado com PF, obtendo este último, erros relativos de vazão superando o valor de +100%.

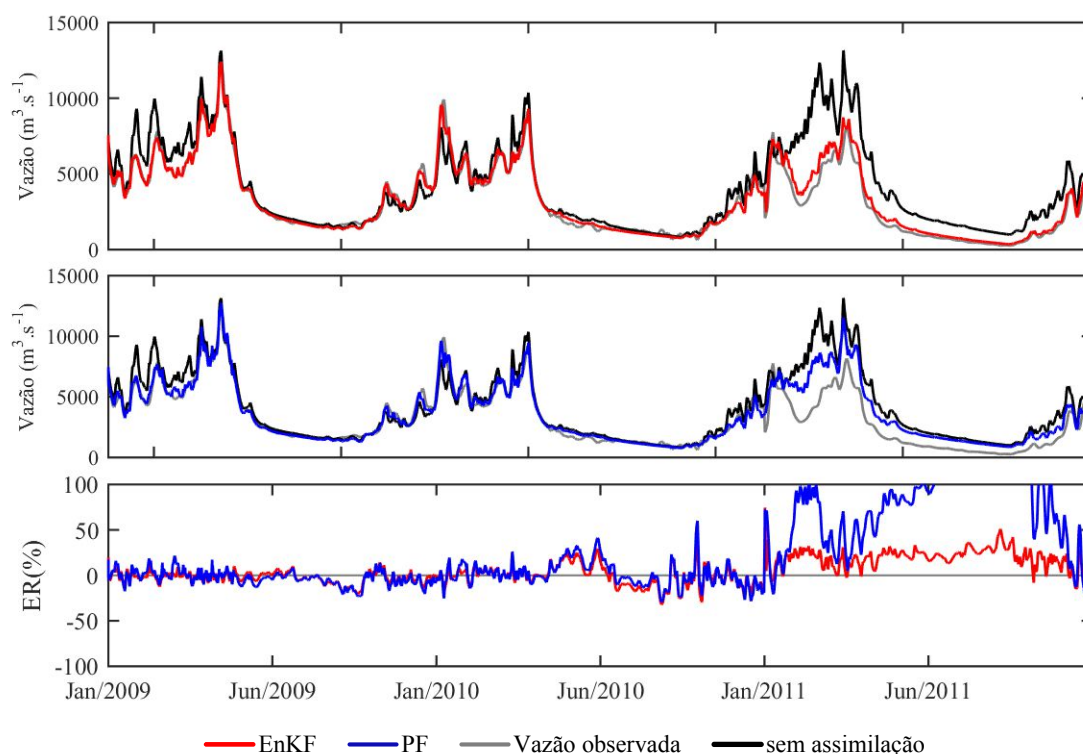


Figura 4.53 Hidrogramas de vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e Erro relativo (%) para Estreito no período de 2009-2011 sem assimilação e com assimilação EnKF e PF.

Em relação ao custo computacional das três técnicas de assimilação de dados durante o período selecionado para análise de transferência de informação, esta apresentou-se variável. A técnica AsMGB sendo um modelo determinístico tomou um tempo de processamento em torno de 20 minutos. Já para as técnicas de assimilação de dados do tipo sequencial, por serem modelos probabilísticos, onde são feitas várias simulações em cada intervalo de tempo, o processamento foi maior comparado com AsMGB. O tempo de processamento para EnKF foi de aproximadamente 4 horas e com PF de 5 horas.

4.8 Previsão de vazão

A metodologia proposta na presente tese sobre a previsão de vazões é dividida em duas partes. A primeira parte analisa as diferentes fontes de precipitação observada e sua influência na previsão de vazões em termos estatísticos usando a técnica de assimilação AsMGB; a segunda parte utiliza uma única fonte de precipitação (MERGEHQ) para avaliar a técnica de assimilação por PF (filtro de Partículas); seus resultados são comparados com a técnica de filtro Kalman por conjunto (EnKF) e com a técnica de assimilação acoplada ao modelo MGB-IPH (AsMGB). As estações consideradas para essa análise são os locais com

usinas, ou seja, aquelas que estão localizadas no curso principal do rio Tocantins. Para todos os casos, a avaliação é feita em termos estatísticos com Nash-Sutcliffe (NS), raiz do erro quadrático médio (EQMR), coeficiente de determinação (CC), coeficiente de persistência (CP) e uma análise visual dos hidrogramas de previsão.

4.8.1 Previsão de vazões para diferentes fontes de precipitação

A Figura 4.54 mostra os hidrogramas das vazões naturalizadas das estações Cana Brava, São Salvador, Peixe Angical, Lajeado e Estreito mostrando o período de análise de previsão sendo de 1/1/2013 até 14/3/2014 a passo de tempo horário. A análise levou a realizar 10.500 reinicializações de previsão, todas com um horizonte de 336 horas (14 dias) e com frequência de 1 hora de previsão.

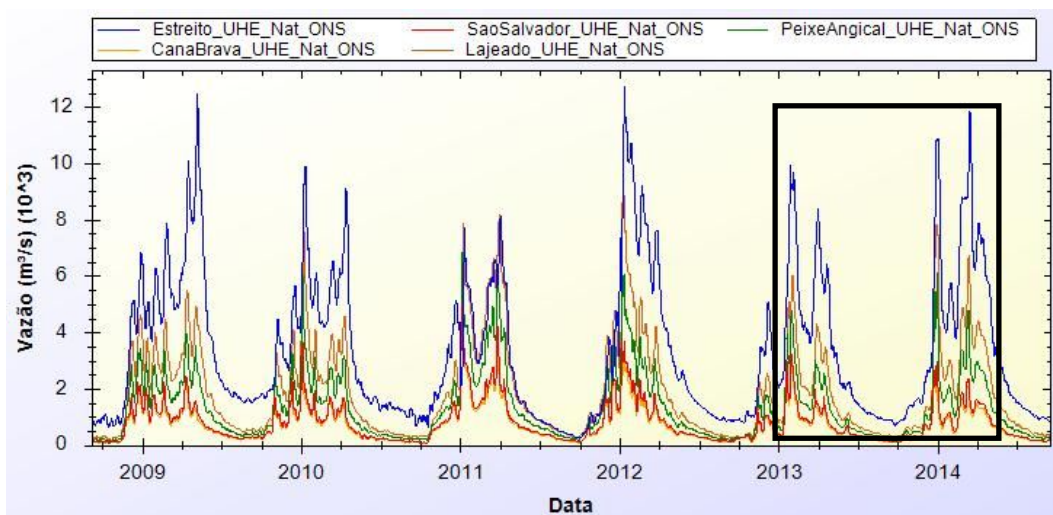


Figura 4.54 Série de vazões naturalizadas marcando o período de análise para previsão com AsMGB durante Jan/2013 até Mar/2014 nos locais com usinas no curso principal do rio Tocantins.

A Figura 4.55, Figura 4.56 e Figura 4.57 mostram as medidas de desempenho estatístico para Serra da Mesa, Cana Brava e São Salvador, respectivamente. Quando a precipitação é considerada perfeita, as duas bases de precipitação combinada (CHUVSAT e MERGEHQ) e a precipitação estimada por satélite no modelo de previsão mostram-se superior à precipitação por telemetria. Entre as duas fontes de precipitação combinada, MERGEHQ é superior a CHUVSAT em todos os intervalos de tempo de antecedência. A eficiência NS é baixa quando é usada precipitação por telemetria no modelo de previsão, atingindo o valor de 0,50 nas primeiras 48 horas de antecedência.

O erro para as fontes de precipitação por satélite e combinada forçado ao modelo de previsão chega próximo de $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ comparado ao erro que apresenta Telemetria com valores superiores a $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Em relação ao CC, apresenta-se em torno ao valor de 0,80, o que significa um alto nível de linearidade nas vazões observadas e previstas quando é forçada a precipitação por telemetria no modelo de previsão. Em relação aos resultados do CP, observa-se que existe ganho evidente em se utilizar as previsões com o modelo hidrológico para antecedências posteriores às 48 horas quando se trabalha com precipitação combinada e estimada de satélite. Para o caso de telemetria, o ganho aparece posterior às 144 horas (no caso de São Salvador). Quando a precipitação é considerada nula, como é esperado o desempenho em termos de eficiência, erro e correlação linear diminuem rapidamente nas primeiras 100 horas de antecedência, aproximadamente. Os resultados em Serra da Mesa, Cana Brava e São Salvador usando precipitação combinada mostraram-se mais confiáveis comparados aos de satélite. Pode-se considerar um ganho considerando previsões de médio prazo. No entanto, usando dados de TELEMETRIA houve pouca vantagem em uma análise de previsão de vazão. Um dos motivos pelo qual não são confiáveis pode ser devido às poucas estações telemétricas que cobrem essa região, apenas três estações da rede de INMET situadas sobre uma área de aproximadamente 60.000 km^2 .

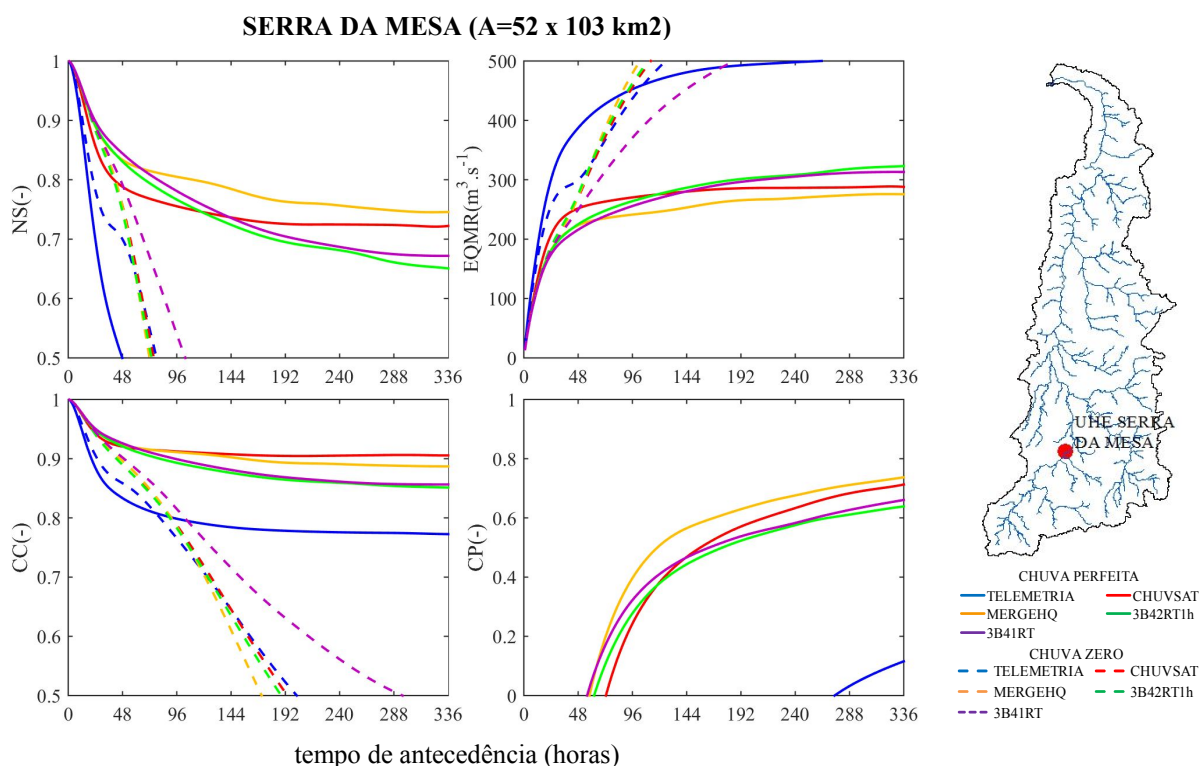


Figura 4.55 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para a estação Serra da Mesa usando chuva perfeita em linha contínua e chuva zero em linha tracejada.

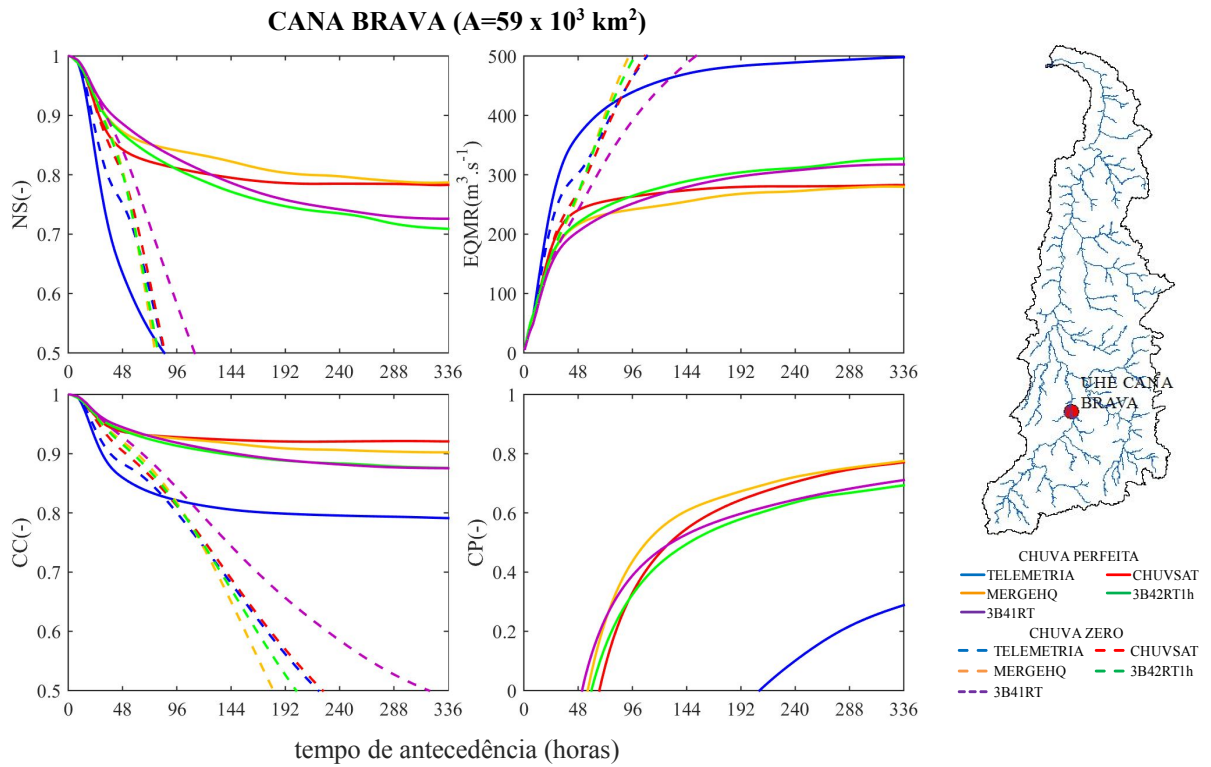


Figura 4.56 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para a estação Cana Brava usando chuva perfeita em linha contínua e chuva zero em linha tracejada.

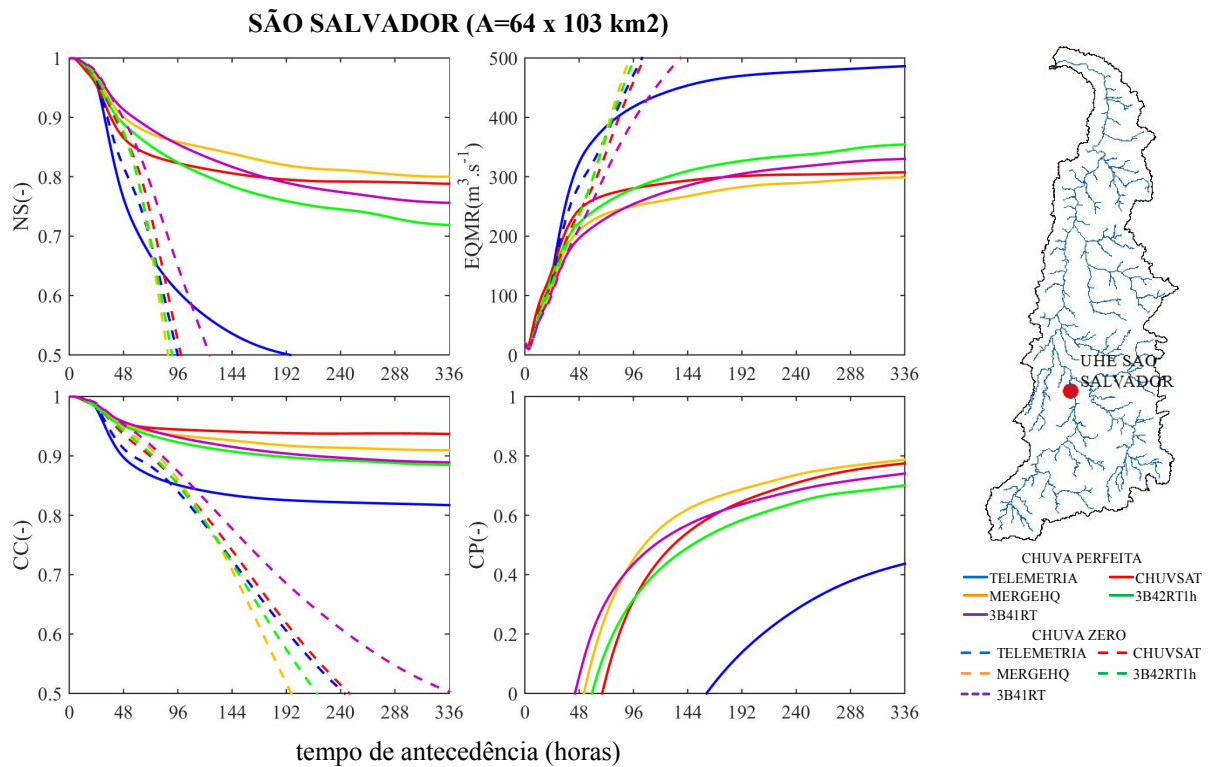


Figura 4.57 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para a estação São Salvador usando chuva perfeita em linha contínua e chuva zero em linha tracejada.

Os resultados dos testes estatísticos em Peixe Angical são mostrados na Figura 4.58. Quando a precipitação é considerada perfeita, o desempenho no coeficiente de eficiência da Nash-Sutcliffe para simulação de previsão com precipitação combinada (CHUVSAT e MERGEHQ) mostrou-se superior comparado com o resto das fontes de precipitação para depois das 96 horas de antecedência. Usando precipitação observada por telemetria os resultados ficaram inferiores ao resto das fontes de precipitação. Porém as primeiras 48 horas de antecedência todas as fontes de precipitação tiveram a mesma eficiência. Quando a precipitação é considerada nula, como é esperado o desempenho em termos de eficiência diminuem rapidamente para valores a 0.50 após 96 horas de antecedência.

Os erros na vazão superaram o $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ após as 48 horas de antecedência. Em relação ao coeficiente de correlação linear, esse valor apresenta-se superior ao valor de 0,90 o qual significa uma alta linearidade nas vazões observadas e previstas. Em relação aos resultados do coeficiente de persistência, observa-se que existe ganho evidente em se utilizar as previsões com o modelo hidrológico para antecedências posteriores a 48 horas, no caso de telemetria apresenta-se posterior às 50 horas.

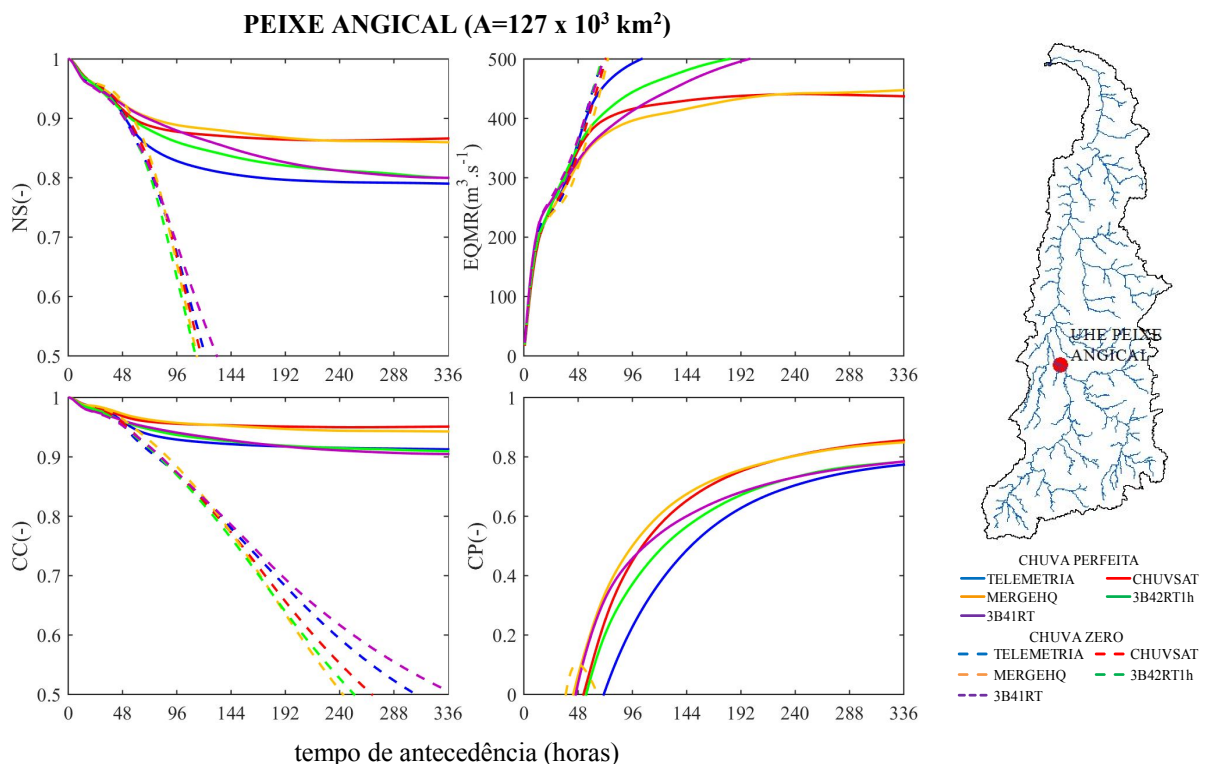


Figura 4.58 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para a estação Peixe Angical usando chuva perfeita em linha contínua e chuva zero em linha tracejada.

Figura 4.59 mostra os resultados de eficiência e erro na usina Lajeado. Quando a precipitação é considerada perfeita o desempenho na eficiência de Nash-Sutcliffe para a precipitação com telemetria e uma fonte de precipitação por satélite se mostraram superiores após as 72 horas de antecedência. Para as primeiras 48 horas de antecedência, a eficiência de Nash-Sutcliffe mostrou-se similar para todas as fontes de precipitação analisadas. Quando a precipitação é considerada nula, como é esperado o desempenho em termos de eficiência diminuem rapidamente nas primeiras horas de antecedência.

Os erros na vazão superaram o $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ após as 48 horas de antecedência. Em relação ao coeficiente de correlação linear, este valor apresenta-se superior ao valor de 0,90 o qual significa um alto nível de linearidade nas vazões observadas e previstas. Em relação aos resultados do coeficiente de persistência, observa-se que existe ganho evidente em se utilizar as previsões com o modelo hidrológico para antecedências posteriores às 48 horas, no caso de usar MERGEHQ ficou posterior às 50 horas.

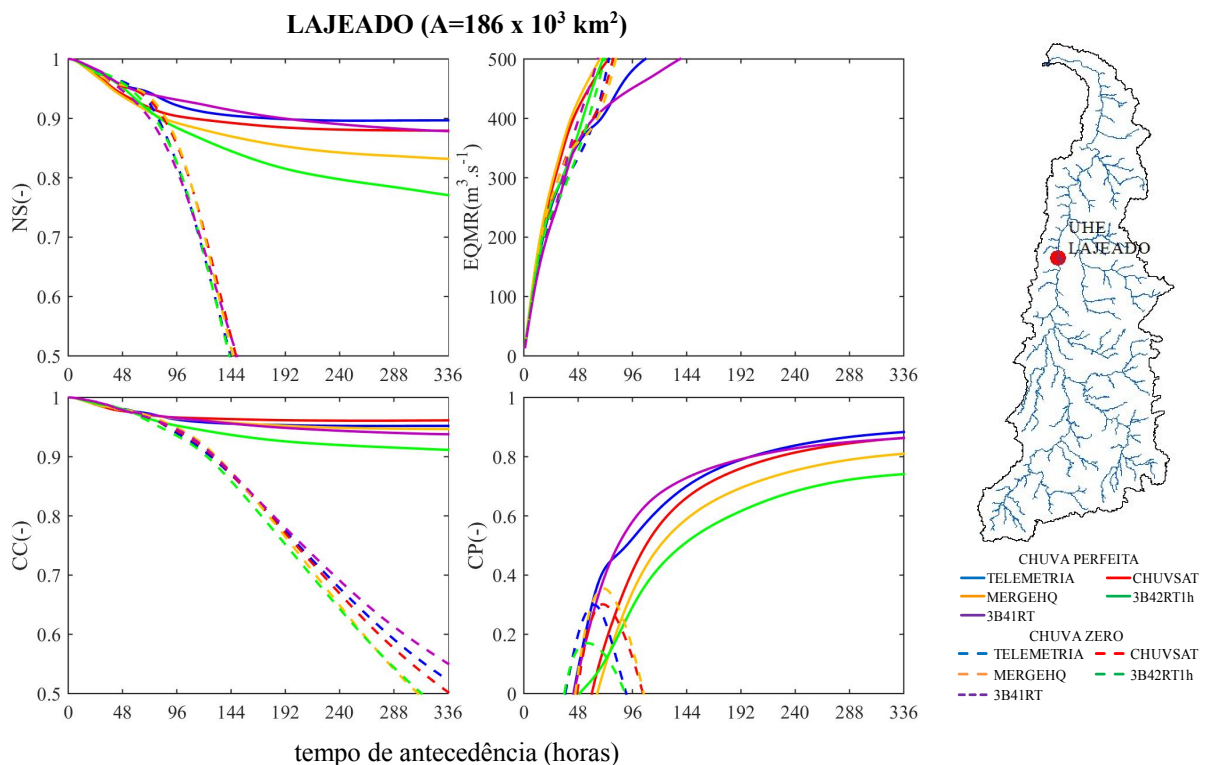


Figura 4.59 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para a estação Lajeado usando chuva perfeita em linha contínua e chuva zero em linha tracejada.

O resultado em Estreito é mostrado na Figura 4.60. Quando a precipitação é considerada perfeita, as duas fontes de precipitação combinada (CHUVSAT e MERGEHQ) e a precipitação estimada por satélite 3B42RT1h mostraram uma ligeira vantagem com melhor

desempenho comparado à outra fonte de precipitação por satélite (3B41RT) e observado por telemetria, para as primeiras 96 horas de antecedência, aproximadamente. Após esse intervalo, as fontes de precipitação combinada e observada por telemetria apresentam melhor desempenho na eficiência NS superando o valor de 0,9, aproximadamente. Enquanto que a eficiência para as fontes de precipitação por satélite atingem valores de eficiência inferior a 0,90 e superior a 0,80. Quando a precipitação é considerada nula, como é esperado o desempenho em termos de eficiência diminuem nas primeiras horas de antecedência.

O termo da raiz do erro quadrático médio mostra erros superiores a $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para todos os casos de precipitação posterior às 24 horas de antecedência. Em relação ao coeficiente de correlação linear, esse valor apresenta-se superior ao valor de 0,90, o qual significa um alto nível de linearidade nas vazões observadas e previstas. Em relação aos resultados do coeficiente de persistência, observa-se que existe ganho evidente em se utilizar as previsões com o modelo de previsão para antecedências posteriores às 24 horas, aproximadamente.

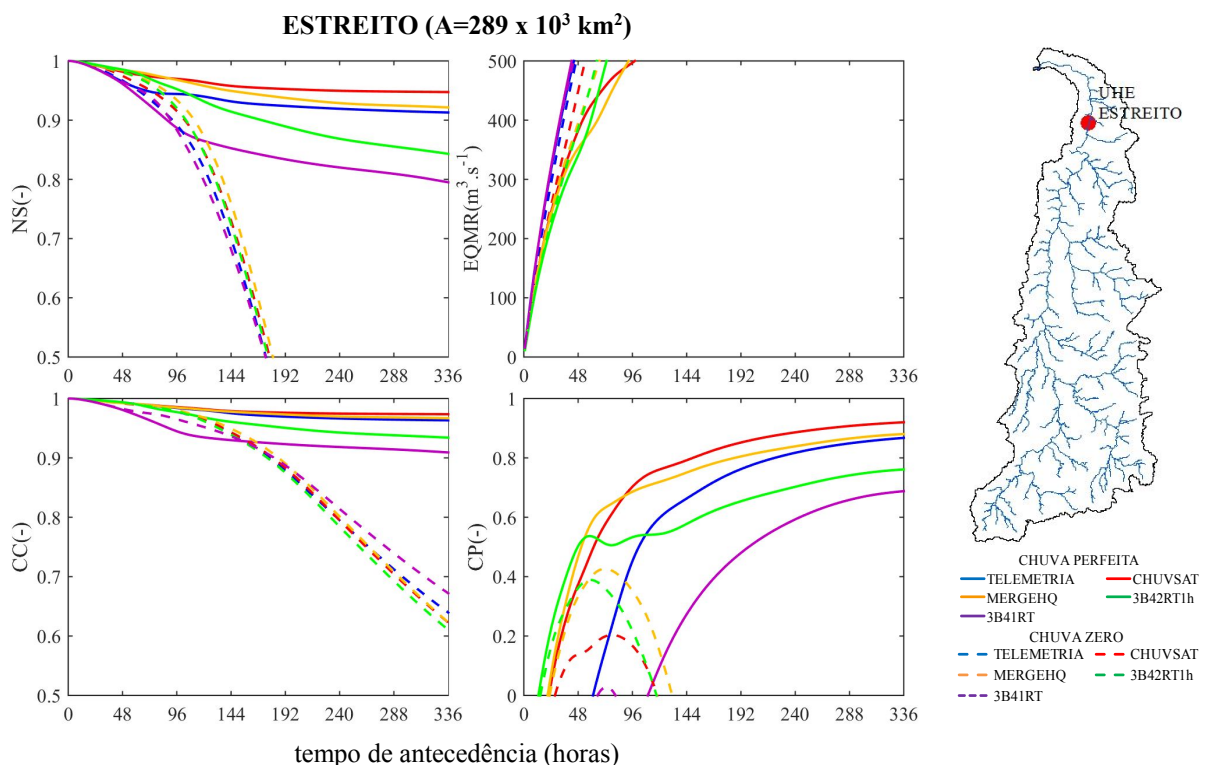


Figura 4.60 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para a estação Estreito usando chuva perfeita em linha contínua e chuva zero em linha tracejada.

A Figura 4.61 mostra os hidrogramas de previsão usando precipitação observada perfeita. Essas figuras mostram as previsões para um intervalo de tempo determinado comparado com vazão naturalizada nos locais com usinas que por praticidade no texto é mencionado de vazão observada. As previsões mostradas na Figura 4.61 em Serra da Mesa, Cana Brava e São Salvador iniciou o dia 4/3/2014 às 5:00 e para Peixe Angical, Lajeado e Estreito iniciou o dia 22/12/13 às 0:00.

A previsão de vazões na estação São Salvador com precipitação combinada MERGEHQ e CHUVSAT mostraram um melhor ajuste com as vazões observadas. A previsão com a precipitação por satélite apresentou superestimação e com a precipitação por Telemetria apresentou subestimação comparado com as vazões observadas.

No caso das previsões em Peixe Angical, analisou-se um período com dois picos de vazão máxima observando que a previsão com todas as fontes de precipitação apresentaram um adequado seguimento às vazões observadas, tendo um melhor ajuste com a precipitação MERGEHQ no primeiro pico de vazão máxima.

Para Lajeado, com o início de previsão marcado no hidrograma, a previsão com precipitação combinada (CHUVSAT, MERGEHQ) e estimada por satélite (3B41RT) conseguiram atingir mais próximo à vazão observada máxima. A vazão de previsão com precipitação por telemetria e precipitação estimada 3B42RT1h se mostraram subestimadas. Para Estreito, a previsão com precipitação por satélite 3B41RT consegue um bom seguimento da vazão observada nas primeiras de previsão com uma tendência à superestimação e as previsões com precipitação combinada (CHUVSAT, MERGEHQ), precipitação por telemetria e a precipitação por satélite 3B42RT1h apresentam-se subestimando a vazão observada.

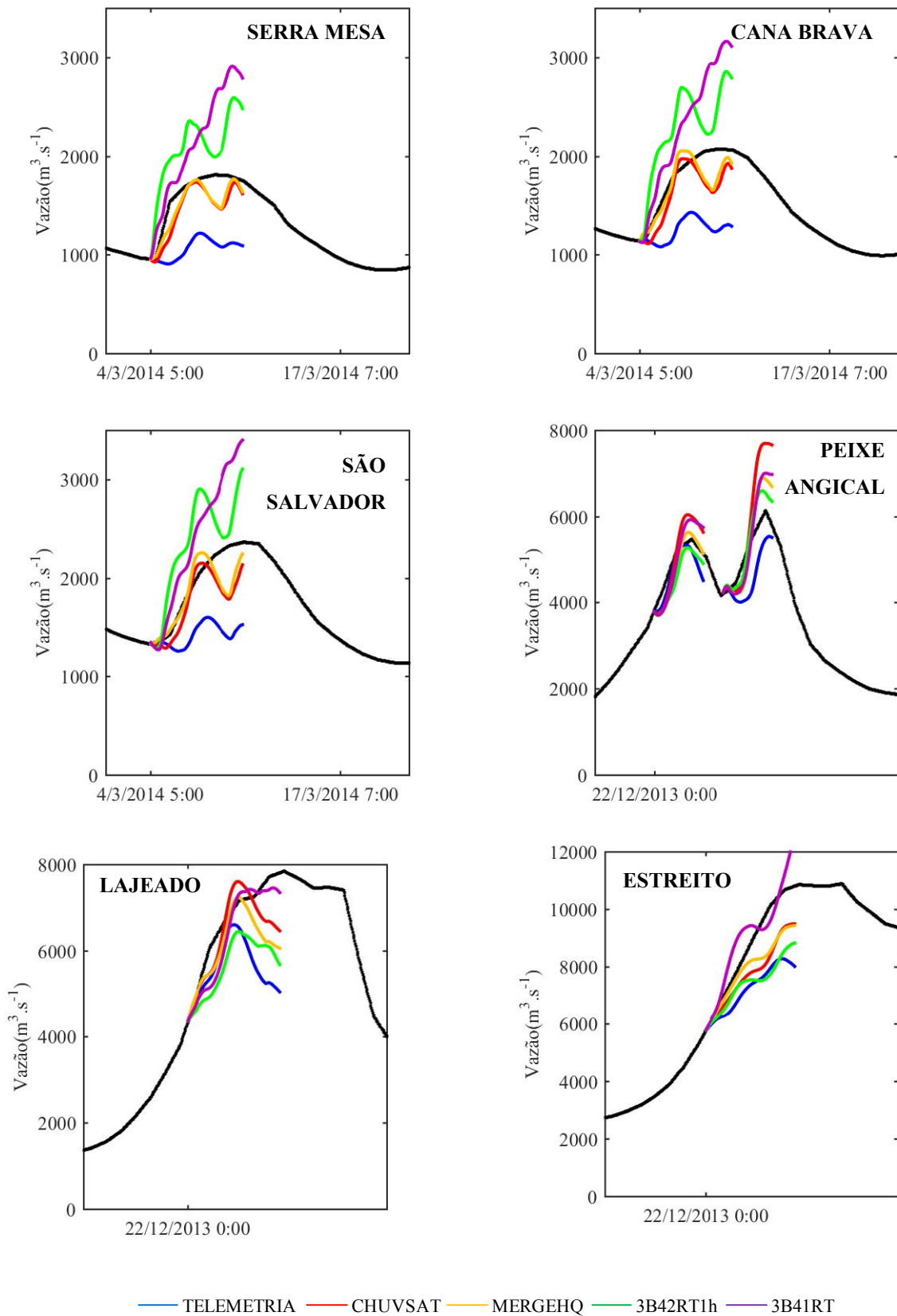


Figura 4.61 Hidrogramas da previsão de vazão com horizonte de previsão de 336 horas (14 dias) para estações com usinas em Serra da Mesa, Cana Brava, São Salvador, Peixe Angical, Lajeado e Estreito.

4.8.2 Previsão de vazões aplicando técnicas de assimilação PF, EnKF e AsMGB

4.8.2.1 Período Janeiro/2013 – Maio/2013

A Figura 4.62 mostra os hidrogramas das vazões naturalizadas das estações Cana Brava, São Salvador, Peixe Angical, Lajeado e Estreito mostrando o período de análise de previsão 1/1/2013 até 15/5/2013 3240 no passo de tempo horário. A análise levou a realizar 3.575 reinicializações de previsão, todas com um horizonte de 144 horas (6 dias) e com frequência de 1 hora de previsão.

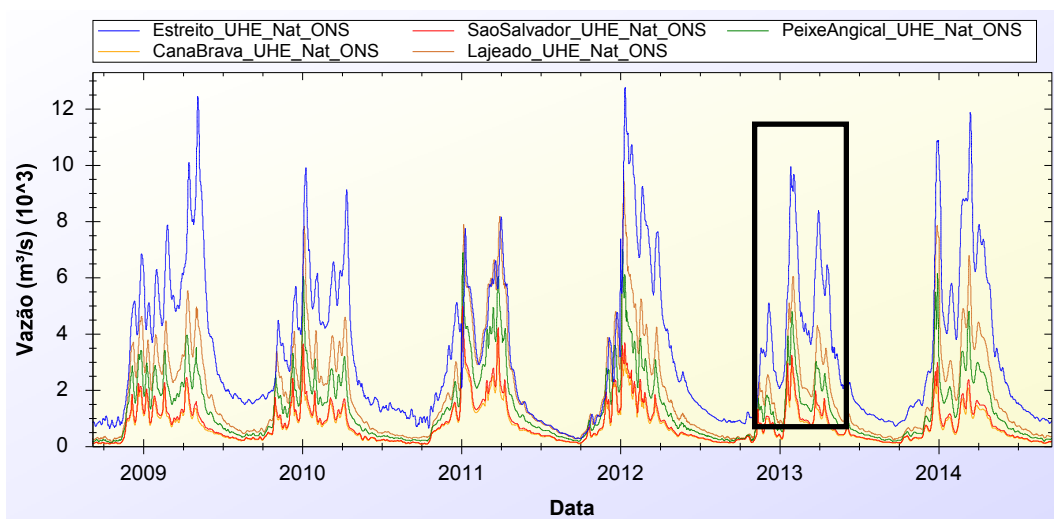


Figura 4.62 Série de vazões naturalizadas para a análise de previsão com PF e EnKF durante o período de Dez/2012 até Maio/2013 nos locais com usinas no curso principal do rio Tocantins.

As Figura 4.63, Figura 4.64, Figura 4.65, Figura 4.66, Figura 4.67 e Figura 4.68 mostram os resultados do desempenho estatístico de NS, EQMR, CC e CP usando técnicas de assimilação PF, EnKF, AsMGB e sem assimilação em Serra da Mesa, Cana Brava, São Salvador, Peixe Angical, Lajeado e Estreito, respectivamente. Em geral, para todos os casos, o acoplamento das técnicas de assimilação no modelo de previsão hidrológica, o desempenho estatístico melhorou comparado com o desempenho estatístico de não assimilar no período de análise indicado.

Para São Salvador, os resultados de eficiência de NS apresentou um ganho após as 24 horas de antecedência para EnKF e após as 72 horas de antecedência a eficiência de NS de AsMGB é mantido igual com PF, superior a 0,60. O coeficiente de correlação mostra-se com

alta correlação sendo superior a 0,80, esse termo não mostra uma igualdade em valores, mas sim, uma alta relação linear entre eles. O valor de coeficiente de persistência ganha força com valores positivos a partir das 48 horas de antecedência, sendo que o modelo de previsão com EnKF e PF torna-se com maior vantagem a partir desse intervalo.

Os resultados em Peixe Angical e Lajeado mostram que a eficiência NS é superior a de EnKF e PF comparado com AsMGB após as 24 horas e 48 horas de antecedência, respectivamente. O erro nas vazões assimiladas com PF e EnKF são menores comparados com AsMGB após as 48 horas. O coeficiente de correlação é alto para as três técnicas de assimilação e o coeficiente de persistência, mostra-se com mais vantagem para EnKF, seguido de PF e último AsMGB. A Figura 4.68 mostra os resultados de Estreito e é o último local a jusante com maior área de drenagem. Os valores de NS para a técnica EnKF mostra ser superior após 72 horas, aproximadamente, e PF tendem a ser superior ao AsMGB após as 120 horas. Os erros na vazão são menores para EnKF comparado com PF e sua correlação linear comparável a AsMGB mostra-se maior a 0,90. Enquanto, os resultados de CP mostram maior vantagem usando o modelo de previsão com AsMGB, seguido de EnKF e PF.

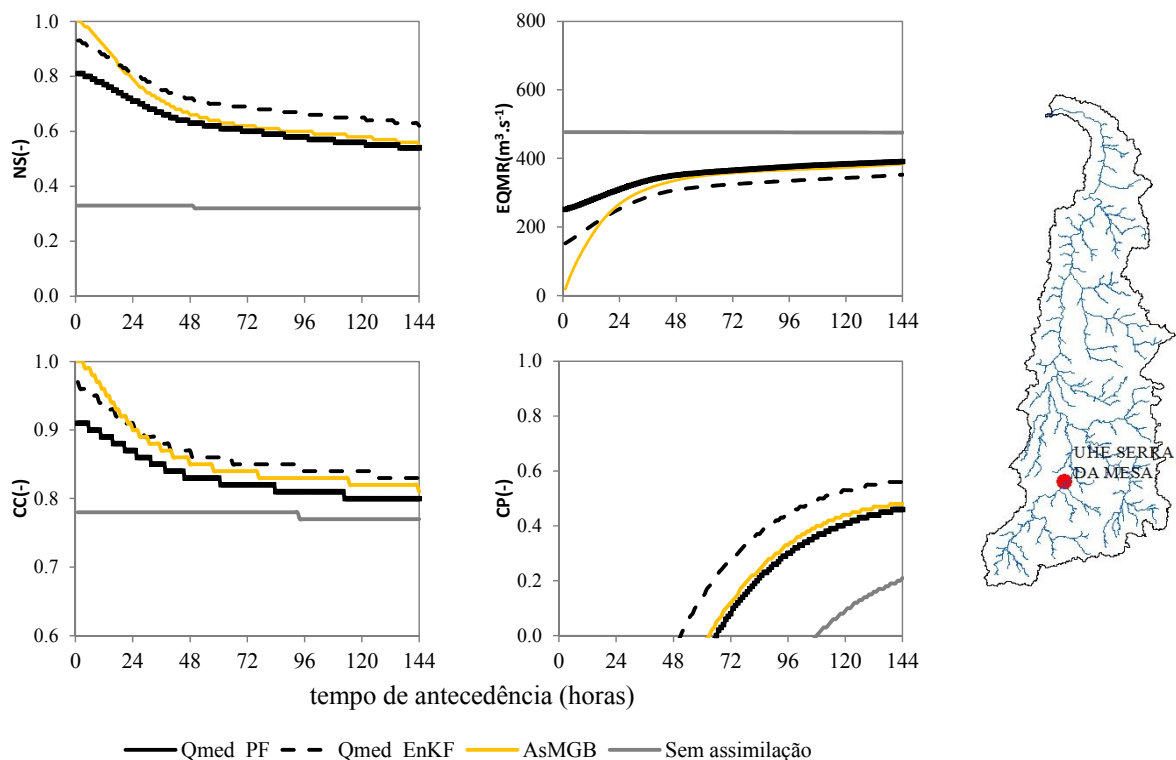


Figura 4.63 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para Serra de Mesa usando assimilação de dados PF, EnKF e AsMGB.

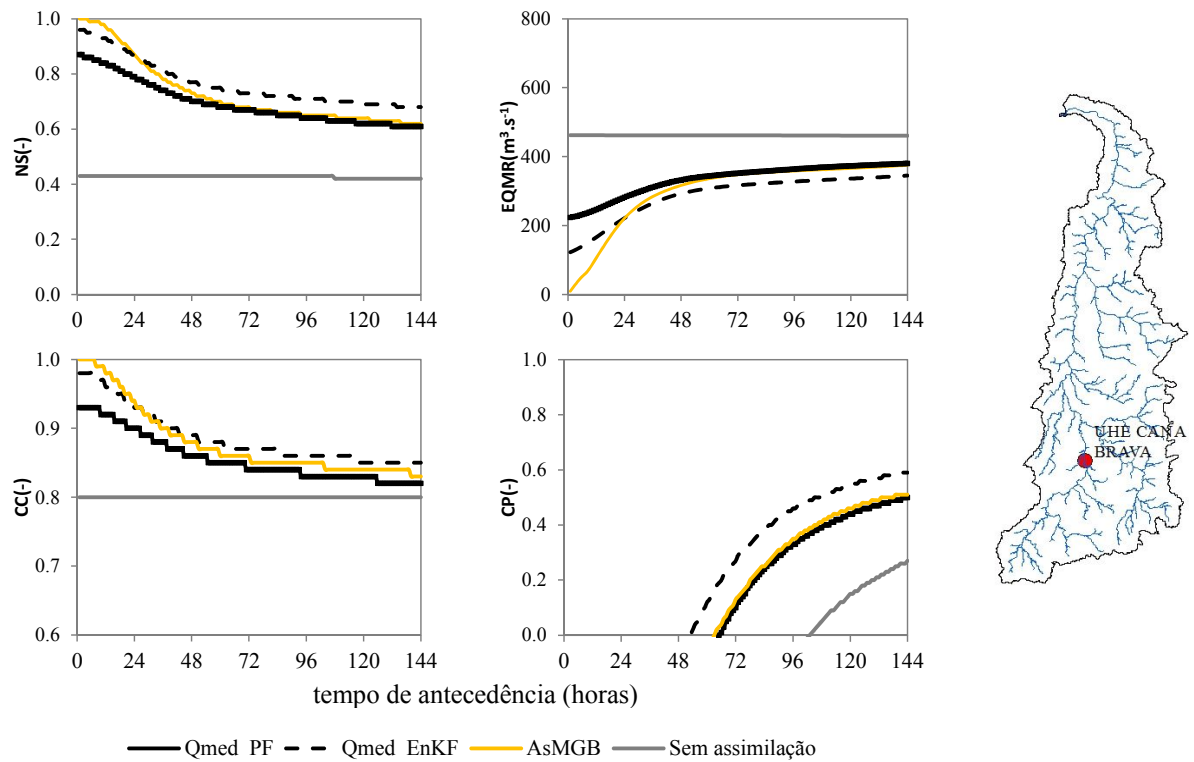


Figura 4.64 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para Cana Brava usando assimilação de dados PF, EnKF e AsMGB.

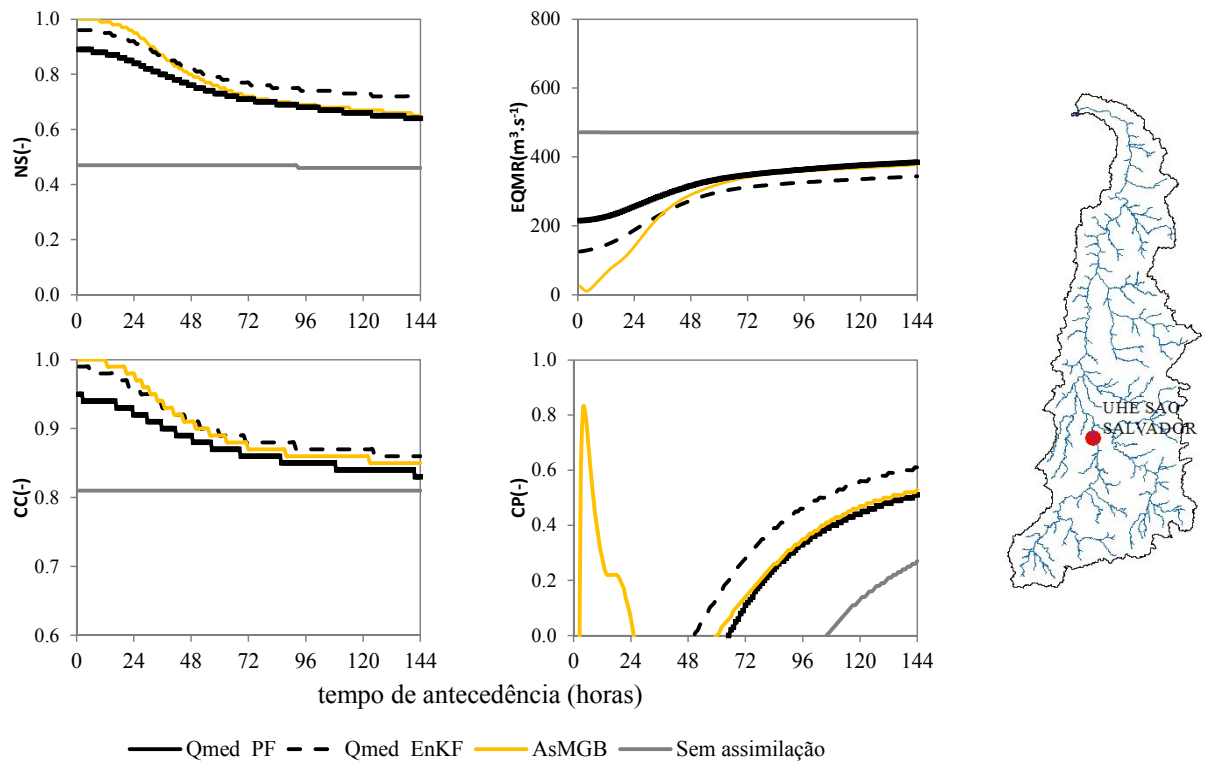


Figura 4.65 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para El Salvador usando assimilação de dados PF, EnKF e AsMGB.

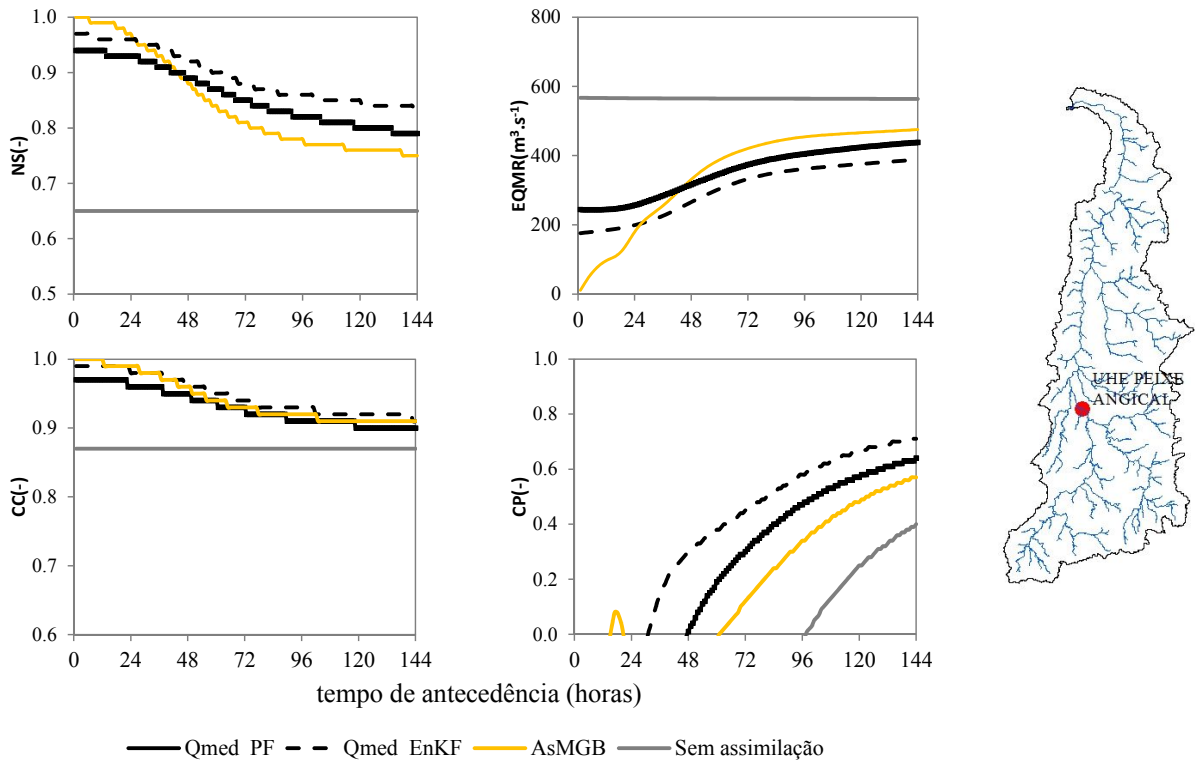


Figura 4.66 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para Peixe Angical usando assimilação de dados PF, EnKF e AsMGB.

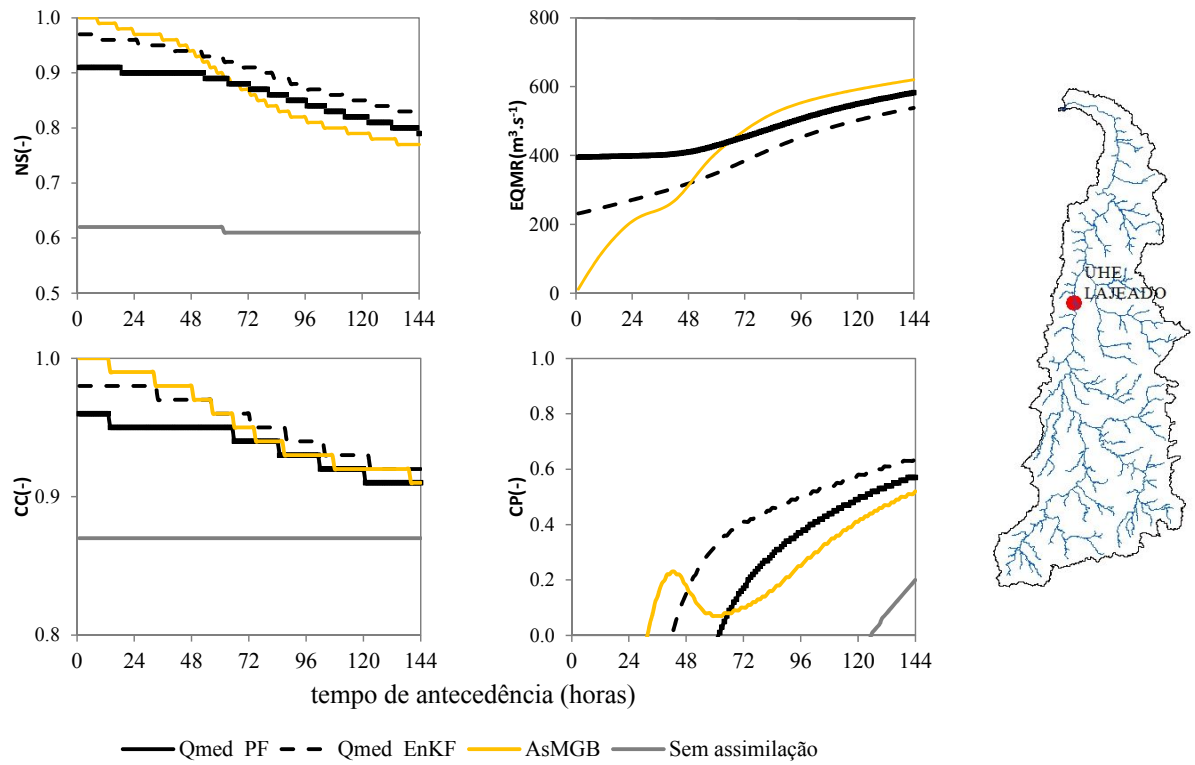


Figura 4.67 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para Lajeado usando assimilação de dados PF, EnKF e AsMGB.

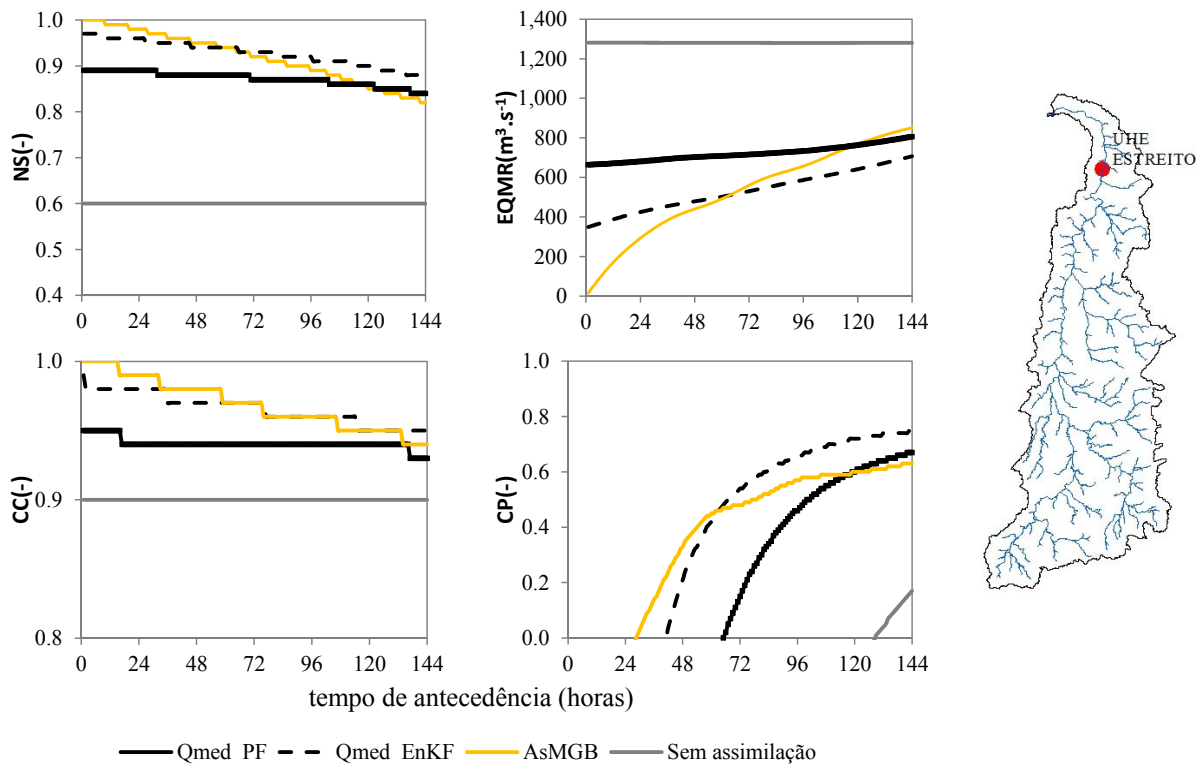


Figura 4.68 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para Estreito usando assimilação de dados PF, EnKF e AsMGB.

A Figura 4.69 mostra as previsões de vazão para as três técnicas de assimilação de dados AsMGB, PF e EnKF em São Salvador, Peixe Angical, Lajeado e Estreito. As previsões foram feitas nos dias 16/1/2013 e 26/1/2013 para São Salvador e Peixe Angical e os dias 18/1/2013 e 27/1/2013 para Lajeado e para Estreito os dias 20/1/2013 e 28/1/2013. Observe-se que as previsões com AsMGB apresenta uma boa aproximação com as vazões máximas mostradas em Serra da Mesa, Cana Brava, Peixe Angical e Lajeado. Em São Salvador, as previsões apresentadas possuem ter um decaimento da vazão nos primeiros intervalos de tempo para depois ascender. Já para as estações de Peixe Angical, Lajeado e Estreito, existem diferenças mais significativas comparas com a vazão máxima observada. As vazões de previsão usando técnicas de assimilação por filtro EnKF e PF mostram um ligeiro afastamento do hidrograma das vazões observadas. Esse afastamento é o erro de assimilação antes do início da previsão. Só esse erro é consideravelmente ínfimo nas previsões mostradas da Figura 4.69 em Peixe Angical, Lajeado. Um erro considerável é que apresenta a previsão de vazões de PF no Estreito no dia 20/1/2013.

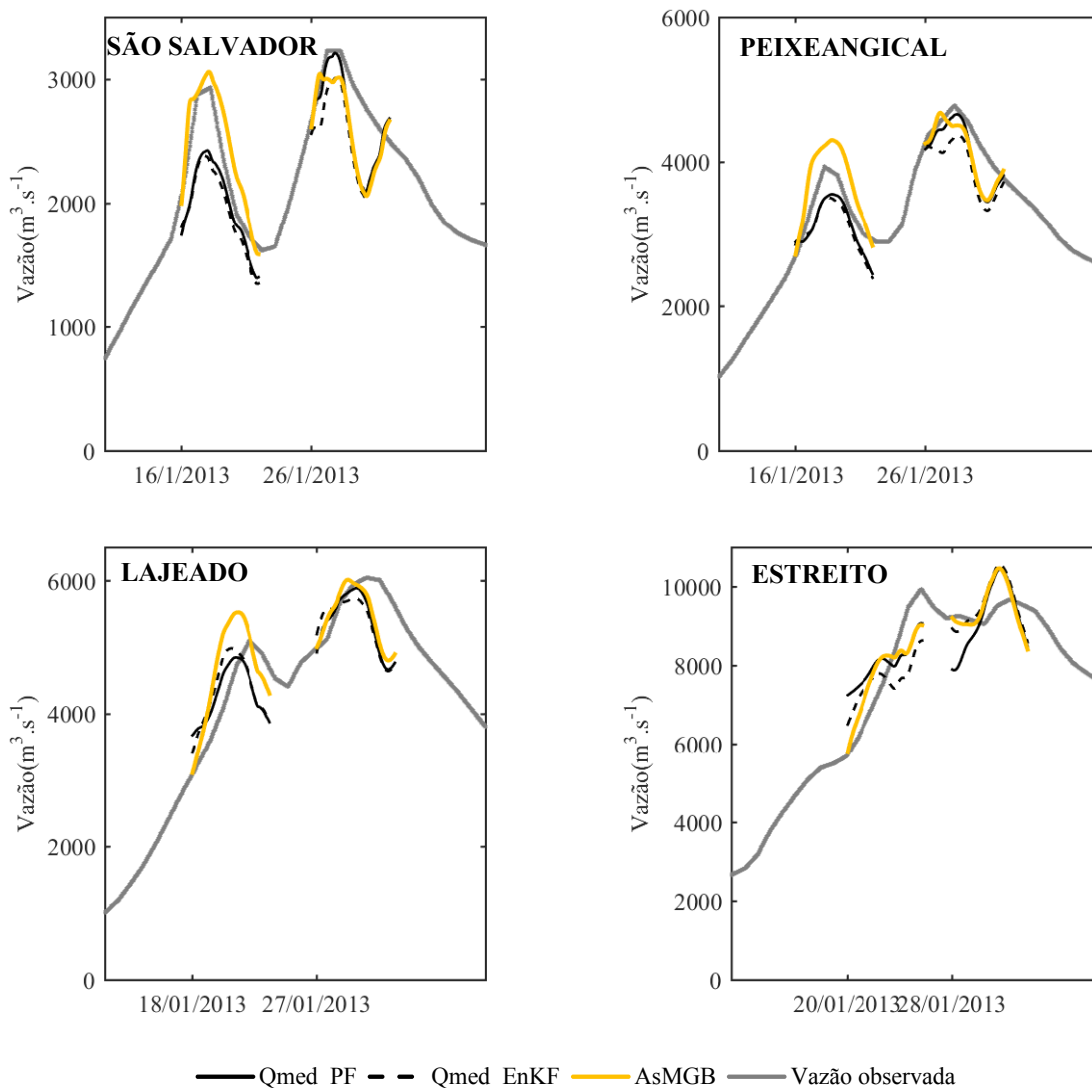


Figura 4.69 Hidrogramas da previsão de vazão com as técnicas de assimilação PF, EnKF e AsMGB, para locais com usinas em Serra da Mesa, Cana Brava, São Salvador, Peixe Angical, Lajeado e Estreito.

4.8.2.2 Período Dezembro/2013 – Março/2014

A Figura 4.70 mostra os hidrogramas com as vazões naturalizadas das estações Cana Brava, São Salvador, Peixe Angical, Lajeado e Estreito mostrando o período de análise de previsão 15/12/2013 até 15/3/2014 com 1800 reinicializações de previsão, todas com um horizonte de 144 horas (6 dias) e com frequência de 1 hora de previsão.

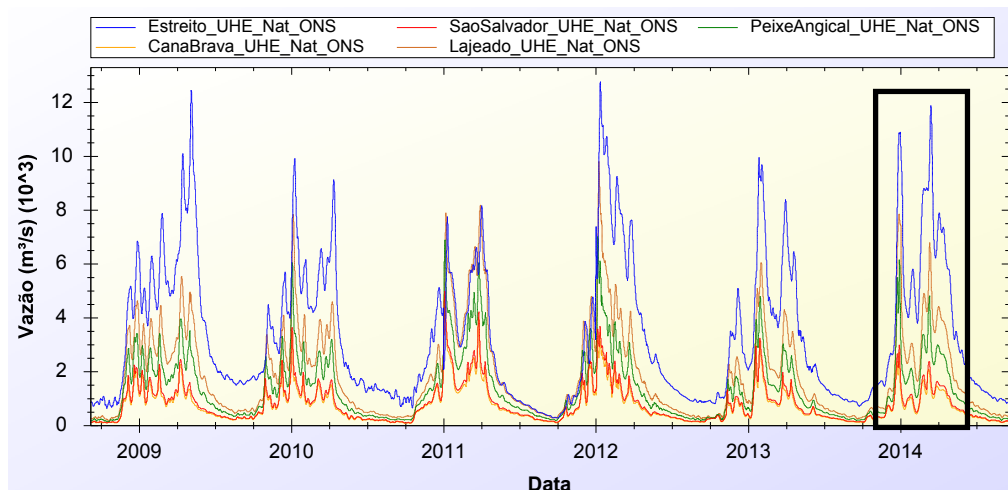


Figura 4.70 Série de vazões naturalizadas para a análise de previsão com PF e EnKF durante o período de Dez/2013 até Março/2014 nos locais com usinas no curso principal do rio Tocantins.

As Figura 4.71, Figura 4.72 e Figura 4.73 mostram os resultados do desempenho estatístico em termos de NS, EQMR, CC e CP usando técnicas de assimilação PF, EnKF, AsMGB e sem assimilação em São Salvador, Peixe Angical e Estreito, respectivamente.

Para as estações analisadas, a assimilação considerando as técnicas EnKF e PF melhorou o desempenho da eficiência NS das vazões de previsão nas primeiras 120 horas de antecedência comparado com o desempenho de não considerar a assimilação. As Figuras mostraram também, que a eficiência NS assimilando com EnKF conseguiu igualar e superar após um número intervalos de tempo à AsMGB (que apresenta eficiência de NS ótima no primeiros intervalos de tempo), sendo essa diferença mais notória para a estação Peixe Angical, onde inclusive a eficiência NS assimilando com PF, também, conseguiu superar a eficiência de AsMGB, após 24 horas de antecedencia.

A medida de desempenho de CC se mostrou alta (maior a 0,80) para todos os casos das técnicas de assimilação durante todos os intervalos de antecedência. De igual maneira o EQMR com assimilação PF e EnKF mostraram-se sempre menor comparados com os resultados de não considerar a assimilação. Com relação aos resultados do CP o modelo de previsão com EnKF teve um maior ganho comparado com PF após 48 horas de antecedência, em todos os casos de assimilação analisados, todos eles tiveram um ganho com relação a não considerar assimilação.

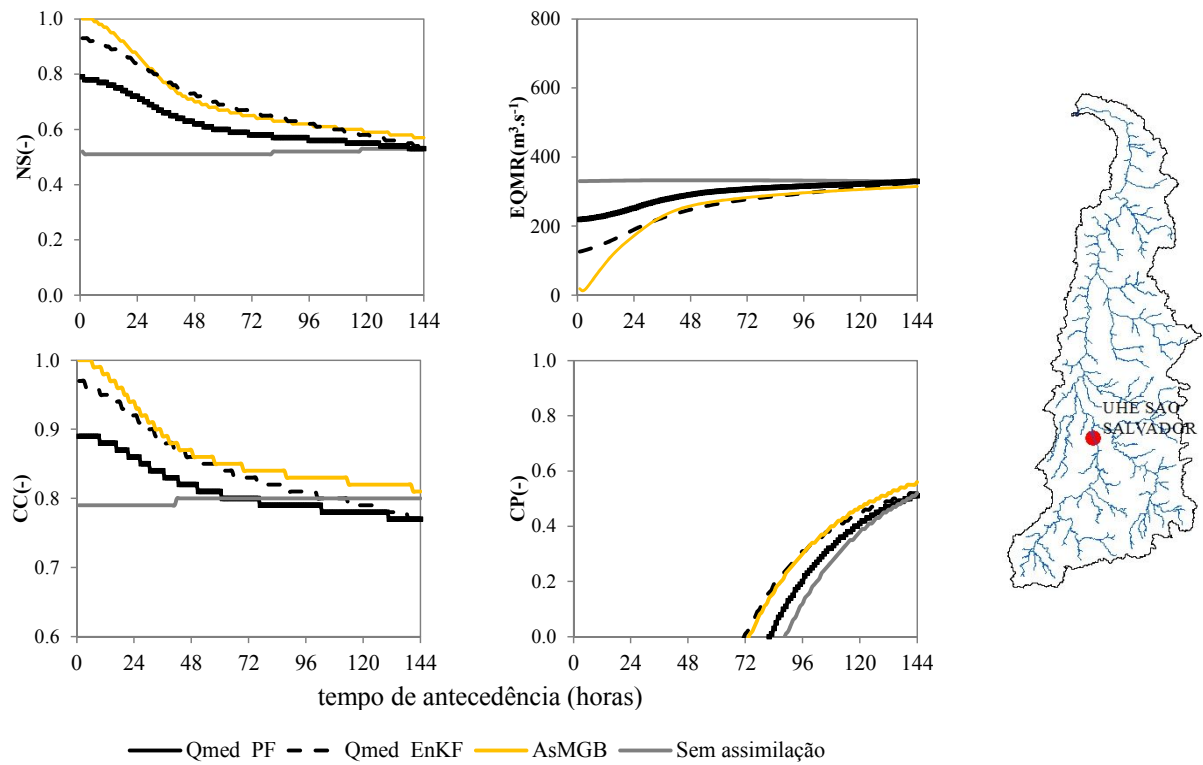


Figura 4.71 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para El Salvador usando assimilação de dados PF, EnKF e AsMGB.

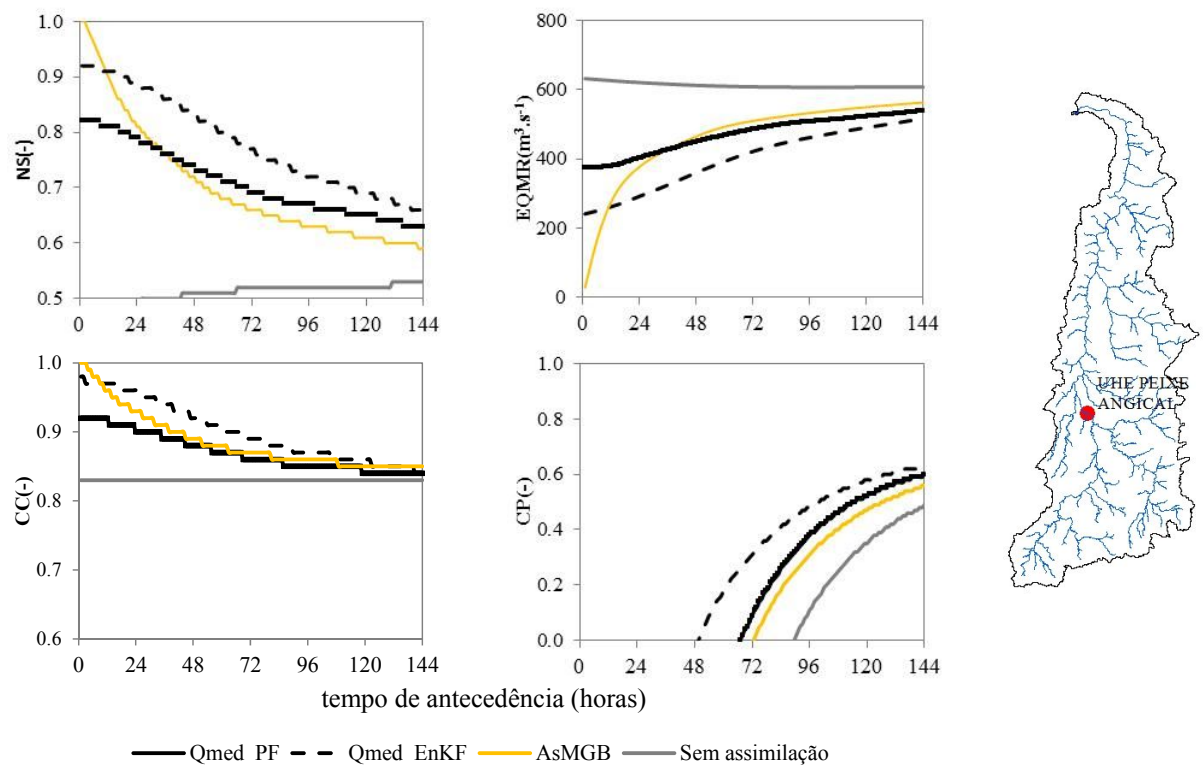


Figura 4.72 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para Peixe Angical usando assimilação de dados PF, EnKF e AsMGB.

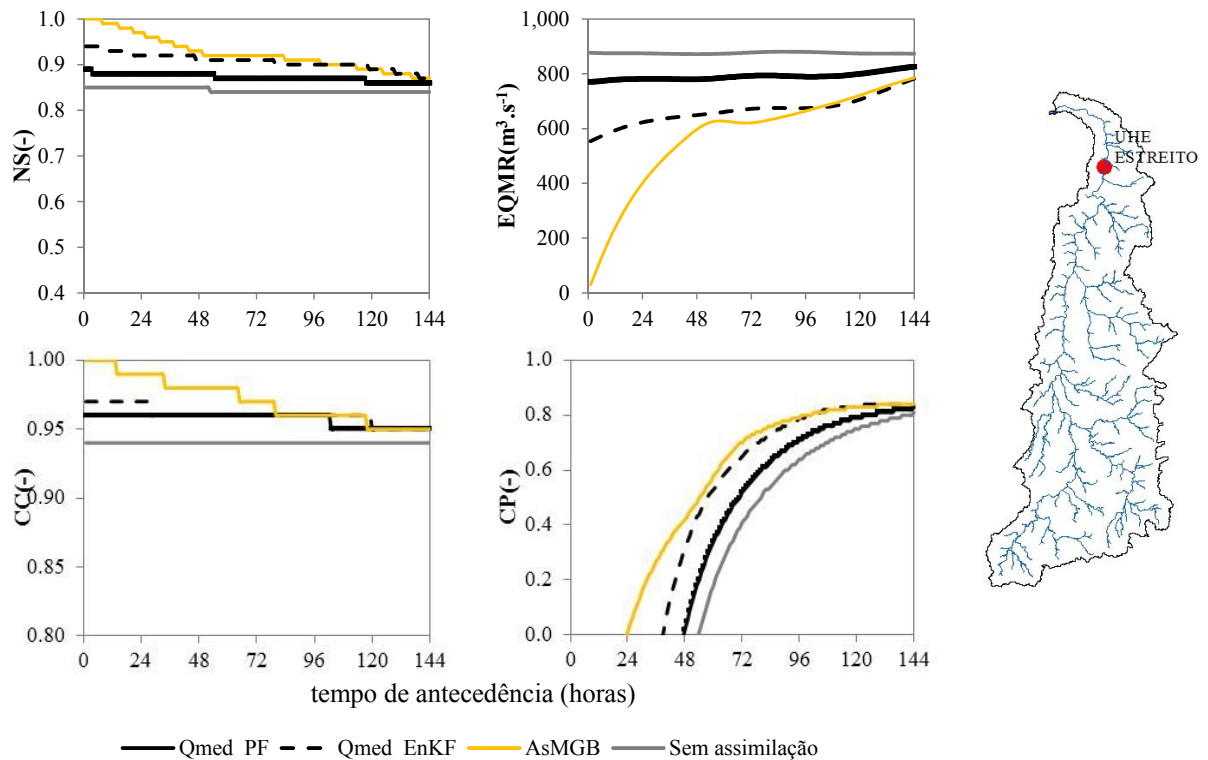


Figura 4.73 Resultados dos testes estatísticos da previsão hidrológica para Estreito usando assimilação de dados PF, EnKF e AsMGB.

As Figura 4.74 e Figura 4.75 mostram os hidrogramas nas etapas de *spin-up*, assimilação de dados e previsão no local de Estreito para verificar dois eventos de cheia, a primeira em dezembro/2013 e a segunda em março/2014, respectivamente. Os hidrogramas mostrados nessas figuras correspondem às séries temporais das vazões observadas, vazões sem assimilação, vazões assimiladas conformadas pela média do conjunto e pelo percentil 10% e 90% das vazões segundo as técnicas de assimilação PF e EnKF.

As figuras mostram a expansão das incertezas do conjunto das vazões simuladas no período de *spin-up*, maiores para o período úmido, enquanto que as incertezas diminuem no período de recessão. Isto tem sentido, pois se assume que a perturbação da precipitação varia o sistema dinâmico no modelo hidrológico com a magnitude do valor da precipitação. Ambas as técnicas de assimilação conseguem diminuir as incertezas nas vazões onde se pode observar que no período de assimilação, ocorre diminuição das incertezas nas condições iniciais no início da previsão.

As Figuras também mostram que, no início da assimilação, quando a técnica PF é aplicada no modelo de previsão a média da vazão de assimilação apresenta um comportamento mais próximo com a vazão simulada (sem assimilação) para, depois de

algumas horas, conseguir uma assimilação mais próxima à vazão observada. O contrário acontece com o início da assimilação com EnKF, onde imediatamente consegue assimilar a vazão observada. Observa-se também, que PF teve dificuldade em assimilar a primeira vazão pico apresentada no período de assimilação (Vide Figura 4.75a), porém teve uma melhor aproximação na segunda vazão pico. No período de previsão, uma análise visual mostra que a assimilação com EnKF apresenta um melhor ajuste com mais intervalos de tempo no início da previsão comparado com o ajuste apresentado por PF (Vide Figura 4.74a e Figura 4.74b).

A Figura 4.76 mostra com maior detalhe a cheia de março/2014 com previsão que inicia no dia 5/3/2014. Observa-se que a forma de hidrograma de previsão pela técnica PF antecipa a vazão máxima observada, enquanto que, com EnKF, há superestimativa. Outra observação de interesse é que, durante a etapa de assimilação observa-se que existe pouca largura da banda no percentil (10% e 90% das vazões assimiladas) calculada pelo PF. Esse fato mostrou que a técnica PF pode estar apresentando o problema de diversidade das partículas. O problema de diversidade na técnica de PF acontece quando depois de um número de intervalos de tempo após o início da assimilação, as partículas reamostradas com maiores pesos são estatisticamente selecionadas várias vezes.

Antes de acoplar a técnica de assimilação por filtro de Partículas na bacia do rio Tocantins, realizou-se um teste inicial sobre a bacia do rio das Almas, região dentro da bacia do rio Tocantins como fim de observar a diversidade das vazões em cada intervalo de tempo, onde resultados preliminares são mostrados no Anexo A2. Os resultados, nesse exemplo mostraram que a assimilação com o método de filtro de Partículas conseguiu representar vários picos de vazão máxima observada durante o período de assimilação. Uma análise visual nos hidrogramas mostrou, também, uma diversidade das vazões assimiladas em cada intervalo de tempo.

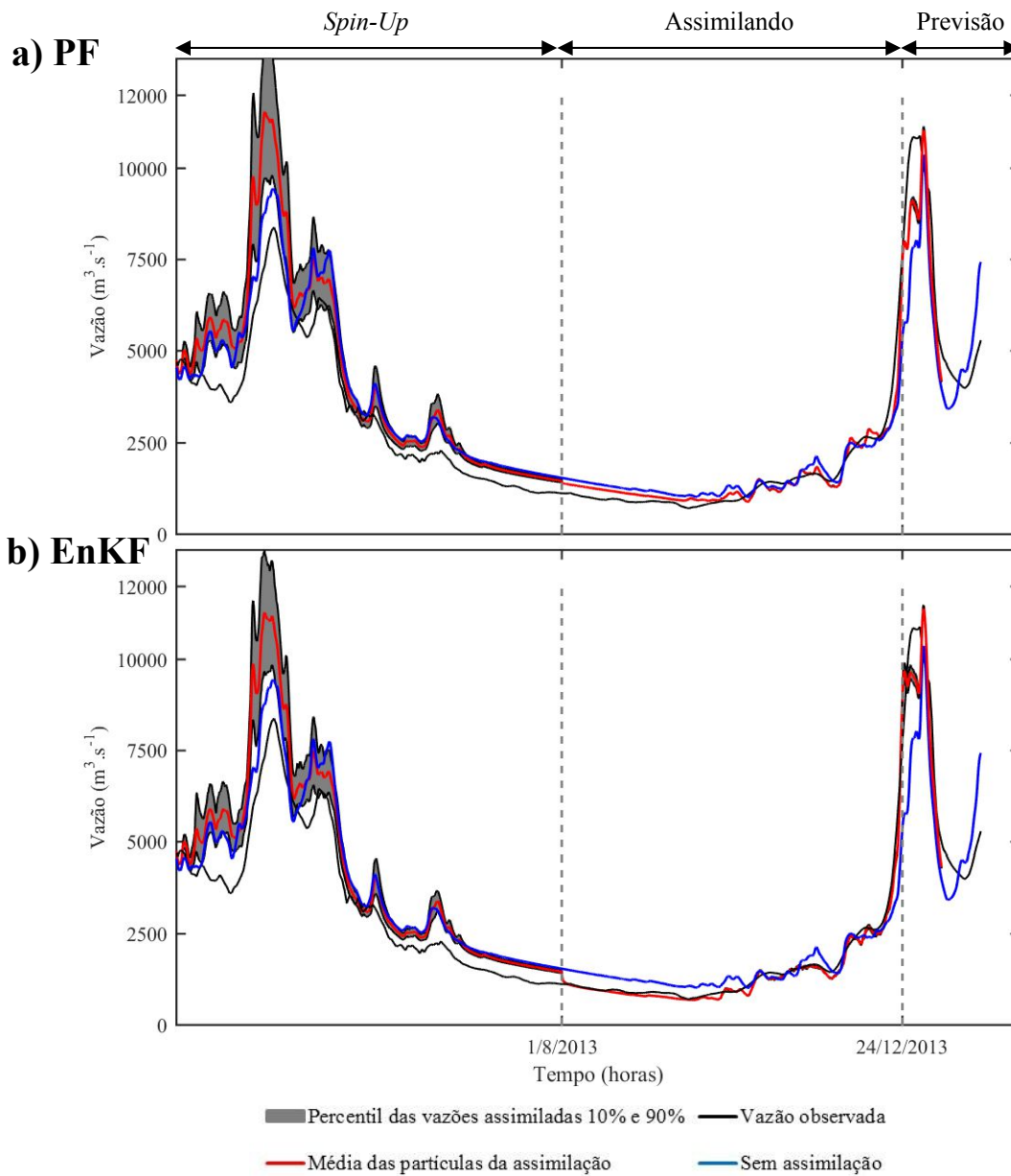


Figura 4.74 Hidrograma assimilando pelas técnicas de filtro de Partículas (PF) e filtro Kalman por conjunto (EnKF) em Estreito para a previsão de dezembro/2013.

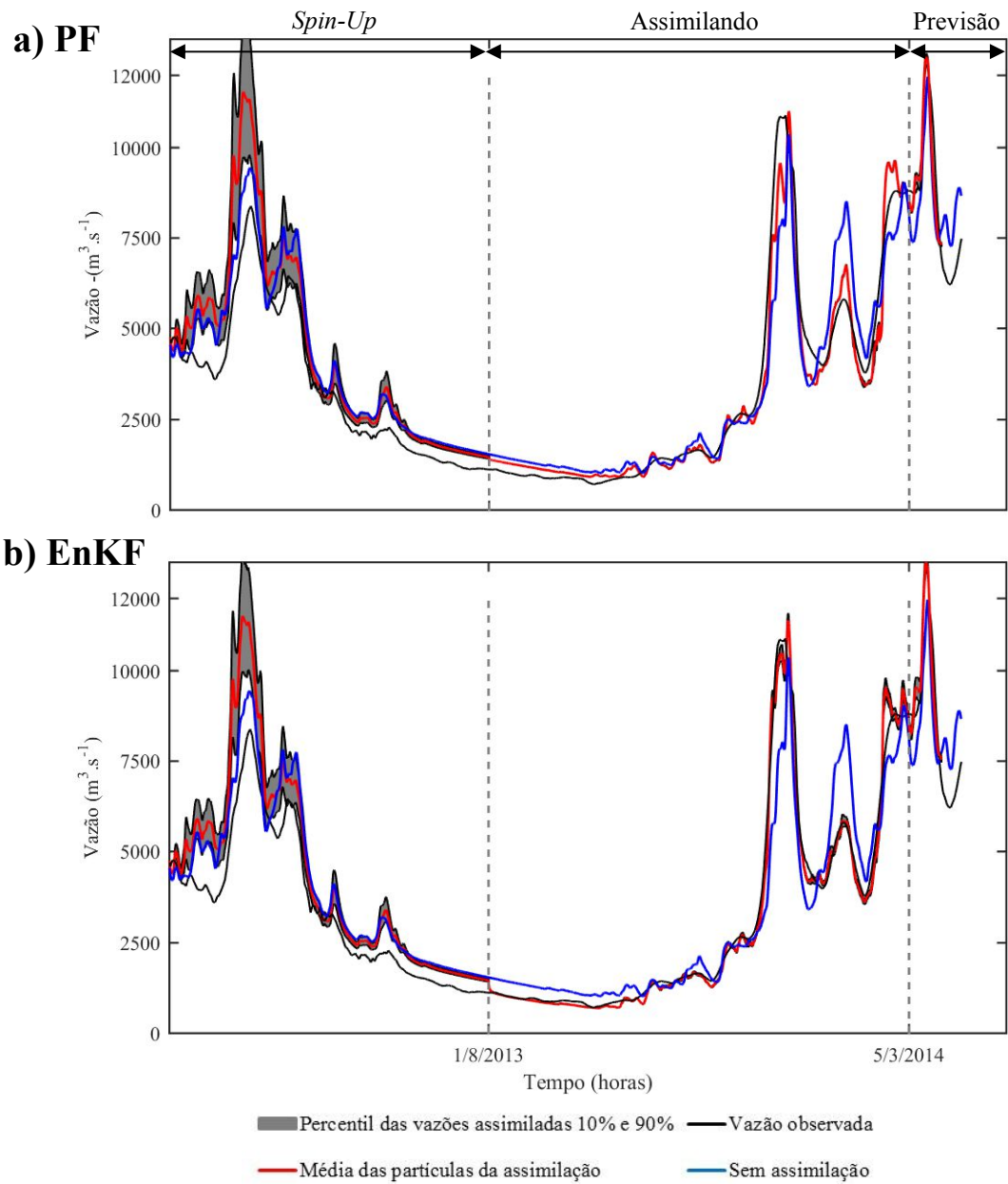


Figura 4.75 Hidrograma assimilando pelas técnicas de filtro de Partículas (PF) e filtro Kalman por conjunto (EnKF) em Estreito para a previsão de março/2014.

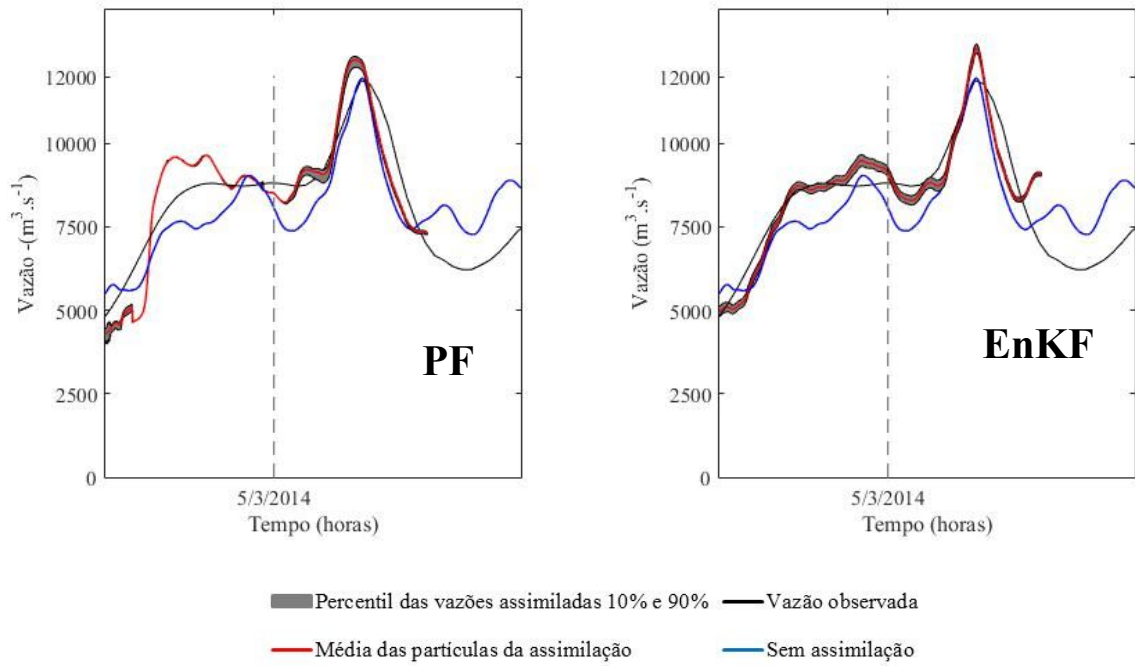


Figura 4.76 Hidrograma de previsão para o evento de Março/2014 assimilando com filtro de Partículas (PF) e com filtro Kalman por conjunto (EnKF) no Estreito.

CAPITULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho abordou dois assuntos importantes para a análise de previsão hidrológica de vazões: 1) uso da estimativa de precipitação por satélite combinado com dados de pluviômetros para simulação e previsão hidrológica; e 2) análise de técnicas de assimilação de dados do tipo sequencial. Para esses propósitos, a bacia do rio Tocantins com área de drenagem de 310.000 km² foi selecionada neste estudo. Essa bacia é de interesse pelo aproveitamento energético das cinco usinas hidrelétricas em operação e pela ocorrência periódica de inundações. Para o primeiro assunto, consideram-se as precipitações obtidas a partir das estimativas de satélite, por redes telemétricas e pelos correspondentes produtos combinados destes. Sendo assim, implementaram-se as rotinas computacionais associadas aos métodos de combinação CHUVSAT (Quiroz e Collischonn, 2015) e MERGEHQ, os quais permitiram gerar campos de precipitação no passo de tempo horário e diário. É importante salientar que os campos de precipitação são variáveis forçantes do modelo hidrológico MGB-IPH, a fim de testar os resultados em diversos locais da bacia. Já na fase de assimilação de dados correspondente ao segundo assunto, implementou-se a técnica de filtro de partículas (PF), cujos resultados foram posteriormente comparados com o método de filtro Kalman por conjunto (EnKF) e com o método de assimilação AsMGB. Os resultados obtidos com esses métodos foram avaliados utilizando indicadores estatísticos e reconhecimento visual com os hidrogramas observados. Na continuação do texto, seguem as conclusões referentes aos assuntos mencionados anteriormente.

▪ **Conclusões referentes às diferentes fontes de precipitação na simulação hidrológica.**

Na etapa de simulação hidrológica da bacia do rio Tocantins com o modelo MGB-IPH, execuções preliminares do modelo com dados no passo de tempo diário foram realizadas a fim de testar fontes de precipitação por satélite e métodos de combinação de precipitação MERGEHQ e CHUVSAT. Os resultados mostraram que os dois métodos de combinação de

precipitação criaram campos de precipitações adequados para aplicações hidrológicas, porém com diferenças numéricas nos coeficientes estatísticos calculados. O CHUVSAT no modelo MGB-IPH conseguiu ampliar moderadamente a média dos coeficientes de Nash-Sutcliffe, de todas as estações da bacia, com referência aos resultados de vazão usando postos pluviométricos no modelo MGB-IPH para áreas de drenagem menores a 20.000 km². Contrariamente, para essa mesma faixa de área de drenagem, o MERGEHQ no modelo diminuiu a média dos coeficientes de Nash-Sutcliffe. Para áreas de drenagem acima de 20.000 km², os resultados permanecem praticamente iguais para ambos os métodos.

Já quanto a simulação hidrológica no passo de tempo horário, os métodos de combinação CHUVSAT e MERGEHQ apresentaram melhores valores, em termos do coeficiente de Nash-Sutcliffe e erro médio de volume para o período de calibração do modelo hidrológico, quando foram comparados com as outras fontes de precipitação estudadas. O melhor desempenho dos métodos deu-se para áreas de drenagem maiores do que 30.000 km², sendo que CHUVSAT comportou-se ligeiramente superior em algumas estações. Durante a análise visual dos hidrogramas, observou-se que o hidrograma calculado com esses dois métodos de combinação de precipitação conseguiram representar adequadamente a variabilidade sazonal dos eventos de cheia e estiagem observadas em todas as estações, no entanto com diferenças nos picos de vazão máxima para algumas estações. No que diz respeito aos resultados na simulação hidrológica quando a precipitação por telemetria e precipitação por satélite foram forçadas no MGB-IPH, a precipitação por telemetria mostrou-se com bom desempenho em termos estatísticos para algumas poucas estações como no caso de Estreito (300.000 km²) representando adequadamente os picos de vazão máxima observada. Para a precipitação por satélite no modelo apresentou-se bom desempenho em termos estatísticos para áreas de drenagem maiores a 10.000 km², porém os picos de vazão máxima observada acontecendo em bacias menores não foram bem representados, subestimando na maioria dos casos.

Durante a análise de verificação dos parâmetros do modelo MGB-IPH confirmou-se o bom desempenho em termos estatísticos para as fontes de precipitação CHUVSAT e MERGEHQ para áreas de drenagem maiores do que 40.000 km².

- **Conclusões referentes às técnicas de assimilação e previsão.**

Transferência de informação com diferentes fontes de precipitação

- A assimilação de vazões em locais monitorados como em Lajeado e Estreito absorveu os erros da simulação ajudando a melhorar a eficiência de Nash-Sutcliffe em pontos não monitorados localizados a montante deles no curso principal do rio Tocantins.
- A transferência de vazões melhorou a eficiência de Nash-Sutcliffe para todas as fontes de precipitação que foram forçadas ao modelo de assimilação de dados em locais sobre o curso principal do rio Tocantins. Houve melhores valores de eficiência quando o modelo forçou os dados de precipitação MERGEHQ e CHUVSAT, seguido das estimativas por satélite e, por último, de precipitação por telemetria. Observou-se também que locais não monitorados próximos aos locais que estavam sendo assimilados tiveram melhores resultados em Nash-Sutcliffe comparados com aqueles que estavam mais afastados.
- A assimilação nos locais de Lajeado e Estreito conseguiu absorver os erros da simulação em alguns locais localizados na região sudeste da bacia do rio Tocantins e piorou nas estações na região nordeste.

Transferência de informação com diferentes técnicas de assimilação

- Foi feita uma análise de sensibilidade para determinar o número de partículas das técnicas de assimilação PF e EnKF utilizadas neste trabalho, entre outros parâmetros. Os resultados indicaram maior sensibilidade para o número de partículas e o erro relativo da precipitação. Obteve-se um maior número de partículas (ou membros no caso de EnKF) para PF em relação a EnKF, fato que corrobora os resultados obtidos em outros trabalhos referentes ao tema (Weerts et al., 2006; Nagarajan et al., 2011; Dechan e Moradkhani 2012).
- No processo de transferência de informação de locais monitorados para outros locais não monitorados, a técnica de assimilação EnKF apresentou um melhor desempenho baseado na obtenção de um maior coeficiente Nash-Sutcliffe e um menor erro relativo de vazão, entre outros indicadores estatísticos. Além disso, a transferência de informação de vazões utilizando PF foi lograda apenas até o local Peixe Angical

localizado a uma distância de 300 km de Lajeado e 700 km de Estreito, sendo que o método não conseguiu transferir ou não absorveu os erros da simulação para outros locais mais distantes.

Previsão hidrológica de vazões para diferentes fontes de precipitação

- A medida de desempenho nas previsões de vazões melhorou à medida que se incrementou a área de drenagem para todos os casos de fontes de precipitação observada.
- A análise de previsão contínua de vazões conseguiu mostrar que a precipitação combinada (CHUSAT e MERGEHQ) forçada ao modelo de previsão teve ótimo desempenho em termos estatísticos para todo o período de antecedência analisada. Quando a precipitação por telemetria foi forçada ao modelo de previsão como precipitação observada, o desempenho do modelo foi afetado e ficaram significativamente inferiores com coeficientes de Nash-Sutcliffe menores do que 0,50 para os casos dos locais de Serra da Mesa, CanaBrava, São Salvador e Peixe Angical.
- As estações com maior área de drenagem (Lajeado e Estreito) apresentaram coeficientes Nash-Sutcliffe superiores a 0,80 em todo o horizonte de previsão para todos os casos de precipitação. Nesse sentido, pode-se dizer que a precipitação por satélite poderia substituir a precipitação de entrada nos modelos de previsão quando não existem estações telemétricas ou quando existem falhas nessas estações.

Previsão hidrológica de vazões usando técnicas de assimilação do tipo sequencial

- Observa-se que a técnica de assimilação por filtro de Partículas conseguiu diminuir as incertezas iniciais no modelo de previsão nas primeiras horas de antecedência, apesar das diferenças de sincronização entre algumas vazões de pico.
- A assimilação de dados pelas técnicas de assimilação PF e EnKF quando acoplada ao modelo de previsão, mostraram-se de forma geral, adequado desempenho estatístico superior em relação aos resultados obtidos para o modelo sem assimilação.

- Os resultados com o método de assimilação EnKF apresentaram igual ou melhor desempenho estatístico em relação à técnica PF. Em constatação foi mais evidente para o primeiro período de janeiro/2013 – maio/2013 do que no segundo período dezembro/2013 – março/2014.
 - A análise de previsão continua de vazões conseguiu mostrar que, assimilando com EnKF, os índices estatísticos melhoraram após as 24 horas de antecedência comparado com AsMGB em várias estações analisadas.
- **Recomendações**

Os métodos de interpolação CHUVSAT e MERGEHQ que integram os dados de precipitação e satélite mostraram-se aceitáveis e úteis para a aplicação de previsão de vazões em tempo real. Observa-se que, esses dados podem ser integrados a outras fontes de precipitação por satélite tais como GSMaP, IMERGv4 do projeto GPM, ScaMPR, PERSIANN, entre outros.

Recomenda-se continuar testando a técnica de CHUVSAT variando alguns aspectos do seu procedimento. Após a definição dos raios de busca para as duas fontes de precipitação (telemetria e satélite), os parâmetros do método de interpolação podem ser calculados para cada posição do posto telemétrico em vez da versão atual que considera parâmetros únicos para toda a bacia. Dessa maneira, pode-se capturar de forma mais precisa o campo de precipitação associado à região do posto pluviômetro corrente. Essa situação poderia ser relevante, por exemplo, em casos onde se conta com apenas um ou poucos postos pluviométricos em relação aos de satélite, sendo que a técnica atual aplica um maior fator de ponderação a aquela fonte com maior número de dados.

Recomenda-se pesquisar outros métodos de interpolação que sejam parcimoniosos com o fim de acoplar aos modelos de previsão de vazão. Os avanços tecnológicos na carreira do espaço continuam, e novos sensores de micro-onda vêm sendo instalados em satélites meteorológicos, permitindo obter resoluções mais detalhadas.

Recomenda-se continuar com a instalação de pluviômetros em Terra, pois os radares meteorológicos e as redes telemétricas continuarão sendo informação de base para validar outras fontes novas de precipitação estimadas por satélite.

Recomenda-se realizar estudos mais rigorosos para as técnicas de assimilação de filtro de Partículas, inclui-se considerar outras fontes de erro de forma simultânea com as variáveis de estado e com os parâmetros do modelo hidrológico. Sendo assim, sugere-se testar técnicas baseadas nas cadeias de Markov para diminuir o problema da diversidade que podem apresentar os métodos de filtro de partículas.

Recomenda-se avaliar outras técnicas de assimilação, como, por exemplo, técnicas baseadas em algoritmos evolucionários, métodos variacionais ou variações do filtro de Kalman como filtro do conjunto da Raiz descrito no trabalho de Whitaker e Hamill (2002).

Sugere-se em futuros trabalhos testar uma única precipitação prevista “perfeita” como sendo equivalente à média ou mediana derivada do conjunto de precipitações dos produtos avaliados neste trabalho. Neste caso, espera-se que o resultado sejam previsões que divergem após o início da previsão, e depois convergem todas para resultados similares, relacionados com esta única chuva prevista a ser utilizada. Primeiramente espera-se que todas as previsões iniciem iguais e permaneçam iguais nos instantes iniciais em função da assimilação de dados, que ajusta as variáveis de estado do modelo, como o volume de água no solo ou no rio. Logo após os horizontes iniciais, espera-se a divergência dos resultados das previsões com os diferentes produtos de precipitação, pois neste caso a chuva que caiu na bacia (correspondente a chuva do produto utilizado em cada teste) irá influenciar os seguintes intervalos de tempo, até um dado horizonte que corresponde aproximadamente ao tempo de concentração da bacia. Após estes horizontes de tempo a chuva que passará a influenciar a previsão será a chuva da previsão média ou mediana utilizada, ocasionando uma convergência dos resultados para este cenário de chuva única designada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA AMBIENTAL. Fluvial flood forecasting for flood warning- real time modelling. Defra/Environment Agency Flood and Coastal Defense R&D Programme. R & D Technical Report W5C-013/5/TR. 2002.
- AKHTAR, M. K.; CORZO, G. A.; VAN ANDEL, S. J.; JONOSKI, A. River flow forecasting with artificial neural networks using satellite observed precipitation pre-processed with flow length and travel time information: case study of the Ganges river basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13 (9), 1607-1618. 2009.
- ANDREADIS, KONSTANTINOS M.; LETTENMAIER, DENNIS P. Assimilating remotely sensed snow observations into a macroscale hydrology model.; *Advances in Water Resources* 29. P. 872–886. 2006.
- ANDREOLLI, I.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.; REINALDO, H.; REGINA, J. V. M. Previsão de Vazão Afluente a um Reservatório Utilizando Previsão Quantitativa de Chuva, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 11(3), 55-69. 2006.
- ANEEL. Análise de consistência de dados pluviométricos. Brasília: Rep. FUB/FNB, 71 pp., Agência Nac. de Energia Elétrica, Brasília. 1999.
- ARAÚJO, A. N.; GUETTER, A. K. Validação da Chuva Estimada por Satélite "CMORPH" na modelagem Hidrológica do Alto Iguaçu. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 12, 189-198. 2007.
- ARULAMPALAM, M.; MASKELL, S.; GORDON, N.; CLAPP, T.; A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking, *Signal Processing, IEEE Transactions on* 50(2), 174-188. 2002.
- BECK, H.E., A.I.J.M. VAN DIJK, V. LEVIZZANI, J. SCHELLEKENS, D.G. MIRALLES, B. MARTENS, A. DE ROO: MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data, *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 589–615, 2017.
- BEHRANGI, A.; KHAKBAZ, B.; JAW, T. C.; AGHAKOUCHAK, A.; HSU, K.; SOROOSHIAN, S. Hydrologic evaluation of satellite precipitation products over a mid-size basin. *Journal of Hydrology*, 397, 225-237. 2011.
- BRAVO, J. M.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; UVO, C. B.; PEDROLLO, O. C.; CHOU, S. C. Incorporating Forecasts of Rainfall in Two Hydrologic Models Used for Medium-Range Streamflow Forecasting. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14 (5), 435-445. 2009.
- BUARQUE, D. C.; Simulação da geração e do transporte de sedimentos em grandes bacias: Estudo de caso do rio Madeira, 2015. 176 f. Tese (Doutorado em recursos hídricos e saneamento ambiental) – Instituto de Pesquisas hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BUARQUE, D. C.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. Extração automática de parâmetros físicos de bacias hidrográficas a partir do MNT para utilização em modelos hidrológicos. *Simpósio Sul-Sudeste de Recursos Hídricos*. Rio de Janeiro, 2008.
- CHAPPELL, A.; RENZULLO, L. J.; RAUPACH, T. H.; HAYLOCK, M. Evaluating geostatistical methods of blending satellite and gauge data to estimate near real-time daily rainfall for Australia. *Journal of Hydrology*, 493 (0), 105-114. 2013.
- CHEN, M., W. SHI, P. XIE, V. B. S. SILVA, V E. KOUSKY, R. WAYNE HIGGINS, E J. E. JANOWIAK. Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation, *J. Geophys. Res.*, 113, D04110, doi:10.1029/2007JD009132. 2008.

- CHEN, H.; YANG, D.; HONG, Y.; GOURLEY, J. J. & ZHANG, Y.; Hydrological data assimilation with the Ensemble Square-Root-Filter: Use of streamflow observations to update model states for real-time flash flood forecasting, *Advances in Water Resources* 59, 209 - 220. 2013.
- CHEN, J.; ZHANG, W.; GAO, J.; CAO, K. Assimilating multi-site measurements for semi - distributed hydrological model Updating. *Quaternary International* 282 , 122-129. 2012.
- CHWALA, C.; GMEINER A.; QIU, W.; HIPPEL, S.; NIENABER, D. SIART, U.; EIBERT, T. ;POHL, M.; SELTMANN, J.; FRITZ, J.; KUNSTMANN, H. Precipitation observation using microwave backhaul links in the alpine and pre-alpine region of Southern Germany. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 2647–2661. doi:10.5194/hess-16-2647-2012. 2012.
- CHIANG, Y. M.; HSU, K. L.; CHANG, F. J.; HONG, Y.; SOROOSHIAN, S. Merging multiple precipitation sources for flash flood forecasting. *Journal of Hydrology*, 340 (3-4), 183-196. 2007.
- CLARK, Martyn P.; RUPP, David E.; Woods, ROSS A.; ZHENG, Xiaogu; IBBITT, Richard P.; SLATER, Andrew G.; SCHMIDT, Jochen; UDDSTROM, Michael J. Hydrological data assimilation with the ensemble Kalman filter: Use of streamflow observations to update states in a distributed hydrological model. *Advances in Water Resources* 31. 1309–1324. 2008.
- 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*, 118, doi: 10.1002/jgrd.50545. 2013.
- COHEN LIECHTI, T.; MATOS, J. P.; BOILLAT, J. L. & SCHLEISS, A. J. Comparison and evaluation of satellite derived precipitation products for hydrological modeling of the Zambezi River Basin, *Hydrology and Earth System Sciences* 16(2), 489-500. 2012.
- COLLISCHONN, W. Simulação Hidrológica de grandes bacias. 2001. 170 f. Tese (Doutorado em recursos hídricos e saneamento ambiental) – Instituto de Pesquisas hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. Simulação Hidrológica de grandes bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 6 (1), 95-118. 2001.
- COLLISCHONN, W.; HAAS, R.; ANDREOLLI, I.; TUCCI, C. E. Forecasting River Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model . *Journal of Hydrology* , 305 (1-4), 87-98. 2005.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E.; CLARKE, R. T.; CHOU, S. C.; GUILHON, L. G.; CATALDI, M.; ALLASIA, D. Medium-range reservoir inflow predictions based on quantitative precipitation forecasts . *Journal of Hydrology* , 344 (1-2), 112-122. 2007.
- COLLISCHONN W.; BUARQUE, D. C.; PAIVA, R.C.D.P.; FAN, F. KAYSER, R. Manual de exemplos de aplicação do modelo MGB-IPH: Rio das Almas versão 2.0; Projeto Integrado de Cooperação Amazônica e de Modernização do Monitoramento Hidrológico; Agosto, 2010.
- COLLISCHONN, B.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. *Journal of Hydrology* , 360 (1-4), 207-216. 2008.
- COUSTAU, M.; RICCI, S.; BORRELL-ESTUPINA, V.;BOUVIER, C.; THUAL, O. Benefits and limitations of data assimilation for discharge forecasting using and event-based rainfall-runoff model. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 583–596, doi:10.5194/nhess-13-583-2013
- CROW, W. T.; RYU, D. A new data assimilation approach for improving runoff prediction using remotely-sensed soil moisture retrievals. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 1–16, 2009.

- DeCHANT, Caleb M.; MORADKHANI, Hamid. Examining the effectiveness and robustness of sequential data assimilation methods for quantification of uncertainty in hydrologic forecasting. *Water resources research*, vol. 48, W04518, doi:10.1029/2011WR011011, 2012.
- De VERA, A.; TERRA, R. Combining CMORPH and Rain Gauges Observations over the Rio Negro Basin. *Journal of hydrometeorology*; v. 13. 1799-1809 pp. DOI: 10.1175/JHM-D-12-010.1. 2012.
- DERIN, Y.; ANAGNOSTOU, E.; BERNE, A.; BORGA, MARCO ; BOUDEVILLAIN, B.; BUYTAERT, W.; CHANG, C.; DELRIEU, G.; HONG, Y.; HSU, Y. C.; LAVADO-CASIMIRO W.; MANZ, B.; MOGES, S.; NIKOLOPOULOS, E.; SAHLU, D.; SALERNO, F.; SÁNCHEZ, J. R.; VERGARA, H. J.; YILMAZ, K. K. Multiregional Satellite Precipitation Products Evaluation over Complex Terrain. DOI: 10.1175/JHM-D-15-0197.1. vol. 17. (pp. 1817-1836). 2016.
- DINIZ, L. S. Calibração de modelos hidrológicos. In: G. C. Oliveira (Ed.). Porto Alegre: Editora da UFRGS – ABRH. 1999.
- DINKU, T.; CONNOR, S. J.; CECCATO, P. Comparison of CMORPH and TRMM-3B42 over Mountainous Regions of Africa and South America. In: M. Gebremichael, & F. Hossain (Eds.), *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology* (pp. 193-204). Berlin: Springer Netherlands. 2010.
- DOUCET, A.; GODSILL, S.; ANDRIEU, C. On sequential Monte Carlo sampling methods for Bayesian filtering. *Statistics and Computing*. 10, 197–208. 2000.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*. 28, 1015-1031. 1992.
- DUAN, Z.; BASTIAANSEN, W. First results from Version 7 TRMM 3B43 precipitation product in combination with a new downscaling - calibration procedure. *Remote Sensing of Environment*, 131, 1-13. 2013.
- DUMEDAH, G. e COULIBALY, P. Evaluating forecasting performance for data assimilation methods: The ensemble Kalman filter, the particle filter, and the evolutionary-based assimilation, *Advances in Water Resources* 60(0), 47 - 63. 2013.
- EINFALT, T., & MICHAELIDES, S. Quality control of precipitation data. In: S. Michaelides (Ed.), *Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction* (pp. 101-126). Berlin: Springer Berlin Heidelberg. 2008.
- ERCOLANI, G., AND F. CASTELLI . Variational assimilation of streamflow data in distributed flood forecasting, *Water Resour. Res.*, 53, 158–183, doi:10.1002/2016WR019208. 2017.
- EVA, H. D. A Vegetation map of South America. European Commission. EUR 20159 EN. 2002.
- EVENSEN, G. The Ensemble Kalman Filter: theoretical formulation and practical implementation *Ocean Dynamics*. 53, 343–367, DOI 10.1007/s10236-003-0036-9, 2003.
- EVENSEN, G.: Sampling strategies and square root analysis schemes for the EnKF, *Ocean Dynam.*, 54, 539–560, 2004.
- FALCK, A. S.; Avaliação da incerteza nas estimativas de precipitação por satélite e sua propagação no modelo hidrológico distribuído MHD-INPE. 2015. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C.; KAYSER, R. Manual ArcHydro para aplicação do modelo MGB-IPH, Versão 1.2. Porto Alegre-Brasil: IPH-UFRGS. 2009.

- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C.; KAYSER, R. Manual de Prepro-MGB para aplicação do modelo MGB-IPH, versão 4.1. Porto Alegre-Brasil: IPH-UFRGS. 2010.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; QUIROZ, K. J.; SORRIBAS, M.; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. (2014). Flood forecasting on the Tocantins river using ensemble rainfall forecasts and real-time satellite rainfall estimates. 6th International Conference on Flood Management. São Paulo - Brazil: ICFM6.
- FAN, F.M.; PAIVA, R.C.D.; COLLISCHONN, W. Hydrological Forecasting Practices in Brazil. In: Flood Forecasting: A Global Perspective. 2016. pp.41-66. DOI: 10.1016/B978-0-12-801884-2.00002-5
- FOTOPOULOS, F., MAKROPOULOS, C., & MIMIKOU, M. Flood forecasting in transboundary catchments using the Open Modeling Interface. *Environmental Modelling & Software* , 25 (12), 1640-1649. 2010.
- FOTOPOULOS, F., MAKROPOULOS, C., & MIMIKOU, M. Validation of satellite rainfall products for operational flood forecasting: the case of the Evros catchment. *Theoretical and Applied Climatology* , 104 (3-4), 403-414. 2011.
- FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data* 2, 150066. doi:10.1038/sdata.2015.66. 2015.
- GEBREGIORGIS, A.; HOSSAIN, F. Performance evaluation of merged satellite rainfall products based on spatial and seasonal signatures of hydrologic predictability. *Atmospheric Research*, 132-133, 223 - 238. 2013.
- GETIRANA, A.; ESPINOZA, J.; RONCHAIL, J.; FILHO, O. R. Assessment of different precipitation datasets and their impacts on the water balance of the Negro River basin. *Journal of Hydrology*, 404, 304-322. 2011.
- GOUDENHOOFDT, E.; DELOBBE, L. Evaluation of radar-gauge merging methods for quantitative precipitation estimates. *Hydrology and Earth System Sciences* , 13 (2), 195-203. 2009.
- GORDON, N. J.; SALMOND, D. J.; SMITH, A. F. M. Novel Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation. *IEE Proceedings-F*, vol. 40, Nro.2 abril, 1993.
- GRIMES, D.; DIOP, M. Satellite-based rainfall estimation for river flow forecasting in Africa. I: Rainfall estimates and hydrological forecasts. *Hydrological sciences journal* , 48 (4), 567-584. 2003.
- GUO, H.; CHEN, S.; BAO, A.; BEHRANGI, A.; HONG, Y.; NDAYISABA, F.; HU, J.; STEPANIAN, P. M. Early assessment of Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement over China. *Atmospheric Research*. v. 176–177. 121–133. 2016.
- HARADER, E.; BORRELL-ESTUPINA, V.; RICCI, S.; COUSTAU, M.; THUAL, O.; PIACENTINI, A.; BOUVIER, C. Correcting the radar rainfall forcing of a hydrological model with data assimilation: application to flood forecasting in the Lez catchment in Southern France, *Hydrology and Earth System Sciences* 16(11), 4247-4264. 2012.
- HARRIS, A.; RAHMAN, S.; HOSSAIN, F.; YARBOROUGH, L.; BAGTZOGLU, A. C.; EASSON, G. Satellite-based Flood Modeling Using TRMM-based Rainfall Products. *Sensors* , 7 (12), 3416-3427. 2007.
- HIRPA, FEYERA AGA, Hydrologic Data Assimilation for Operational Streamflow Forecasting (2013). Doctoral Dissertations. University of Connecticut Graduate School. P.152.

- HONG, Y.; HSU, K.-L.; MORADKHANI, H.; SOROOSHIAN, S. Uncertainty quantification of satellite precipitation estimation and Monte Carlo assessment of the error propagation into hydrologic response, *Water Resources Research* 42(8), DOI: 10.1029/2005WR004398. 2006.
- HONG, Y.; ADLER, R. F.; HOSSAIN, F.; CURTIS, S.; HUFFMAN, G. J. A first approach to global runoff simulation using satellite rainfall estimation. *Water Resources Research* , 43 (8), doi: 10.1029/2006WR005739. 2007.
- HONG, Y.; ADLER, Robert F.; HUFFMAN, George J.; PIER, Harold. Applications of TRMM-Based Multi-Satellite Precipitation Estimation for Global Runoff Prediction: Prototyping a Global Flood Modeling System. In: *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*. M. Gebremichael, F. Hossain (eds.). p. 245-265. DOI 10.1007/978-90-481-2915-7_15. 2010.
- HOSSAIN, F; LETTENMAIER, P. Flood prediction in the future: Recognizing hydrologic issues in anticipation of the Global Precipitation Measurement mission, *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 42, W11301, doi:10.1029/2006WR005202, 2006.
- HOSSAIN, F.; KATIYAR, N. Improving Flood Forecasting in international river basins. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, vol.87, Nro.5, 2006.
- HOSSAIN, F.; ANAGNOSTOU, E. Assessment of a multidimensional satellite rainfall error model for ensemble generation of satellite rainfall data, *Geoscience and Remote Sensing Letters*, IEEE 3(3), 419-423. 2006.
- HOU, A.Y.; SKOFRONICK-JACKSON, G.; KUMMEROW, C.D.; SHEPHERD, J.M. Global precipitation measurement. In: Michaelides, S. (Ed.), *Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction*. Springer, pp. 131–169. 2008.
- HOU, A.Y., KAKAR, R.K., NEECK, S., AZARBARZIN, A.A., KUMMEROW, C.D., KOJIMA, M., OKI, R., NAKAMURA, K., IGUCHI, T. The global precipitation measurement mission. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 95 (5), 701–722. 2014.
- HUFFMAN, George J.; ADLER, Robert F.; MORRISSEY, Mark M.; BOLVIN, David T.; CURTIS, Scott; JOYCE, Robert; MCGAVOCK, Brad; SUSSKIND, Joel. Global Precipitation at One-Degree Daily Resolution from Multisatellite Observations. *Journal of hydrometeorology*, vol.2, p. 36, 50. 2001.
- HUFFMAN, G.; ADLER, R.; BOLVIN, D.; GU, G.; NELKIN, E.; BOWMAN, K.; HONG, Y.; STOCKER, E.; WOLFF, D. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology* 8(1), 38-55. 2007.
- HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J. Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG), version 4.4. NASA's Precipitation Processing Center, 19 Junho, 2015.
- JENSEN, J. R. *Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em Recursos Terrestres*. Tradução de J. C. N. Epiphânio. (1 ed.). São José dos Campos, SP: (Prentice Hall Series in Geographic Information Science) Tradução de: *Remote Sensing of the environment: na earth resource perspective*. 2009.
- JIANG, S.; REN, L.; HONG, Y.; YONG, B.; YANG, X.; YUAN, F. Comprehensive evaluation of multi-satellite precipitation products with a dense rain gauge network and optimally merging their simulated hydrological flows using the Bayesian model averaging method. *Journal of Hydrology*, 452-453 (0), 213-225. 2012.
- JONGJIN, B. ;JONGMIN, P.; DONGRYEOL, R.; MINHA, C. Geospatial blending to improve spatial mapping of precipitation with high spatial resolution by merging satellite based and ground-based data. *HYDROLOGICAL PROCESSES Hydrol. Process.* 30, 2789–2803, 2016.

- JOYCE, R.; JANOWIAK, J.; ARKIN, P.; XIE, P. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology* , 5 (3), 487-503. 2004.
- KIDD, C. Satellite rainfall climatology: a review. *International Journal of Climatology* , 21 (9), 1041-1066. 2001.
- KIM, Jong Pil; JUNG, Won; PARK, Kyung Won; YOON, Sun Kwon; LEE, Donghee. Hydrological Utility and Uncertainty of Multi-Satellite Precipitation Products in the Mountainous Region of South Korea. *Remote Sens.* 2016, 8, 608; doi:10.3390/rs8070608. 2016.
- KUBOTA, T.; KACHI, M.; OKI R.; SHIMIZU S. YOSHIDA N. KOJIMA M. NAKAMURA K. Rainfall observation from space – applications of tropical rainfall measuring mission (TRMM) and global precipitation measurement (GPM) mission. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Volume XXXVIII, Part 8, Kyoto Japan 2010.
- KUGLER, Zsófia; GROEVE, Tom De. The Global Flood Detection System. JRC Scientific and technical reports. 2007.
- LIANG, X.; LETTENMAIER, D. P.; WOOD, E. F.; BURGUES, S. J. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of geophysical research*. Vol.9, Nro.D7. p. 415-428. 1994.
- LI, L.; HONG, Y.; WANG, J.; ADLER, R. F.; POLICELLI, F. S.; HABIB, S.; IRWN, D.; KORME, T. & OKELLO, L. Evaluation of the real-time TRMM-based multi-satellite precipitation analysis for an operational flood prediction system in Nzoia Basin, Lake Victoria, Africa, *Natural hazards* 50(1), 109-123. 2009.
- LI, L.; NGONGONDO, C. S.; XU, C.; GONG L. Comparison of the global TRMM and WFD precipitation datasets in driving a large-scale hydrological model in southern Africa. *Hydrology Research*. doi: 10.2166/nh.2012.175. 2013.
- LI, X.-H.; ZHANG, Q.; XU, C.-Y. Suitability of the TRMM satellite rainfalls in driving a distributed hydrological model for water balance computations in Xinjiang catchment, Poyang lake basin. *Journal of Hydrology* , 426 - 427 (0), 28-38. 2012.
- LI, X.; ZHANG, Q.; XU, C. Y. Assessing the performance of satellite-based precipitation products and its dependence on topography over Poyang Lake basin. *Theoretical and Applied Climatology* , 115 (3-4), 713-729. 2014.
- LI, NA; TANG, GUOQIANG; ZHAOB, PING; HONG, YANG; GOUE, YABIN; YANG, KAI. Statistical assessment and hydrological utility of the latest multi-satellite precipitation analysis IMERG in Ganjiang River basin. *Atmospheric Research*, vol. 183, p. 212–223. 2017.
- LIU, Y.; GUPTA, H. V. Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data assimilation framework. *Water Resources Research.*, vol. 43, W07401, doi:10.1029/2006WR005756, 2007.
- LIU, Y.; WEERTS, A. H.; CLARK, M.; FRANSSEN, H. J. H.; KUMAE, S.; MORADKHANI, H.; SEO, D. J.; SCHWANENBERG, D.; SMITH, P.; VAN DIJK, A. I. J. M.; VAN VELZEN, N.; HE, M.; LEE, H.; NOH, S. J.; RAKOVEC, O.; RESTREPO, P. Advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting: progresses, challenges, and emerging opportunities. *Hydrology and earth system sciences*, (16), p. 3863- 3887, 2012.
- LENSKY, I. M.; LEVIZZANI, V. Estimation of precipitation from space-based platforms. In: S. Michaelides (Ed.), *Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction* (pp. 195-217). Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2008.

- LETTENMAIER, D.P.; WOOD, E.F. 1993, Hydrological Forecasting, Chapter 26 in Handbook of Hydrology. (D. Maidment, ed.), McGraw-Hill. D.P.
- LORENZ , C.; TOURIAN, M. J.; DEVARAJU, B.; SNEEUW, N; KUNSTMANN, H. Basin-scale runoff prediction: An Ensemble Kalman Filter framework based on global hydrometeorological data sets. *Water Resour. Res.*, 51, 8450–8475, doi:10.1002/2014WR016794.
- MATGEN, P.; MONTANARI, M.; HOSTACHE, R.; PFISTER, L.; HOFFMANN, L.; PLAZA, D.; PAUWELS, V. R. N.; DE LANNOY, G. J. M.; DE KEYSER, R. & SAVENIJE, H. H. G. Towards the sequential assimilation of SAR-derived water stages into hydraulic models using the Particle Filter: proof of concept, *Hydrology and Earth System Sciences* 14(9), 1773-1785. 2010.
- MANZ, B., W. BUYTAERT, Z. ZULKAFI, W. LAVADO, B. WILLEMS, L. A. ROBLES, AND J.-P. RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ. High-resolution satellite-gauge merged precipitation climatologies of the Tropical Andes, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 1190–1207, doi:10.1002/2015JD023788. 2016.
- MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Tempo e clima no brasil. In: _____. São Paulo: Oficina de textos, 2009. cap. Clima da região amazônica, p. 197–212. 15
- MICHAELIDES, S.; LEVIZZANI, V.; ANAGNOSTOU, E.; BAUER, P.; KASPARIS, T.; LANE, J. Precipitation: Measurement, remote sensing, climatology and modeling, *Atmospheric Research* 94(4), 512 - 533. 2009.
- MONTEIRO, J. A. F.; STRAUCH, M.; SRINIVASAN, R.; ABBASPOUR, K.; GÜCKER, B. Accuracy of grid precipitation data for Brazil: application in river discharge modeling of the Tocantins catchment. *Hydrological processes* 30, 1419–1430, 2016.
- MELLER, A.; COLLISCHONN, W.; BRAVO, J. M.; Assimilação de Dados de Vazão na Previsão de Cheias em Tempo-Real com o Modelo Hidrológico MGB-IPH. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 17 (3), 209-224. 2012.
- MENDOZA, P. A.; Pronóstico de Caudales de Crecida Mediante un Modelo Hidrológico Distribuido y la Asimilación de Datos Observados, 2010. 218 f. Tesis (Tesis para optar al grado de magister en ciencias de la ingeniería, mención recursos y medio ambiente hídrico) – Facultad de ciencias físicas y matemáticas-Departamento de Ingeniería civil, Universidad de Chile
- MORADKHANI, H.; HSU, K. L.; GUPTA, H.; SOROOSHIAN, S. Uncertainty assessment of hydrologic model states and parameters: Sequential data assimilation using the particle filter, *Water Resources Research* 41(5), doi:10.1029/2004WR003604. 2005a.
- MORADKHANI, Hamid; SOROOSHIAN, Soroosh; GUPTA, Hoshin V.; HOUSER, Paul R. Dual state–parameter estimation of hydrological models using ensemble Kalman filter. *Advances in Water Resources* 28, 135–147. 2005b.
- MORADKHANI, H.; HSU, K.; HONG, Y. & SOROOSHIAN, S. Investigating the impact of remotely sensed precipitation and hydrologic model uncertainties on the ensemble streamflow forecasting, *Geophysical Research Letters* 33(12), DOI: 10.1029/2006GL026855. 2006.
- MORADKHANI, H.; SOROOSHIAN, S. General Review of Rainfall-Runoff Modeling: Model Calibration, Data Assimilation, and Uncertainty Analysis, in Soroosh Sorooshian; Kuo-Lin Hsu; Erika Coppola; Barbara Tomassetti; Marco Verdecchia & Guido Visconti, ed., *Hydrological Modelling and the Water Cycle*, Springer Berlin Heidelberg, , pp. 1-24. 2008.
- MORADKHANI, H.; SOROOSHIAN, S. General Review of Rainfall-Runoff Modeling: Model Calibration, Data Assimilation, and Uncertainty Analysis. In: *Hydrological Modelling and the Water Cycle*. Volume 63, pp 1-24. 2009.

- NAGARAJAN, Karthik; JUDGE, Jasmeet; WENDY D. Graham; ALEJANDRO Monsivais-Huertero. Particle Filter-based assimilation algorithms for improved estimation of root-zone soil moisture under dynamic vegetation conditions. *Advances in Water Resources* 34, p. 433–447. 2011.
- NEW, M.; HULME, M. & JONES, P. Representing Twentieth-Century Space-Time Climate Variability. Part II: Development of 1901-96 Monthly Grids of Terrestrial Surface Climate', *J. Climate* 13(13), 2217-2238.9. 2000.
- NERINI, D.; ZULKAFI, Zed; WANG, Li-pen; ONOF, Christian; BUYTAERT, Wouter; LAVADO-CASIMIRO, Waldo; GUYOT, Jean-loup. Comparative Analysis of TRMM–Rain Gauge Data Merging Techniques at the Daily Time Scale for Distributed Rainfall–Runoff Modeling Applications. *American Meteorological Society*. DOI: 10.1175/JHM-D-14-0197.1. 2015.
- NIJSSEN, B.; LETTENMAIER, D. P. Effect of precipitation sampling error on simulated hydrological fluxes and states: Anticipating the Global Precipitation Measurement satellites, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 109(D2), 10.1029/2003JD003497. 2004.
- NIKOLOPOULOS, E.; ANAGNOSTOU, E.; HOSSAIN, F. Error Propagation of Satellite-Rainfall in Flood Prediction Applications over Complex Terrain: A Case Study in Northeastern Italy. In: M. Gebremichael, & F. Hossain (Eds.), *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology* (pp. 215-227). Berlin: Springer Netherlands. 2010.
- NIKOLOPOULOS, E. I.; ANAGNOSTOU, E. N.; BORGA, M. Using High-Resolution Satellite Rainfall Products to Simulate a Major Flash Flood Event in Northern Italy. *J. Hydrometeorol*, 14 (1), 171-185. 2012.
- NIKOLOPOULOS, E. I.; ANAGNOSTOU, E. N.; BORGA, M. Using High-Resolution Satellite Rainfall Products to Simulate a Major Flash Flood Event in Northern Italy. *Journal Hydrometeorol* 14(1), 171-185. 2013.
- NOH, S. J.; TACHIKAWA, Y.; SHIIBA, M.; KIM, S. Applying sequential Monte Carlo methods into a distributed hydrologic model: lagged particle filtering approach with regularization. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 3237–3251. doi:10.5194/hess-15-3237-2011. 2011
- NOH, SEONG JIN; TACHIKAWA, YASUTO; SHIIBA, MICHIHARU; KIM, SUNMIN. Ensemble Kalman Filtering and Particle Filtering in a Lag-Time Window for Short-Term Streamflow Forecasting with a Distributed Hydrologic Model. *J. Hydrol. Eng.* 18:1684-1696. 2013.
- OLIVEIRA e SILVA, F. E. Assimilação do padrão de variabilidade das variáveis de estado de um modelo chuva-vazão em esquemas de simulação / previsão hidrológica, 2015 227 f. Tese (Doutorado em Saneamento, médio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Minas Gerais, Belo Horizonte.
- OVEREEM, Aart; LEIJNSE, Hidde; UIJLENHOET, Remko. Retrieval algorithm for rainfall mapping from microwave links in a cellular communication network. *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 2425–2444, doi:10.5194/amt-9-2425-2016.
- PAIVA, R. C. D.; Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias, estudo de caso: Bacia do rio Solimões, 2009. 182 f. Dissertação (Mestrado em recursos hídricos e saneamento ambiental) – Instituto de Pesquisas hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M. P.; GONÇALVES, L. G. G.; CALMANT, S.; GETIRANA, A.; SILVA, J. Santos. Assimilating in situ and radar altimetry data into a large-scale hydrologic-hydrodynamic model for streamflow forecast in the Amazon. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 2929–2946, doi:10.5194/hess-17-2929-2013. 2013.
- PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; ALLASIA, D. Data Assimilation in a large-scale distributed hydrological model for medium-range flow

- forecasts. In: PROCEEDINGS OF SYMPOSIUM HS2004 AT IUGG2007, Perugia. Perugia: IAHS, 2007. p.471-478. (IAHS Publication, 313). 2007.
- PAN, M.; LI, H.; WOOD, E. Assessing the skill of satellite-based precipitation estimates in hydrologic applications. *Water Resources Research* , 46 (9), 10.1029/2009WR008290W09535. 2010.
- PAUWELS, Valentijn R. N.; DE LANNOY, Gabriëlle J.M. 2009. Ensemble-based assimilation of discharge into rainfall-runoff models: A comparison of approaches to mapping observational information to state space. *Water Resources Research*, Vol. 45, W08428, doi:10.1029/2008WR007590.
- PEREIRA F. A., J.; CARBONE, R. E.; JANOWIAK, J. E.; ARKIN, P.; JOYCE, R.; HALLAK, R. Satellite Rainfall Estimates Over South America - Possible Applicability to the Water Management of Large Watersheds. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* , 46 (2), 344-360. 2010.
- PINTO, E. J. de A.; AZAMBUJA, A. M. S. de; FARIAS, J. A. M.; SALGUEIRO, J. P.de B.; PICKBRENNER, K. (Coords.). Atlas pluviométrico do Brasil: isoietas mensais, isoietas trimestrais, isoietas anuais, meses mais secos, meses mais chuvosos, trimestres mais secos, trimestres mais chuvosos. Brasília: CPRM, 1 DVD. Escala 1.5:000.000. Equipe Executora: Da Costa, Margarida Regueira; Dantas, Carlos Eduardo de Oliveira; Melo, De Azambuja, Andressa Macêdo Silva; Denise Christina de Rezende; Do Nascimento, Jean Ricardo da Silva; Dos Santos, André Luis M. Real; Farias, José Alexandre Moreira; Machado, Érica Cristina; Marcuzzo, Francisco Fernando Noronha; Medeiros, Vanesca Sartorelli; Rodrigues, Paulo de Tarso R.; Weschenfelder, Adriana Burin; Sistema de Informação Geográfica-SIG - versão 2.0 - atualizada em novembro/2011; Programa Geologia do Brasil; Levantamento da Geodiversidade. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br>>. Acesso em: 1 set. 2014. 2011.
- POMPEU, Marcela Machado; SOUZA, José Ricardo Santos; RIBEIRO, Wanda Maria do Nascimento. Estimativas de Precipitação através das ocorrências de raios na bacia do rio Tocantins. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Vol. 9, No 4. 2016.
- PRAKASH, SATYA; MITRA, ASHISK; PAI, D.S.; AGHAKOUCHAK, AMIR. From TRMM to GPM: How well can heavy rainfall be detected from space? *Advances in Water Resources* 88, 1–7. 2016.
- QIN, Changbo; JIA, Yangwen; SU, Z.(Bob); ZHOU, Zuhao; QIU, Yaqin; SUHUI, Shen. Integrating Remote Sensing Information INTO A Distributed Hydrological Model for Improving Water Budget Predictions in Large-scale Basins through Data Assimilation. *Sensors*, 8, 4441-4465; DOI: 10.3390/s8074441. 2008
- QUIROZ, J. 2009. Modelagem hidrológica com uso da estimativa de chuva por sensoriamento remoto. 144 f. Dissertação (Mestrado em recursos hídricos e saneamento ambiental) – Instituto de Pesquisas hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- QUIROZ, J.; COLLISCHONN, W.; LAVADO, C. W. Modelización hidrológica usando estimaciones de lluvia por satélite en la cuenca del río Huallaga. *Revista Peruana Geo-atmosférica RPGA* , 3, 51-62. 2011.
- QUIROZ, J.; COLLISCHONN, W. Método de combinação de dados de precipitação estimados por satélite e medidos em pluviômetros para a modelagem hidrológica, *Revista Brasileira de Recursos Hidricos*. VOLUME. 20 - Nº. 1. DOI: 10.21168/rbrh.v20n1.p202-217. 2015.
- RAKOVEC, O., A. WEERTS, P. HAZENBERG, P. TORFS, AND R. UIJLENHOET. State updating of a distributed hydrological model with Ensemble Kalman Filtering: Effects of updating frequency and observation network density on forecast accuracy, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16(9), 3435–3449, doi:10.5194/hess-16-3435. 2012.

- RAKOVEC, O., A. WEERTS, J. SUMIHAR, AND R. UIJLENHOET, Operational aspects of asynchronous filtering for flood forecasting, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19(6), 2911–2924, doi:10.5194/hess-19-2911-2015.
- REICHLER, Rolf H. Data assimilation methods in the Earth sciences. *Advances in Water Resources* 31, 1411–1418. 2008.
- RIDLER, M. E.; VAN VELZEN, N.; HUMMEL, S.; SANDHOLT, I.; FALK, A. K.; HEEMINK, A.; MADSEN, H. Data assimilation framework: Linking an open data assimilation library (OpenDA) to a widely adopted model interface (OpenMI). *Environmental Modelling & Software*. V. 57; 76- 89. 2014.
- ROZANTE, J. R., MOREIRA, D. S., GONCALVES, L. G., & VILA, D. A. Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation over South America. *Wea. Forecasting* , 25 (3), 885-894. 2010.
- SAW, B. L. Infrared and passive microwave satellite rainfall estimate over tropics, 2005. 113 f. *Dissertação (Master of Science) – Faculty of the Graduate School, University of Missouri, Columbia.*
- SALAMON, P.; FEYEN, L. Assessing parameter, precipitation, and predictive uncertainty in a distributed hydrological model using sequential data assimilation with the particle filter. *Journal of Hydrology* 376, 428–442. 2009.
- SENE, K. *Hydrometeorology: forecasting and applications*. 1. ed. United Kingdom: Springer, 2010.
- SEO, Dong-Jun; Cajina, L.; Corby, R.; Howieson T. Automatic state updating for operational streamflow forecasting via variational data assimilation. *Journal of Hydrology* 367 255–275. 2009.
- SERRAT-CAPDEVILLA, A.; VALDES, J.; GUPTA, H. V.; MERINO, M.; BA, K.; VALDES, R.; DURCIK, M. Real-Time Multi-Model Hydrologic Forecasts in Africa using Satellite Data. In: *Proceedings of the Arizona Hydrological Society 2013 Symposium Tucson, Arizona September 18-21, 2013*. pp.99. 2013.
- SHUTTLEWORTH, W. J. *Terrestrial Hydrometeorology* (1 ed.). John Wiley & Sons, UK. 2012.
- SOROOSHIAN, S., DUAN, Q.; GUPTA, V.K., Calibration of conceptual rainfall-runoff models using global optimization: application to the Sacramento soil moisture accounting model. *Water Resour. Res.*, 29(4): 1185-1194. 1993.
- STISEN, S.; SANDHOLT, I. Evaluation of remote-sensing-based rainfall products through predictive capability in hydrological runoff modelling. *Hydrological Processes* , 24 (7), 879-891. 2010.
- SU, F.; GAO, H.; HUFFMAN, G.; LETTENMAIER, D. Potential utility of the real-time TMPA-RT precipitation estimates in streamflow prediction. *Journal of Hydrometeorology* , 12 (3), 444-455. 2011.
- SUMNER, G. *Precipitation Process and Analysis* (1 ed.). Chichester: Jhon Wiley & Sons Ltd. 1998.
- TAPIADOR, F. J.; TURK, F.; PETERSEN, W.; HOU, A. Y.; GARCIA-ORTEGA, E.; MACHADO, L. A.; ANGELIS, C. F.; SALIO, P.; KIDD, C.; HUFFMAN, G. J. & DE CASTRO, M. Global precipitation measurement: Methods, datasets and applications', *Atmospheric Research* 104-105, 70 - 97. 2012.
- TIAN, Y.; PETERS-LIDARD, C. D.; CHOUDHURY, B. J.; GARCIA, M. Multitemporal Analysis of TRMM-Based Satellite Precipitation Products for Land Data Assimilation Applications. *J. Hydrometeor* , 8 (6), 1165-1183. 2007.
- TIAN, Y.; PETERS-LIDARD, C. D. A global map of uncertainties in satellite-based precipitation measurements. *Geophysical Research Letters* , 37 (24), doi:10.1029/2010GL046008. 2010.

- TUCCI, C. E.; CLARKE, R. T.; COLLISCHONN, W.; DIAS, P. L. S.; OLIVEIRA, G. S. Long-term flow forecasts based on climate and hydrologic modeling: Uruguay River basin. *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 39, NO. 7, 1181, doi:10.1029/2003WR002074, 2003.
- TUCCI, C. E.. Modelos hidrológicos; Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos/ABRH; 2 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.
- TUCCI, C. E.; COLLISCHONN, W. Flood Forecasting, *WMO Bulletin*, v. 55 n.3, p.179-184, July 2006.
- VELASCO-FORERO, C. A.; SEMPERE-TORRES, D.; CASSIRAGA, E. F.; GÓMEZ-HERNÁNDEZ, J. J. A non-parametric automatic blending methodology to estimate rainfall fields from rain gauge and radar data. *Advances in Water Resources* , 32 (7), 986-1002. 2009.
- VILA, D. A.; DE GONCALVES, L. G.; TOLL, D. L.; ROZANTE, J. R. Statistical Evaluation of Combined Daily Gauge Observations and Rainfall Satellite Estimates over Continental South America. *J. Hydrometeor* , 10 (2), 533-543. 2009.
- VRUGT, J. A.; DIKS, C. G. H.; GUPTA, H. V.; BOUTEN, W.; VERSTRATEN, J. M. Improved treatment of uncertainty in hydrologic modeling: Combining the strengths of global optimization and data assimilation. *Water Resources Research*, vol. 41, W01017, doi:10.1029/2004WR003059, 2005.
- VRUGT, Jasper A.; GUPTA, Hoshin V.; NUALLÁIN, BREANNDÁN Ó.; BOUTEN, Willem. Real-Time Data Assimilation for Operational Ensemble Streamflow Forecasting. *JOURNAL OF HYDROMETEOROLOGY*. Vol. 7. P. 548-565. 2006.
- VRUGT, J. A.; TER BRAAK, C. J.F.; DIKS, C. G.H.; SCHOUPS, G. Hydrologic data assimilation using particle Markov chain Monte Carlo simulation: Theory, concepts and applications. *Advances in Water Resources* 51, 457–478. 2013
- WANDERS, N.; PAN, M.; WOOD, E.F. Correction of real-time satellite precipitation with multi-sensor satellite observations of land surface variables. *Remote Sensing of Environment* 160. 206–221. 2015.
- WANG LI, M. Q. J.; BENNETT, J. C.; ROBERTSON, D. E: A strategy to overcome adverse effects of autoregressive updating of streamflow forecasts, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 19, p. 1-15, 2015, doi:10.5194/hess-19-1-2015.
- WEERTS, A. H.; EL SERAFY, G. Y. H. Particle filtering and ensemble Kalman filtering for state updating with hydrological conceptual rainfall-runoff models, *Water Resources Research* 42(9), DOI: 10.1029/2005WR004093. 2006.
- WU, H.; ADLER, R. F.; HONG, Y.; TIAN, Y.; POLICELLI, F. Evaluation of global flood detection using satellite-based rainfall and a hydrologic model. *Journal of Hydrometeorology*, 13 (4), 1268-1284. 2012.
- WU, H.; ADLER, R. F.; TIAN, Y.; HUFFMAN, G. J., H., L.; WANG, J. Real-time global flood estimation using satellite-based precipitation and a coupled land surface and routing model. *AGU Publications*, 10.1002/2013WR014710. 2014.
- XIE, P.; ARKIN, P.A. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 78-2539. 1997.
- XIE. X.; MENG S.; LIANG S.; YAO, Y. Improving streamflow predictions at ungauged locations with real-time updating: application of an EnKF-based state-parameter estimation strategy. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 3923–3936, 2014.

- XIE, X.; ZHANG, D. A partitioned update scheme for stateparameter estimation of distributed hydrologic models based on the ensemble Kalman filter, *Water Resour. Res.*, 49, 7350–7365, doi:10.1002/2012WR012853, 2013.
- XU, Xingya; ZHANG, Xuesong; FANG, Hongwei; LAI, Ruixun; ZHANG, Yuefeng; HUANG, Lei; LIU, Xiaobo; A real-time probabilistic channel flood-forecasting model based on the Bayesian particle filter approach. *Environmental Modelling & Software* 88, p. 151-167. 2017
- XUE, X., HONG, Y., LIMAYE, A. S., GOURLEY, J. J., HUFFMAN, G. J., KHAN, S. I., Statistical and hydrological evaluation of TRMM-based Multi-satellite Precipitation Analysis over the Wangchu Basin of Bhutan: Are the latest satellite precipitation products 3B42V7 ready for use in ungauged basins? . *Journal of Hydrology* , 499 (0), 91-99. 2013
- YILMAZ, K. K.; HOGUE, T. S.; HSU, K.-L.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, H. V.; WAGENER, T. Intercomparison of Rain Gauge, Radar, and Satellite-Based Precipitation Estimates with Emphasis on Hydrologic Forecasting. *J. Hydrometeor* , 6 (4), 497-517. 2005
- YILMAZ, K. K.; ADLER, R. F.; TIAN, Y.; HONG, Y.; PIERCE, H. F. Evaluation of a satellite-based global flood monitoring system, *International Journal of Remote Sensing* 31(14), 3763-3782. 2010.
- YONG, B.; HONG, Y.; REN, L. L.; GOURLEY, J. J.; HUFFMAN, G. J.; CHEN, X.; WANG, W. & KHAN, S. I. Assessment of evolving TRMM-based multisatellite real-time precipitation estimation methods and their impacts on hydrologic prediction in a high latitude basin, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 117(D9), DOI: 10.1029/2011JD017069. 2012
- ZHANG Y.; HONG,Y.; GOURLEY, J. J.; WANG, X.; BRAKENRIDGE, G. R.; VERGARA, T. H. Impact of Assimilating Spaceborne Microwave Signals for Improving Hydrological Prediction in Ungauged Basins. In: *Remote Sensing of the Terrestrial Water Cycle*. 2015, pp. 439-450. DOI: 10.1002/9781118872086.ch27.

ANEXOS

A1. Descrição da técnica de assimilação AsMGB

Este método de assimilação AsMGB foi apresentado nos trabalhos de Collischonn *et al.* (2007), Collischonn *et al.* (2005), Meller *et al.* (2012), Paz *et al.* (2007). A assimilação de dados no modelo MGB-IPH é realizada por meio de um método empírico que utiliza as vazões observadas em tempo real para atualizar as variáveis de estado do modelo, representadas pelas vazões calculadas ao longo da rede de drenagem e pelo volume de água armazenado nos reservatórios, superficial, subsuperficial e subterrâneo do modelo hidrológico.

Primeiramente se define o período de assimilação, o qual é um período anterior imediato ao início da previsão. Para cada estação p com dados de vazão de observação e para cada intervalo de tempo, calcula-se um fator de correção (FCA) definido como o quociente entre o somatório das vazões observadas e calculadas, conforme apresentado na seguinte equação.

$$FCA_p = \frac{\sum_{t=t_o-t_a}^{t_o} Q_{obs}^t}{\sum_{t=t_o-t_a}^{t_o} Q_{cal}^t} \quad \text{Eq. A1.1}$$

onde Q_{obs}^t e Q_{cal}^t são as vazões observadas e simuladas, respectivamente; t é o tempo de cálculo; t_o é o instante de tempo da realização da previsão; t_a é o intervalo de tempo durante o qual é feita a comparação usado para atualização do modelo.

Os fatores de correção são usados para corrigir as variáveis de estado como os volumes dos reservatórios subterrâneos, sub-superficial, superficial e vazões na rede drenagem em cada mini-bacia localizado a montante de cada estação marcado para assimilação.

Para atualizar as vazões na rede de drenagem, o fator FCA é ponderado pela área de drenagem relativa de cada minibacia. Assim, as correções da vazão na rede de drenagem no

método são mais fortes em minibacias localizadas sobre a drenagem principal, que possuem maiores áreas de drenagem acumuladas. Na minibacia onde existem dados fluviométricos, as vazões observadas são usadas em lugar das calculadas pelo modelo. Para as demais minibacias, as vazões calculadas pelo modelo são atualizadas de acordo com seguinte equação:

$$Qat_{i,s} = FCA_s \cdot Qcalc_i \cdot (A_i/A_s)^{ebac} + Qcalc_i \cdot [1 - (A_i/A_s)^{ebac}] \quad \text{Eq. A1.2}$$

onde, $Qat_{i,s}$ é o valor atualizado da vazão na rede de drenagem na minibacia i , localizada a montante do ponto s ; A_i é a área de drenagem acumulada na minibacia i ; A_s é a área de drenagem acumulada na minibacia de exutório da sub-bacia, onde existem dados observados e $ebac$ é um parâmetro com valores entre 0 e 1..

Na atualização do volume de água armazenada nos três reservatórios conceituais o mesmo fator de correção (FCA) aplicado à atualização da vazão na rede de drenagem é utilizado. Para os reservatórios, entretanto, a ponderação ocorre em função da fração do escoamento originária dos reservatórios conceituais do modelo, representada pela variável PBi . A correção dos volumes dos reservatórios conceituais é dada por:

quando se cumpre a seguinte relação:

$$PBi > PBlim$$

Eq. A1.3

calcula-se:

$$VBat_{i,s} = (FCA_s)^{bx} \cdot VB_i \cdot (PBi) + VB_i \cdot (1 - PBi)$$

onde, $VBat_{i,s}$ é o volume atualizado no reservatório na mini-bacia i , situada a montante de s ; VB_i é o volume calculado do reservatório conceitual na mini-bacia i ; PBi fração da vazão na rede drenagem originaria do reservatório conceitual; $PBlim$ é um parâmetro que mede a fração mínima de água necessária para que haja a correção dos reservatórios conceituais do modelo e bx é um parâmetro de assimilação com valores entre 0 e 1.

$PBi < PBlim$ calcula-se $VBat_{i,s} = VB_i$	A1.4
--	------

De aplicações anteriores do modelo MGB-IPH (Meller, 2012), os valores de PBlim assumem valores próximos a 30%. De acordo com Paz *et al.* (2007), quando o parâmetro bx assume valores próximos de 1, a atualização dos volumes dos reservatórios conceituais do modelo é relativamente rápida.

A2. Resultados da assimilação pela técnica de filtro de Partículas sobre a bacia do Rio das Almas

A bacia do rio das Almas localiza-se na parte sul da bacia do rio Tocantins (bacia em estudo neste trabalho) e apresenta uma área total de 10.000 km² até a confluência com o rio Tocantins como mostrado na Figura A2.1. O procedimento de geoprocessamento e de simulação hidrológica foi obtido do manual de exemplo e aplicação do modelo MGB (Collischonn, 2011). O período de simulação foi de 1/1/2000 até 1/1/2010 a passo de tempo diário. A bacia foi discretizada em 17 mini-bacias em 6 unidades de respostas hidrológicas, sendo o solo de uso agrícola em solo profundo com maior porcentagem em área total (Vide Figura A2.1). Aqui foi testado o método de assimilação de dados usando filtro de Partículas como teste preliminar. Durante os testes de assimilação, consideram-se 200 partículas, com o erro relativo das precipitações de 25%, o com o erro relativo nas vazões observadas de 15%.

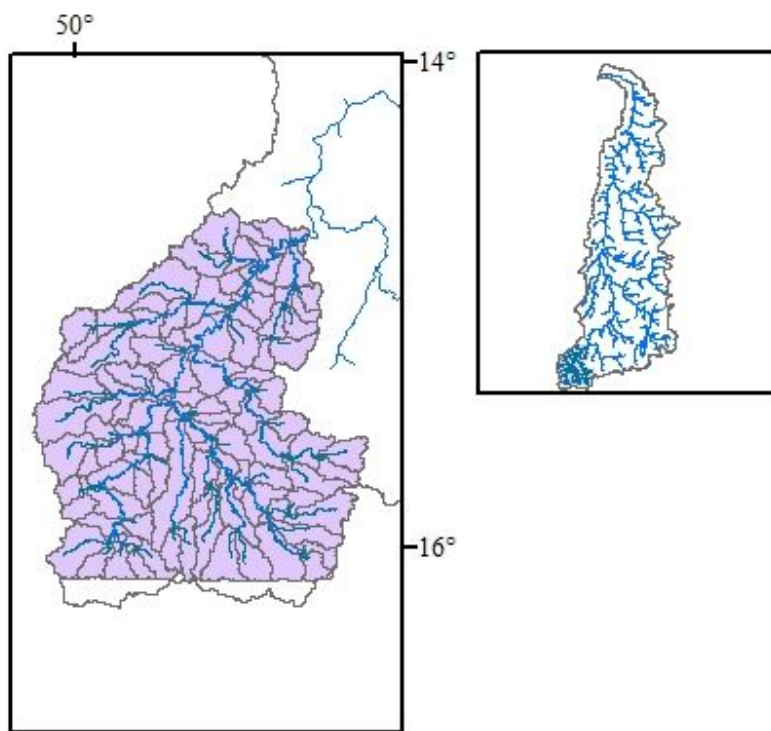


Figura A2.1 Localização da bacia do rio das Almas na região sul da bacia do rio Tocantins

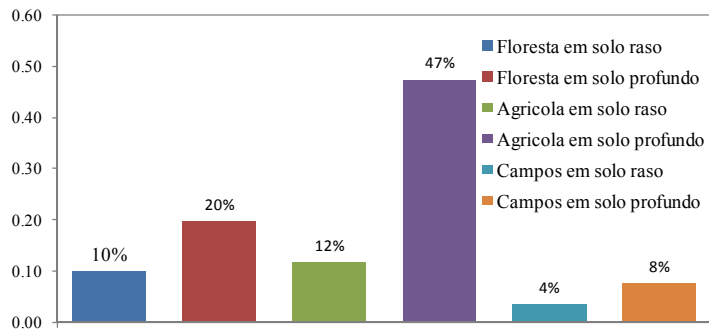


Figura A2.2 Distribuição porcentual das áreas das unidades de resposta hidrológica na bacia do rio das Almas.

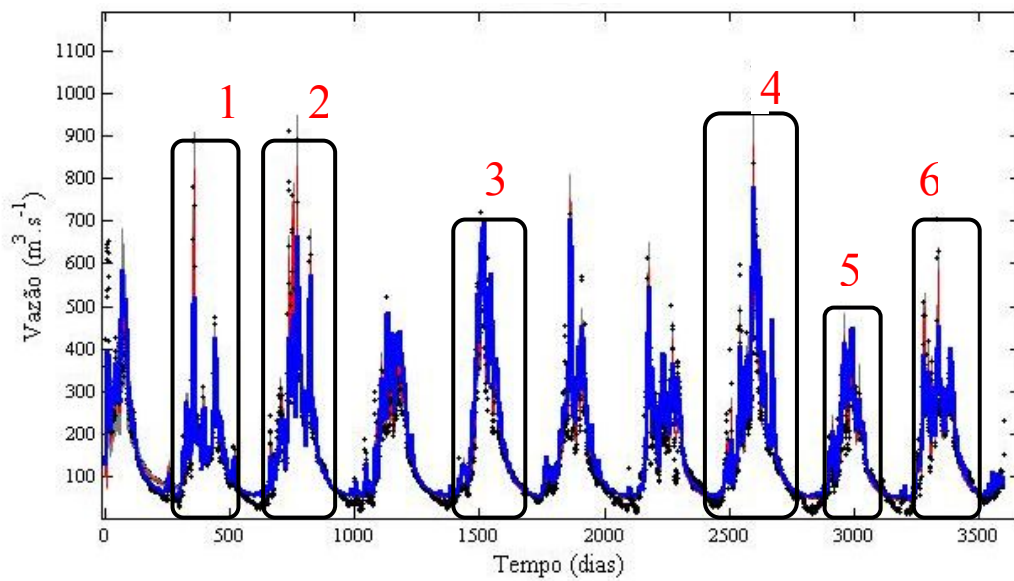


Figura A2.3 Hidrograma na estação A20250000 com registro de vazões observadas, simuladas e assimiladas durante o período de 1/1/2000 – 31/12/2010.

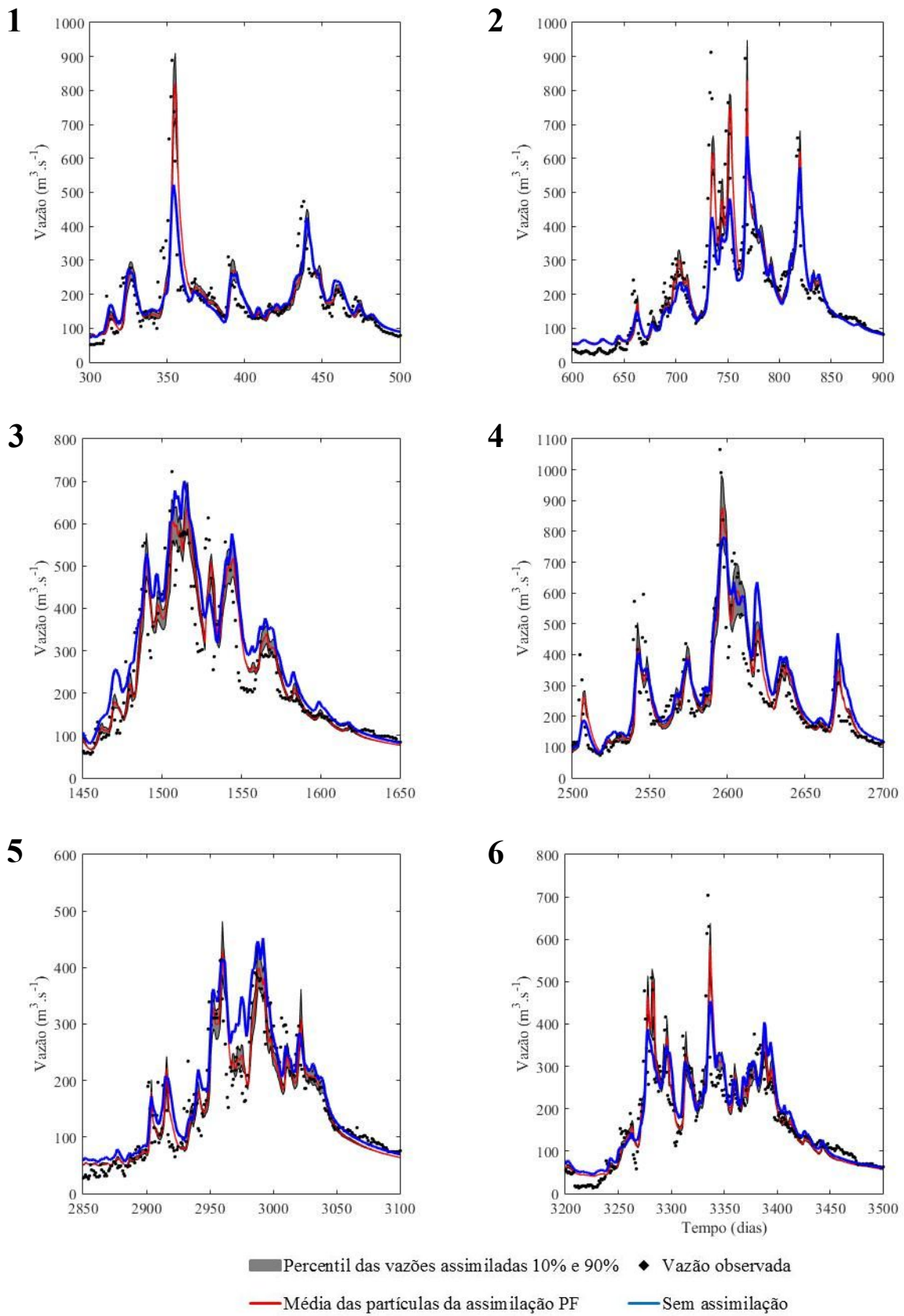


Figura A2.4 Hidrogramas com vazões observadas, simuladas e assimiladas para os eventos 1,2,3,4,5 e 6 marcados na Figura A2.3.

A.3 Estações telemétricas de precipitação sobre a bacia do rio Tocantins

Id	Código	Nome	Longitude (°)	Latitude (°)	Fonte
1	P22680000	Jatoba	-47,473	-9,995	ANA
2	P22900000	Porto real	-47,929	-9,307	ANA
3	P23700000	Descarreto	-47,469	-5,789	ANA
4	P42452200	Fazenda cigano	-47,166	-15,951	ANA
5	P42459080	Uhe queimado	-47,319	-16,209	ANA
6	PEC33A1CA	Tupiratins	-48,112	-8,392	CESTE
7	PEC33B2BC	Goiatins	-47,312	-7,709	CESTE
8	PEC33D75A	Tocantinopolis	-47,392	-6,289	CESTE
9	PEC33E2C0	Ponte_Alta	-47,536	-10,751	CESTE
10	PEC3425EA	Porto_Real	-47,932	-9,308	CESTE
11	PEC338726	Farinha	-47,165	-6,995	CESTE
12	PEC339450	Itacaja	-47,767	-8,391	CESTE
13	PEC340306	Rio_das_Balsas	-47,828	-10,002	CESTE
14	PAngicalBarramento	AngicalBarramento	-48,390	-12,240	ENERPEIXE
15	PAngicalJusante	AngicalJusante	-48,420	-12,220	ENERPEIXE
16	PFazendaAreia	FazendaAreia	-47,760	-12,610	ENERPEIXE
17	PFazendaSantana	FazendaSantana	-47,780	-12,690	ENERPEIXE
18	PPonteParana	PonteParana	-47,140	-13,430	ENERPEIXE
19	PRiodaPalma	RiodaPalma	-47,200	-12,420	ENERPEIXE
20	PSMPorJer	PortoJeronimo	-47,836	-11,758	SIMEPAR
21	PSMMangue	Mangues	-48,635	-10,345	SIMEPAR
22	PSMLucena	Lucena	-48,373	-9,690	SIMEPAR
23	PSMJacint	Jacinto	-48,657	-11,982	SIMEPAR
24	PSMIpueir	Ipueiras	-47,836	-11,247	SIMEPAR
25	PSMFazJur	FazJurupari	-48,515	-11,257	SIMEPAR
26	PSMAreias	Areias	-48,339	-10,896	SIMEPAR
27	PIAltoParaiso	Alto_Paraiso_GoiasI	-47,500	-14,100	INMET
28	PIAltoParnaiba	AltoParnaiba	-45,932	-9,108	INMET
29	PIAraguaina	Araguaina	-48,200	-7,100	INMET
30	PIAraguatins	Araguatins I	-48,100	-5,600	INMET
31	PIBalsas	Balsas I	-46,000	-7,500	INMET
32	PIBrasilia	Brasilia	-47,926	-15,789	INMET
33	PICampos_Lindos	Campos_Lindos I	-46,600	-8,200	INMET
34	PICarolina	Carolina I	-47,500	-7,300	INMET
35	PIDianopolis	Dianopolis I	-46,800	-11,600	INMET
36	PIEstreito	Estreito I	-47,400	-6,700	INMET
37	PIFormosoAraguaia	Formoso_Araguaia I	-49,600	-11,900	INMET
38	PIGoianesia	Goianesia	-48,990	-15,220	INMET
39	PIGurupi	Gurupi	-49,000	-11,700	INMET
40	PIMarianopolis	Marianopolis I	-49,700	-9,600	INMET
41	PIMateiros	Mateiros I	-45,900	-10,400	INMET

42	PIMonteAlegreGoias	Monte_A,_Goias I	-46,900	-13,200	INMET
43	PIImperatriz	Imperatriz	-47,460	-5,556	INMET
44	PINiquelandia	Niquelandia	-48,500	-14,500	INMET
45	PIPalmas	Palmas	-48,300	-10,200	INMET
46	PIParana	Parana	-47,989	-12,615	INMET
47	PIPedroAfonso	Pedro-Afonso	-48,200	-9,000	INMET
48	PIPeixe	Peixe	-48,543	-12,018	INMET
49	PIPosse	Posse	-46,400	-14,100	INMET
50	PRondonPara	Rondon_do_Para I	-48,100	-4,800	INMET
