



**UNILAB**

**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-  
BRASILEIRA**

**INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO LATO SENSU EM GESTÃO DE RECURSOS  
HÍDRICOS, AMBIENTAIS E ENERGÉTICOS**

**WALTER JHAMESON XAVIER PEREIRA**

**CALIBRAÇÃO DO MODELO SMAP DIÁRIO UTILIZANDO DADOS DE  
SENSORIAMENTO REMOTO PARA A BACIA DO POSTO  
FLUVIOMÉTRICO DE IGUATU**

**REDENÇÃO**

**2018**

WALTER JHAMESON XAVIER PEREIRA

**CALIBRAÇÃO DO MODELO SMAP DIÁRIO UTILIZANDO DADOS DE  
SENSORIAMENTO REMOTO PARA A BACIA DO POSTO  
FLUVIOMÉTRICO DE IGUATU**

Monografia apresentada ao Curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Gestão de Recursos Hídrico, Ambientais e Energéticos da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Gestão de Recursos Hídricos, Ambientais e Energéticos.

Orientadora: Profa. Dra. Regilany Paulo Colares

REDENÇÃO  
2018

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira  
Sistema de Bibliotecas da UNILAB  
Catalogação de Publicação na Fonte.

---

Pereira, Walter Jhameson Xavier.

P489c

Calibração do modelo SMAP diário utilizando dados de sensoriamento remoto para a bacia do posto fluviométrico de Iguatu / Walter Jhameson Xavier Pereira. - Redenção, 2018.  
43f: il.

Monografia - Curso de Especialização em Gestão De Recursos Hídricos, Ambientais E Energéticos, Instituto De Engenharias E Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2018.

Orientadora: Profa. Dra. Regilany Paulo Colares.

1. Desenvolvimento de recursos hídricos - Brasil. 2. SMAP. 3. Simulação Hidrológica. 4. SSEBop. 5. TRMM. I. Título

CE/UF/BSCL

CDD 333.91009813

---

UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA  
AFRO-BRASILEIRA

WALTER JHAMESON XAVIER PEREIRA


CALIBRAÇÃO DO MODELO SMAP DIÁRIO UTILIZANDO DADOS DE  
SENSORIAMENTO REMOTO PARA A BACIA DO POSTO  
FLUVIOMÉTRICO DE IGUATU

Monografia julgada e aprovada para obtenção do título de Especialista em da  
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira.

Data: 06/12/18

Nota: 9,3

Banca Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Regilany Paulo Colares (Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Ma. Mayara Cristina Santos Marques (IFMT)

  
\_\_\_\_\_  
Me. Cesar Arturo Sanchez Pena (COPPE/UFRJ)

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Estrutura do Modelo SMAP diário. ....	13
<b>Figura 2.</b> Bacia hidrológica da estação fluviométrica de Iguatu e estação fluviométrica em destaque.....	16
<b>Figura 3.</b> Polígonos de Thiessen para a Bacia do Posto Fluviométrico de Iguatu. ....	17
<b>Figura 4.</b> Dados de ETP, precipitação média e vazão observada para a bacia em estudo. ....	23
<b>Figura 5.</b> Precipitação média diária do CHIRPS para a Bacia de Iguatu. ....	24
<b>Figura 6.</b> Precipitação média diária do TRMM para a Bacia de Iguatu.....	24
<b>Figura 7.</b> Precipitação média diária do TRMM – Real time para a Bacia de Iguatu..	25
<b>Figura 8.</b> Evapotranspiração média diária do SSEBop para a Bacia de Iguatu.....	25
<b>Figura 9.</b> Hidrograma da melhor calibração do SMAP usando os dados de Precipitação do CHIRPS. ....	27
<b>Figura 10.</b> Frente de Pareto e funções objetivo para a melhor calibração do SMAP usando dados do CHIRPS. ....	28
<b>Figura 11.</b> Resultado da validação do SMAP para os melhores parâmetros de calibração usando dados do CHIRPS. ....	28
<b>Figura 12.</b> Hidrograma da calibração do SMAP usando os dados de Evapotranspiração do SSEBop. ....	29
<b>Figura 13.</b> Frente de Pareto e funções objetivo para a calibração do SMAP usando dados do SSEBop. ....	29
<b>Figura 14.</b> Resultado da validação do SMAP para os parâmetros de calibração obtidos usando os dados do SSEBop.....	30
<b>Figura 15.</b> Hidrograma da melhor calibração do SMAP usando os dados de Precipitação do TRMM.....	31
<b>Figura 16.</b> Frente de Pareto e funções objetivo para a melhor calibração do SMAP usando dados do TRMM. ....	31
<b>Figura 17.</b> Resultado da validação do SMAP para os melhores parâmetros de calibração usando dados do TRMM.....	32
<b>Figura 18.</b> Hidrograma da melhor calibração do SMAP usando os dados de Precipitação do TRMM Real time.....	33
<b>Figura 19.</b> Frente de Pareto e funções objetivo para a melhor calibração do SMAP usando dados do TRMM Real time. ....	33

<b>Figura 20.</b> Resultado da validação do SMAP para os melhores parâmetros de calibração usando dados do TRMM Real Time.....	34
<b>Figura 21.</b> Hidrograma da calibração do SMAP usando os dados de Precipitação do CHIRPS e de ETP do SSEBop. ....	35
<b>Figura 22.</b> Frente de Pareto e funções objetivo para a calibração do SMAP usando dados do CHIRPS+SSEBop. ....	36
<b>Figura 23.</b> Resultado da validação do SMAP para os melhores parâmetros de calibração usando dados do CHIRPS + SSEBop. ....	36
<b>Figura 24.</b> Hidrograma da calibração do SMAP usando os dados de Precipitação do TRMM e de ETP do SSEBop. ....	37
<b>Figura 25.</b> Frente de Pareto e funções objetivo para a calibração do SMAP usando dados do TRMM+SSEBop. ....	37
<b>Figura 26.</b> Resultado da validação do SMAP para os melhores parâmetros de calibração usando dados do TRMM + SSEBop. ....	38

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Faixa de variação dos parâmetros de Entrada do SMAP diário.....	21
<b>Tabela 2.</b> Parâmetros de Entrada do Algoritmo MOPSO.....	21
<b>Tabela 3.</b> Resultados das métricas de comparação dos sensores com os dados observados.....	26
<b>Tabela 4.</b> Resultados das métricas de comparação dos sensores de precipitação..	26
<b>Tabela 5.</b> Resultados das calibrações do modelo SMAP usando os dados de precipitação do CHIRPS.....	26
<b>Tabela 6.</b> Resultado da calibração do modelo SMAP usando os dados de evapotranspiração do SSEBOP. ....	29
<b>Tabela 7.</b> Resultados das calibrações do modelo SMAP usando os dados de precipitação do TRMM. ....	30
<b>Tabela 8.</b> Resultados das calibrações do modelo SMAP usando os dados de precipitação do TRMM Real Time. ....	32
<b>Tabela 9.</b> Resultados das calibrações do modelo SMAP utilizando somente dados de sensoriamento remoto.....	34

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Ad	área de drenagem
Ai	abstração inicial
ANA	Agência Nacional de Águas
Capc	capacidade de campo
CHIRPS	<i>Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data</i>
Crec	parâmetro de recarga subterrânea
Eb	escoamento básico
Ebin	vazão básica inicial
Ed	escoamento direto
Er	evapotranspiração real
Es	escoamento superficial
ET	evapotranspiração
ETP	evapotranspiração potencial
FO	função objetivo
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GDAS	Global Data Assimilation System
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
JAXA	Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial
K2t	constante de recessão do escoamento superficial
Kkt	constante de recessão do escoamento básico
MODIS	<i>Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MOPSO	<i>Multiobjective Particle Swarm Optimization</i>
NASA	Agência Espacial Americana
NSE	Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe
PBIAS	percentual de viés
R	coeficiente de correlação de Pearson
Rec	recarga subterrânea
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
Rsolo	reservatório do solo
Rsub	reservatório subterrâneo
Rsup	reservatório da superfície da bacia
SMAP	<i>Soil Moisture Accounting Procedure</i>



SSEB	<i>Simplified Surface Energy Balance</i>
SSEBop	<i>Simplified Surface Energy Balance</i> operacional
Str	capacidade de saturação do solo
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
Tuin	teor de umidade inicial

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	10
2 OBJETIVOS .....	12
2.1 OBJETIVO GERAL .....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
3 REVISÃO DE LITERATURA .....	12
3.1 MODELO SMAP.....	12
3.2 TRMM.....	13
3.3 CHIRPS.....	15
3.4 SSEBop.....	15
4 METODOLOGIA.....	16
4.1 ÁREA DE ESTUDO.....	16
4.2 DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS.....	17
4.3 DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO.....	18
4.4 MODELO SMAP DIÁRIO .....	19
4.5 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO SMAP DIÁRIO .....	20
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	23
5.1 AVALIAÇÃO DAS SÉRIES TEMPORAIS DE ENTRADA DO MODELO.....	23
5.2 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO SMAP .....	26
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	39
REFERÊNCIAS.....	40

# CALIBRAÇÃO DO MODELO SMAP DIÁRIO UTILIZANDO DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA A BACIA DO POSTO FLUVIOMÉTRICO DE IGUATU

Walter Jhameson Xavier Pereira<sup>1</sup>

Regilany Paulo Colares<sup>2</sup>

## RESUMO

Os modelos hidrológicos chuva-vazão apresentam-se como uma ferramenta essencial para auxiliar na tomada de decisão, planejamento e operação dos recursos hídricos. Todavia, a calibração de um modelo hidrológico na escala diária é frequentemente limitada pela disponibilidade e qualidade dos dados de entrada. O avanço das tecnologias de sensoriamento remoto aplicadas a hidrologia propiciou séries de dados com excelente cobertura geográfica global e boa amostragem espaço-temporal, podendo ser usadas como uma alternativa aos dados observados. O objetivo do presente trabalho foi testar o desempenho dos dados de sensoriamento remoto comparados a dados observados e avaliar a possibilidade de calibrar o modelo *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP) diário utilizando somente dados de entrada (precipitação e evapotranspiração) derivados de produtos de sensoriamento remoto para a bacia do posto fluviométrico de Iguatu. Para tanto, utilizou-se três tipos de dados para precipitação: *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS), *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) 3B42 e TRMM 3B42 *Real time* (TRMM-RT) e um dado de evapotranspiração: *Simplified Surface Energy Balance* operacional (SSEBop). O desempenho dos produtos de sensoriamento remoto foi testado em comparação aos dados observados utilizando as métricas: coeficiente de correlação de Pearson (R), Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e percentual de viés (PBIAS). Os resultados indicaram que os sensores CHIRPS, TRMM E TRMM-RT conseguem representar de forma satisfatória a precipitação média diária na bacia, com NSE 0,56, 0,50 e 0,41, respectivamente. Contudo, os resultados obtidos para o SSEBop mostraram que este não consegue representar a evapotranspiração diária de forma eficiente R -0,08, PBIAS -43,05 e NSE -8,44. As calibrações do modelo SMAP utilizando o algoritmo *Multiobjective Particle Swarm Optimization* (MOPSO) para as combinações CHIRPS e SSEBop e TRMM e SSEBop foram satisfatórias, NSE 0,39 e 0,44, respectivamente. Todavia, não foi possível validar os parâmetros, pois o NSE das validações foram precário -2,62 e -0,17. As simulações utilizando o conjunto TRMM-RT e SSEBop obtiveram o desempenho insatisfatório NSE 0,17 para calibração e 0,01 para validação. Portanto, a combinação TRMM e SSEBop apresentou-se como uma alternativa eficiente para bacias com falhas nas séries de dados.

**Palavras-chave:** Desenvolvimento de recursos hídricos - Brasil. SMAP. Simulação Hidrológica. SSEBop. TRMM.

---

<sup>1</sup> Estudante do Curso de Especialização em Gestão de Recursos Hídricos, Ambientais e Energéticos pela Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira e Universidade Aberta do Brasil, polo Redenção.

<sup>2</sup> Doutora em Química pela Universidade Federal do Ceará.

## ABSTRACT

The rainfall-runoff hydrological models are an essential tool to help in the decision-making process, planning and operation of water resources. However, the calibration of a hydrological model on a daily scale is often limited by the availability and quality of the input data. The advancement of remote sensing technologies applied to hydrology provided data series with excellent global geographic coverage and good spatiotemporal sampling and could be used as an alternative to observed data. The objective of the present work was to test the performance of remote sensing data compared to observed data and to evaluate the possibility of calibrating the daily Soil Moisture Accounting Procedure (SMAP) using only input data (precipitation and evapotranspiration) derived from remote sensing products for the Iguatu basin. For this, three types of data were used for precipitation: Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS), Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) 3B42 and TRMM 3B42 Real time (TRMM-RT) and an evapotranspiration data: Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop). The performance of the remote sensing products was tested in comparison to the observed data using the Pearson correlation coefficient (R), Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient (NSE) and percentage of bias (PBIAS). The results indicated that the CHIRPS, TRMM and TRMM-RT can satisfactorily represent mean daily precipitation in the basin, with NSE 0.56, 0.50 and 0.41, respectively. However, the results obtained for SSEBop showed that it cannot efficiently represent daily evapotranspiration R -0.08, PBIAS -43.05 and NSE -8.44. The calibrations of the SMAP model using the Multiobjective Particle Swarm Optimization (MOPSO) algorithm for the CHIRPS and SSEBop and TRMM and SSEBop combinations were satisfactory, NSE 0.39 and 0.44, respectively. However, it was not possible to validate the parameters, since the NSE of the validations were precarious -2.62 and -0.17. The simulations using the TRMM-RT and SSEBop set obtained the unsatisfactory performance NSE 0.17 for calibration and 0.01 for validation. Therefore, the combination TRMM and SSEBop is an efficient alternative for basins with faults in the data series.

**Keywords:** Water resources development - Brazil. Hydrological simulation. SMAP. SSEBop. TRMM.

# 1 INTRODUÇÃO

Nas regiões áridas e semiáridas do mundo, os recursos hídricos são limitados e encontram-se sob pressão severa e crescente devido ao crescimento das populações, ao aumento do uso da água per capita e à irrigação (WHEATER et al., 2007).

Nesse contexto, os modelos hidrológicos chuva-vazão apresentam-se como ferramenta essencial para a simulação e prognósticos, objetivando permitir que os *stakeholders* tomem as decisões mais eficazes para o planejamento e a operação dos recursos hídricos, considerando as interações dos aspectos físicos, ecológicos, econômicos e sociais de um sistema do mundo real (SOROOSHIAN et al., 2008).

Dentre as diversas aplicações dos modelos hidrológicos destacam-se: transformação de chuva em escoamento, modelagem do armazenamento de água no solo e nos aquíferos, avaliação de impactos de mudanças e variabilidades climáticas sobre o regime hidrológico, previsão e alerta de inundação em tempo real, estimativa de frequências de secas e cheias, previsão e propagação de cheias, avaliação dos impactos das mudanças no uso da terra e manejo integrado de bacias hidrográficas (SOROOSHIAN et al., 2008; PONTES et al., 2015).

Os modelos hidrológicos podem ser classificados em termos de sua discretização espacial em: concentrados (*lumped*), semi-distribuídos e distribuídos. Os modelos concentrados consideram a bacia completa como um todo homogêneo, os modelos semi-distribuídos tentam calcular as contribuições de fluxo de áreas separadas ou sub-bacias que são tratadas como homogêneas e os modelos distribuídos que nos quais toda a bacia é dividida em áreas unitárias elementares, ou unidades de resposta hidrológica (XU, 2002; SANTOS, 2009).

O Soil Moisture Accounting Procedure (SMAP) é um modelo determinístico, conceitual e concentrado de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão (LOPES, 1981; LOPES et al. 1982; LOPES, 1999). O modelo SMAP possui três versões para diferentes escalas temporais (horária, diária e mensal) e foi desenvolvido em 1981 por Lopes, Braga e Conejo (1982).

Os modelos hidrológicos chuva-vazão recebem geralmente como entrada os dados de chuva e evapotranspiração potencial e a partir destes simulam a vazão. Todavia, quando se trabalha na escala de tempo diária é comum encontrar série pequenas e com falhas. No Brasil, existem muitos postos pluviométricos e

fluviométricos com falta de registro de dados de precipitação e vazão devido a problemas com os aparelhos de coleta e/ou ausência do operador em determinadas épocas do ano, o que comprometem a continuidade das informações (DE OLIVEIRA et al., 2010; ALLASIA et al., 2004). Além disso, grande parte das bacias hidrográficas brasileiras possuem baixa densidade de postos fluviométricos (CHAVES et al., 2002).

Durante muito tempo utilizou-se a regionalização de vazões e de parâmetros de modelos hidrológicos como estratégia para resolver o problema da carência de dados para bacias não-monitoradas ou com grandes falhas nas séries de dados (TUCCI, 2002; BARROS et al., 2013). Segundo Tucci (2002), a regionalização de vazões pode ser desde uma relação linear entre a vazão e a área ou uma relação mais complexa, envolvendo outras variáveis, como variáveis hidrometeorológicas e morfométricas.

Nos últimos anos, as técnicas de sensoriamento remoto mostraram claramente sua capacidade de monitorar componentes do balanço hídrico de grandes bacias hidrográficas em escalas de tempo variando de meses a décadas. Uma das vantagens dos dados de sensoriamento remoto comparado aos dados de medições das estações pontuais está no fato desses oferecerem cobertura geográfica global, boa amostragem espaço-temporal, monitoramento quase contínuo no tempo e a capacidade de medir mudanças de massa de água ocorrendo na superfície da Terra ou abaixo dela (CAZENAVE e SAVENIJE, 2008). Nesse cenário, os dados de sensoriamento remoto apresentam-se como uma alternativa a falhas ou ausência dos dados de medição e a regionalização de vazões e de parâmetros de modelos hidrológicos.

Nesse trabalho, serão utilizados dados de quatro produtos de sensoriamento remoto: *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS), *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) 3B42 e 3B42 *Real Time* (TRMM-RT), e *Simplified Surface Energy Balance* operacional (SSEBop), como dados de entrada na calibração do modelo hidrológico SMAP diário.

O modelo será calibrado para a bacia do posto fluviométrico localizada na cidade de Iguatu no Ceará (Código ANA 36160000). Para tanto, será testado a eficiência dos dados de sensoriamento comparados aos dados de campo e serão realizadas diversas calibrações testando um produto de sensoriamento de cada vez e a combinações desses.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Calibrar o modelo SMAP diário para a bacia hidrográfica do posto fluviométrico de Iguatu utilizando dados de sensoriamento remoto como entrada.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

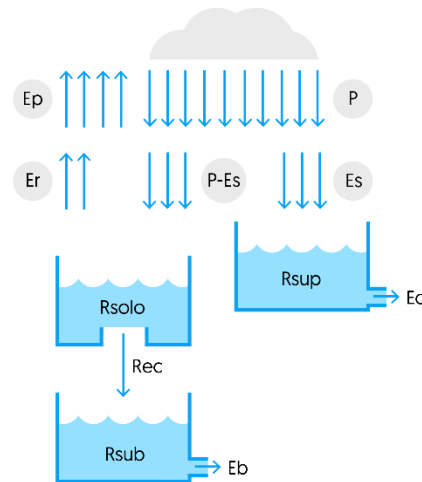
- a) Avaliar o desempenho das estimativas de precipitação média diária dos sensores CHIRPS, TRMM 3B42 e TRMM-RT utilizando as métricas: coeficiente de correlação de Pearson (R), Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e percentual de viés (PBIAS);
- b) Calibrar o modelo SMAP diário através do algoritmo MOPSO utilizando os dados de sensoriamento remoto como entrada: CHIRPS, TRMM 3B42, TRMM-RT e SSEBop, separadamente;
- c) Calibrar o modelo SMAP diário mantendo a evapotranspiração do SSEBop fixa e variando os dados de precipitação CHIRPS, TRMM 3B42 e TRMM-RT.
- d) Validar os parâmetros de todas as calibrações realizadas;
- e) Avaliar o desempenho das calibrações e validações do modelo SMAP utilizando as seguintes métricas: NSE, Raiz do Erro Quadrático Médio (RSME) e PBIAS.

## **3 REVISÃO DE LITERATURA**

### **3.1 MODELO SMAP**

O modelo SMAP na sua versão diária possui três reservatórios (reservatório do solo, reservatório da superficial e reservatório subterrâneo) e 6 parâmetros de calibração (LOPES, 1999). Na Figura 1 tem-se a representação dos reservatórios e de como se dão as transferências no modelo.

**Figura 1.** Estrutura do Modelo SMAP diário.



Fonte: PEREIRA (2017).

Pereira (2017) aplicou o modelo SMAP diário para bacias do semiárido cearense, inclusive para a bacia do posto fluviométrico de Iguatu e obteve resultados satisfatórios, NSE de todas calibrações acima de 0,70.

### 3.2 TRMM

O satélite TRMM foi lançado em novembro de 1997 pela Agência Espacial Americana (NASA) em parceria com a Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial (JAXA), com o objetivo de estudar a precipitação tropical para aplicações em pesquisas de tempo e clima e a missão foi encerrada em agosto de 2015 (KUMMEROW, 2000; NASA, 2015).

O TRMM é capaz de medir a precipitação que cai entre 35°N e 35°S do Equador. Este satélite possui órbita circular, não-sol síncrona, com uma inclinação de 35 graus em relação ao Equador e altura orbital de 350 km (no início da operação) e 403 km (a partir de 24/08/2001). O TRMM conta com um radiômetro de micro-ondas (TMI) com resolução de campo de visão de 11 km x 8 km a 37 GHz (JAXA, 2001; NASA, 2015). O produto do algoritmo 3B42 utilizando os dados do TRMM possui alta resolução espacial (0,258) e temporal (3 h) (ZULKAFI et al., 2014).

De acordo com Collischonn (2006), os dados do satélite TRMM para as bacias do rio São Francisco e do rio Tapajós superestimou sistematicamente as precipitações médias nas estações secas. Por outro lado, dados do TRMM foram



utilizados para a calibração do modelo distribuído Modelo de Grandes Bacias (MGB) para as bacias de do rio São Francisco e do rio Tapajós e os resultados obtidos foram satisfatórios comparados a calibração usando os dados de postos pluviométricos, indicando que as estimativas de satélite podem ser usadas para a simulação hidrológica chuva-vazão.

Estudos realizados por Collischonn et al. (2007) para a Bacia do Paraguai superior concluíram que as estimativas de precipitação fornecidas pelo satélite TRMM são consistentes, conseguem representar o regime de chuva e as variações sazonais com bastante fidelidade. Todavia, há uma tendência do satélite em superestimar a precipitação total.

Villazon e Inturias (2015) utilizaram os dados do TRMM para a Bacia do Rio Mamoré na Bolívia e concluíram que os dados do TRMM podem explicar satisfatoriamente a variabilidade espacial da precipitação e pode ser usado para fins de modelagem em bacias hidrográficas de médio a grande porte.

Serrão et al. (2016) trabalhou com diferentes produtos de satélites para a bacia hidrográfica do rio Solimões e, concluiu que o TRMM possui uma tendência de subestimativa no verão em relação ao observado pelas estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Cruz et al. (2018) utilizou os dados do TRMM para calibrar o modelo do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH2) para a bacia do rio Jarapatuba localizada em Sergipe e constatou que para modelagem hidrológica, os valores aceitáveis dos coeficientes de eficiência para os cenários do TRMM só foram alcançados nas escalas de tempo de 10 dias e mensal.

Nogueira et al. (2018) avaliou os produtos do CHIRPS e do TRMM para a região sul-sudeste de Minas Gerais e constatou que a estimativa do CHIRPS teve um desempenho superior ao do modelo TRMM nos primeiros três anos de estudo (2009-2011), mas teve um desempenho pior nos anos subsequentes (2012-2014). Segundo Nogueira et al. (2018) os dados do TRMM e CHIRPS apresentaram raiz do erro quadrático médio relativo (RRMSE) <50% para os períodos dezembro, janeiro e fevereiro; março, abril e maio; setembro, outubro e novembro; mostrando alta confiabilidade para esse período.

### 3.3 CHIRPS

O *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS) são um conjunto de dados pluviométricos quase-globais de mais de 30 anos, abrangendo da latitude 50°S a 50°N. O CHIRPS incorpora imagens de satélite de alta resolução (0,05°) com dados de estação *in-situ* para criar séries temporais de chuva (FUNK et al., 2015).

Paredes-Trejo et al. (2017) compararam as estimativas de precipitação mensais do produto CHIRPS v.2 com as observações de campo de 21 estações pluviométricas localizadas no nordeste do Brasil para um período de 32 anos e a análise global revelou que o CHIRPS mostra uma superestimação dos menores valores de precipitação mensal e subestimação de valores mais altos (cerca de 100 mm / mês). Para a estação chuvosa (março e maio) o CHIRPS teve melhor desempenho para a maioria das métricas. A correspondência entre as estimativas de precipitação e as observações da estação para este período é maior, dado que R médio foi de 0,925 e NSE de 0,852.

### 3.4 SSEBop

O modelo *Simplified Surface Energy Balance* operacional (SSEBop) utiliza dados térmicos de sensoriamento remoto e dados de campo para calcular a Evapotranspiração (ET) tanto em escala mensal quanto sazonal (SENAY et al., 2013). O SSEBop possui resolução espacial de 1 km e foi baseado no Simplified Surface Energy Balance (SSEB) proposto por Senay et al. (2007). Além disso, o SSEBop utiliza os dados do sensor *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) e da base de dados *Global Data Assimilation System* (GDAS) para calcular a ET (SAVOCA, 2013; SENAY et al., 2013).

De Paula (2018) aplicou o modelo SSEBop para culturas de soja e feijão na região da bacia hidrográfica do Rio Preto, e concluir que o SSEBop teve desempenho satisfatório em estimar a evapotranspiração real, apesar de ter sobrestimado em 0,33 mm na escala diária.

LOPES (2018) obteve desempenho satisfatório utilizando o produto do SSEBop para a estimativa da evapotranspiração real na região do Cerrado Brasileiro ( $R^2 = 0,86$  e  $NSE = 0,67$  para o trigo).

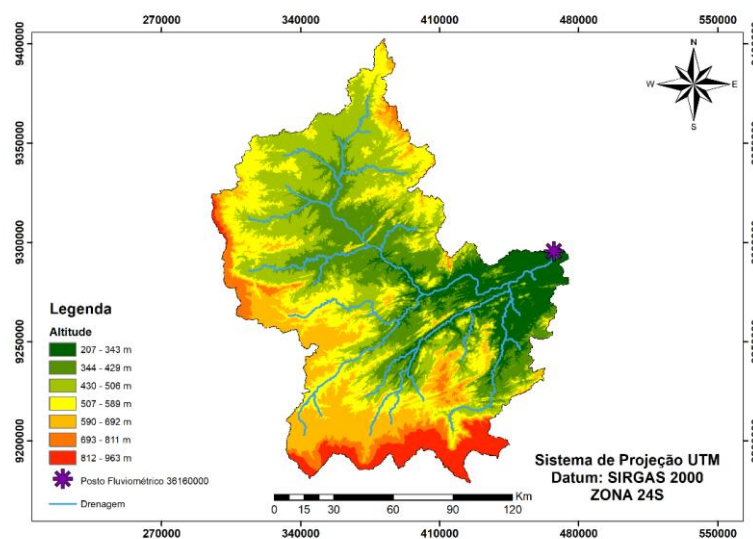
Portanto, de acordo com a bibliografia citada conclui-se que os produtos de sensoriamento remoto escolhidos para este trabalho possuem bom desempenho para a região nordeste do Brasil, com exceção do SSEBop que possui poucos estudos para a região.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

A estação fluviométrica de Iguatu (Figura 2), código da ANA 36160000, está localizada no Rio Jaguaribe no Estado do Ceará, mais especificamente na bacia do Alto Jaguaribe, latitude  $6^{\circ} 22' 27.84''$  S e longitude  $39^{\circ} 17' 35.88''$  W, possuindo dados desde 1912 até os dias atuais. A área de drenagem da bacia hidrográfica na qual o exutório é a estação fluviométrica 36160000, denominada por este trabalho de Bacia do Posto Fluviométrico de Iguatu, é de 20.700,00 km<sup>2</sup>. Optou-se por estudar essa bacia em específico por que ela está incluída na bacia do reservatório Presidente Juscelino Kubitschek de Oliveira (Conhecido por açude Orós) que possui importância estratégica para o abastecimento de água e segurança hídrica do Estado.

**Figura 2.** Bacia hidrológica da estação fluviométrica de Iguatu e estação fluviométrica em destaque.

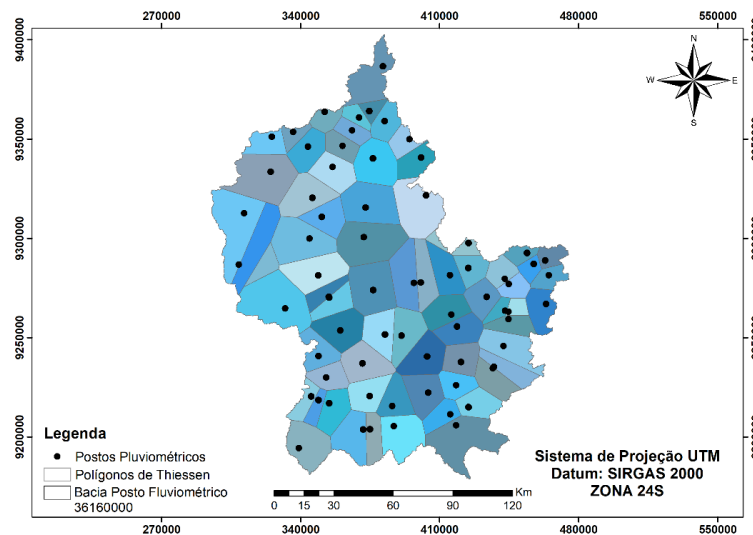


Fonte: PEREIRA (2017).

## 4.2 DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS

Os dados de precipitação foram obtidos através do banco de dados das estações pluviométricas da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). A precipitação média diária na bacia foi calculada utilizando 71 postos pluviométricos (Figura 3) através do método dos polígonos de Thiessen (THIESSEN, 1911).

**Figura 3.** Polígonos de Thiessen para a Bacia do Posto Fluviométrico de Iguatu.



Fonte: PEREIRA (2017).

As informações de evapotranspiração potencial (ETP) foram calculadas a partir dos dados de temperatura máxima, média e mínima obtidos através das estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizadas nas cidades de Campos Sales, Barbalha e Iguatu, utilizando-se a metodologia proposta por Hargreaves e Samani (1985). A média espacial da ETP foi calculada usando o método dos polígonos de Thiessen e as falhas da série obtida foram preenchidas com os dados da normal climatológica de ETP (período 01/01/1981 a 31/12/2010) da região em estudo.

Os dados de vazão observada do posto fluviométrico de Iguatu foram obtidos no sistema de informações HidroWeb (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb>) da Agência Nacional de Águas (ANA). Os dados de vazão observada foram utilizados nesse trabalho para testar a eficiência do modelo SMAP para calibração e validação.

A série temporal diária do posto fluviométrico de Iguatu possui apenas 2,5 % de falhas para o período de 1973 a 2018.

### 4.3 DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Todos os dados dos produtos de sensoriamento estudados nesse trabalho estavam em formato de grade (pixel) e, foram recortados para a área da bacia do posto fluviométrico de Iguatu, em seguida, foi calculada a variável (precipitação ou ET) média de todos os pixels usando um algoritmo em Python.

Os dados de estimativa de precipitação do TRMM foram obtidos no site da NASA - *Precipitation Measurement Missions* (<https://pmm.nasa.gov/trmm>). Para o TRMM foram gerados dois produtos: a precipitação total diária versão 3B42 derivada do algoritmo de Análise de Precipitação Multi-Satélite Versão 7 do TRMM com pós-processamento e o total diário em tempo real (3B42RT).

Os dados de estimativa de precipitação diária do CHIRPS foram obtidos no website do Climate Hazards Group que é hospedado pela UC Santa Barbara (<http://chg.geog.ucsb.edu/data/chirps>).

Os dados de estimativa de evapotranspiração do SSEBop foram obtidos no site do programa Americano *Early Warning and Environmental Monitoring* (<https://earlywarning.usgs.gov/uset>). O produto do SSEBop estava agregado de forma cumulativa (8 dias) e foi interpolado para escala diária utilizando um algoritmo escrito em Fortran seguindo o descrito em Senay et al. (2013).

O desempenho das séries de sensoriamento remoto foi testado em comparação aos dados observados, para tanto foram utilizados três métricas: PBIAS, NSE e coeficiente de correlação de Pearson (R). O coeficiente de determinação de Pearson foi calculado da seguinte forma:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Obs - \overline{Obs}) * (Sim - \overline{Sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [(Obs - \overline{Obs})^2] * \sum_{i=1}^n [(Sim - \overline{Sim})^2]}} \quad (1)$$

Onde Obs é a variável observada e Sim a variável estimada pelo sensor.

Por fim, avaliou-se a correlação e eficiência entres os diferentes produtos de sensoriamento remoto de precipitação.

#### 4.4 MODELO SMAP DIÁRIO

O modelo recebe como dados de entrada a precipitação total diária (mm), a evapotranspiração potencial média diária (mm) e o total acumulado de vazão observada diária (m<sup>3</sup>/s) para medir o desempenho do modelo. De acordo com Lopes et al. (1982), as variáveis de estado do modelo SMAP diário são atualizadas a cada dia da seguinte forma:

$$Rsolo_{(i+1)} = Rsolo_{(i)} + P - Es - Er - Rec \quad (2)$$

$$Rsup_{(i+1)} = Rsup_{(i)} + Es - Ed \quad (3)$$

$$Rsub_{(i+1)} = Rsub_{(i)} + Rec - Eb \quad (4)$$

Onde: Rsolo é o reservatório do solo (zona aerada), Rsup é o reservatório superficial da bacia, Rsub é o reservatório subterrâneo (zona saturada), P é a chuva média na bacia, Es é o escoamento superficial, Ed é o escoamento direto, Er é a evapotranspiração real, Rec é a recarga subterrânea e Eb é o escoamento básico (LOPES, 1999).

A inicialização do SMAP diário se dá através de duas variáveis de inicialização: teor de umidade inicial (Tuin [adimensional]) e vazão básica inicial (Ebin [m<sup>3</sup>/s]). Os reservatórios são inicializados da seguinte forma, sendo que Ad é a área de drenagem da bacia:

$$Rsolo_{(1)} = Tuin * Str \quad (5)$$

$$Rsup_{(1)} = 0 \quad (6)$$

$$Rsub_{(1)} = Ebin / (1 - kk) / Ad * 86.4 \quad (7)$$

O modelo possui cinco funções de transferência e a separação do escoamento superficial é realizado com base no método do SCS (*US Soil Conservation Service*). As funções de transferências do SMAP diário podem ser representadas em pseudocódigo da seguinte forma (LOPES, 1981; LOPES et al. 1982; LOPES, 1999):

$$Se (P > Ai) \text{ Então } S = Str - Rsolo \quad (8)$$

$$Es = \frac{(P - Ai)^2}{(P - Ai + S)} \quad (9)$$

$$\text{Caso contrário } Es = 0 \quad (10)$$

$$\text{Se } ((P - Es) > Ep) \text{ Ent\~{a}o } Er = Ep \quad (11)$$

$$\text{Caso contr\~{a}rio } Er = (P - Es) + (Ep - (P - Es)) * Tu \quad (12)$$

$$\text{Se } R_{solo} > (Capc * Str) \text{ Ent\~{a}o } Rec = Crec * Tu * (R_{solo} - (Capc * Str)) \quad (13)$$

$$\text{Caso contr\~{a}rio } Rec = 0 \quad (14)$$

$$Ed = R_{sup} * (1 - K2) \quad (15)$$

$$Eb = R_{sub} * (1 - Kk) \text{ sendo } Tu = \frac{R_{solo}}{Str} \quad (16)$$

Onde os seis par\~{a}metros do modelo s\~{a}o: Str = capacidade de satura\~{c}o do solo (mm), K2t = constante de recess\~{a}o do escoamento superficial (dias), Crec = par\~{a}metro de recarga subterr\~{a}nea (%), Ai = abstra\~{c}o inicial (mm), Capc = capacidade de campo (%) e Kkt = constante de recess\~{a}o do escoamento b\~{a}sico (dias).

As unidades dos par\~{a}metros s\~{a}o ajustadas da seguinte forma:

$$Kk = 0,5^{(1/Kkt)} \quad (17)$$

$$K2 = 0,5^{(1/K2t)} \quad (18)$$

Onde Kkt e K2t s\~{a}o expressos em dias em que a vaz\~{a}o cai \~{a} metade de seu valor, Crec e Capc s\~{a}o multiplicados por 100 e os eventuais transbordos do R<sub>solo</sub> s\~{a}o transformados em escoamento superficial (LOPES, 1999).

Por fim, o c\~{a}lculo da vaz\~{a}o \~{e} dado pela equa\~{c}o:

$$Q = \frac{(Es + Eb) * Ad}{86,40} \quad (19)$$

#### 4.5 CALIBRA\~{C}O E VALIDA\~{C}O DO MODELO SMAP DI\~{A}RIO

O algoritmo do modelo SMAP di\~{a}rio utilizado nesse trabalho foi criado e adaptado por Barros (2007). Barros (2007) implementou o modelo SMAP di\~{a}rio em linguagem MATLAB e utilizou t\~{e}cnicas de otimiza\~{c}o multiobjetivo na calibra\~{c}o e valida\~{c}o do modelo.

Optou-se por come\~{c}ar a calibra\~{c}o sempre no in\~{i}cio do m\~{e}s de outubro, pois nessa \~{e}poca do ano o solo est\~{a} seco e a vaz\~{a}o de base \~{e} pequena (BARROS,

2007; NUNES et al., 2014). Dessa forma, os parâmetros de Ebin e Tuin foram fixados em zero para todas as calibrações. A faixa de variação dos parâmetros do SMAP (Tabela 1) nas simulações desse trabalho foram as mesmas sugeridas por Barros (2007).

**Tabela 1.** Faixa de variação dos parâmetros de Entrada do SMAP diário.

Parâmetro	Faixa de Variação	Unidades
Str	100 - 2000	[mm]
K2t	0,2 - 10	[dias]
Ai	0 - 10	[mm]
Capc	0 - 100	[%]

Diversos autores sugerem que a calibração seja realizada com séries suficientemente longas (aproximadamente 8 anos) que consigam capturar a variabilidade climática natural da bacia (LOPES, 1999; BARROS, 2007). Todavia, nesse trabalho não foi possível manter a mesma quantidade de anos para calibração e validação devido a falhas existentes nas séries temporais dos postos pluviômetros e fluviométrico e as diferenças nos períodos disponíveis para cada produto. Dessa forma, utilizou-se a maior série de dados sem falhas disponível para a área.

Para a escolha dos “parâmetros ótimo” de calibração optou-se por utilizar o algoritmo evolucionário multiobjetivo MOPSO (Multiobjective Particle Swarm Optimization) baseado nos conceitos de dominância de Pareto proposto por ALVAREZ-BENITEZ et al. (2005). De acordo com Barros (2007) o algoritmo MOPSO teve desempenho superior em densidade frente a outros algoritmos multiobjetivos. Os parâmetros do MOPSO utilizados nesse trabalho (Tabela 2) foram os mesmos descritos por Barros (2007) na sua dissertação, os quais alcançaram desempenho satisfatório quando aplicados a bacias hidrográficas cearenses.

**Tabela 2.** Parâmetros de Entrada do Algoritmo MOPSO.

Parâmetro	Valor
Número de Variáveis	4
Tamanho da população inicial	100
Número de Interações	100
Constante $c_1$	2
Constante $c_2$	2
Velocidade máxima da partícula	0,1

A funções objetivos (FO) utilizadas para a escolha dos melhores parâmetros pelo algoritmo MOPSO foram: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) proposto por Nash e Sutcliffe (1970) e o Nash de Picos que é uma modificação



do NSE para picos proposta por Reis Junior et al. (2009). O NSE foi calculado da seguinte forma:

$$FO_1 = NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (20)$$

Onde  $\theta$  é o conjunto de parâmetros do modelo,  $Q_{obs}$  é a série de vazões observadas,  $Q_{sim}$  a série de vazões simuladas,  $n$  o comprimento da série em meses e  $\bar{Q}_{obs}$  é a média mensal das vazões observadas.

O Nash de picos foi calculado da seguinte forma:

$$FO_2 = \text{Nash de Picos} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (q_{p,i}^{obs} - q_{p,i}^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (q_{p,i}^{obs} - \bar{q}_{p,i}^{obs})^2} \quad (21)$$

Onde  $q_{p,i}^{obs}$  é a vazão de pico observada,  $q_{p,i}^{sim}$  é a vazão de pico simulada,  $n$  é o tamanho da série em anos e  $\bar{q}_{p,i}^{obs}$  é a média das vazões de pico observadas.

As análises do desempenho da calibração e validação foram realizadas com base em três coeficientes de eficiência: NSE, Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e percentual de viés (PBIAS). O RMSE é calculado através da seguinte equação:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Sim_i - Obs_i)^2} \quad (22)$$

Onde  $S$  representa a série simulada pelo modelo,  $O$  a série observada e  $n$  o tamanho da série. A PBIAS pode ser calculada através da seguinte expressão matemática:

$$PBIAS(\%) = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n (Sim_i - Obs_i)}{\sum_{i=1}^n Obs_i} \quad (23)$$

Onde  $Sim$  representa a série simulada pelo modelo,  $Obs$  a série observada e  $n$  o tamanho da série.

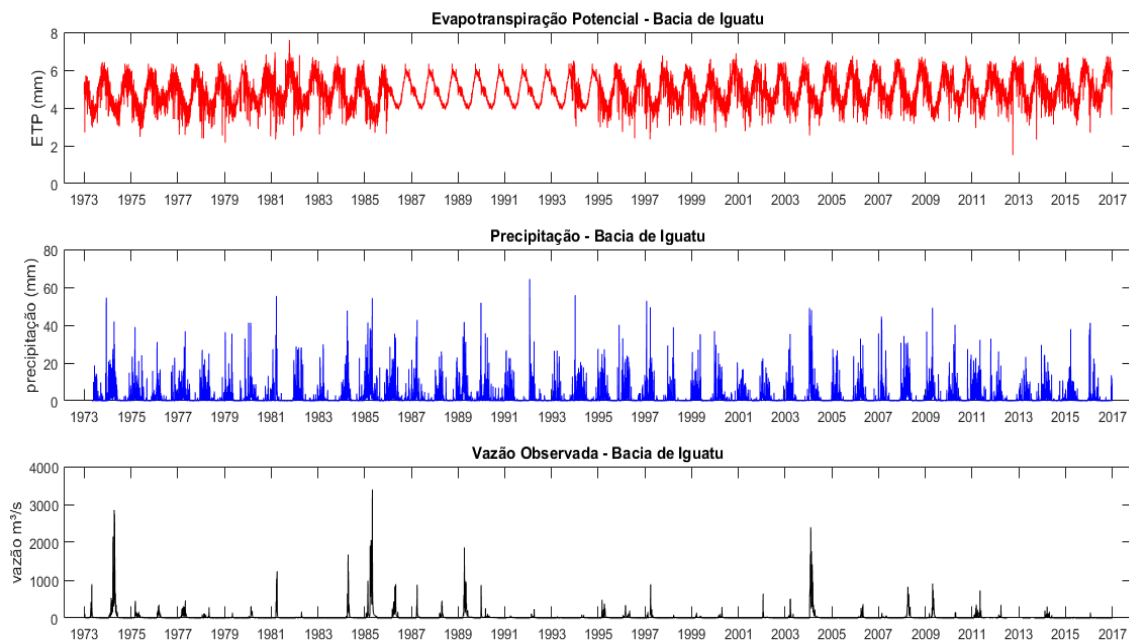
As calibrações do modelo SMAP foram realizadas para cada sensor separadamente. Em seguida, foram realizadas calibrações para as combinações do SSEBop com os três produtos de precipitação.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 AVALIAÇÃO DAS SÉRIES TEMPORAIS DE ENTRADA DO MODELO

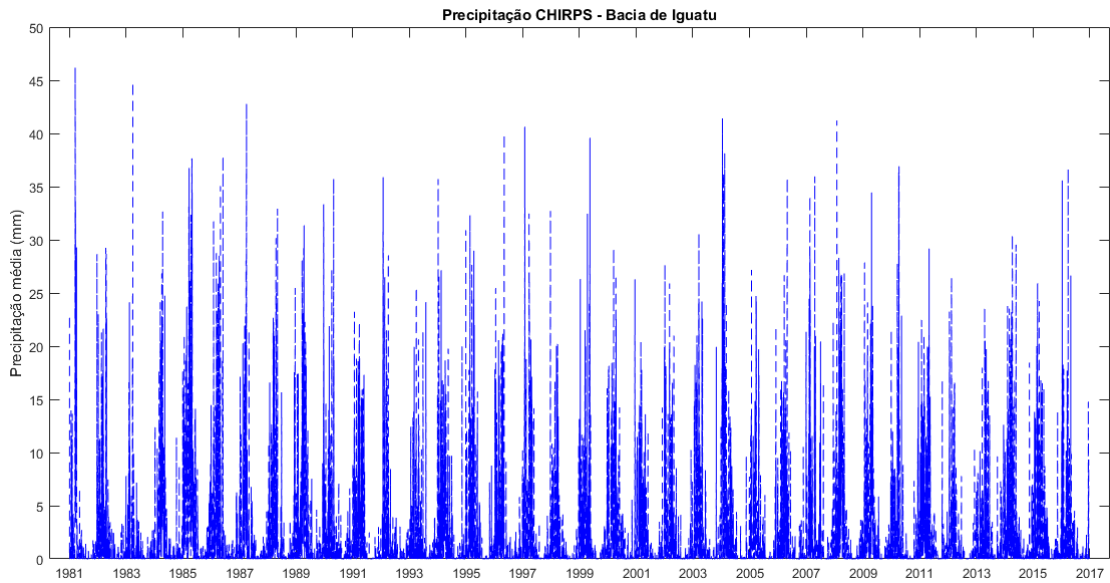
Os dados de ETP, precipitação média e vazão observada para a bacia do Posto Fluviométrico de Iguatu estão dispostos no gráfico da Figura 4. Nota-se que de 1986 a 1993 há uma oscilação menos ruidosa na série de ETP isso se deve ao fato de que as falhas desse período foram preenchidas com a normal climatológica. Além disso, os dados de precipitação média diária possuem valor máximo de 64,36 mm. Na Figura 4 nota-se que em grande parte do tempo a vazão do rio é nula, isso está relacionado a sazonalidade da precipitação na região e as características fisiográficas da bacia.

**Figura 4.** Dados de ETP, precipitação média e vazão observada para a bacia em estudo.



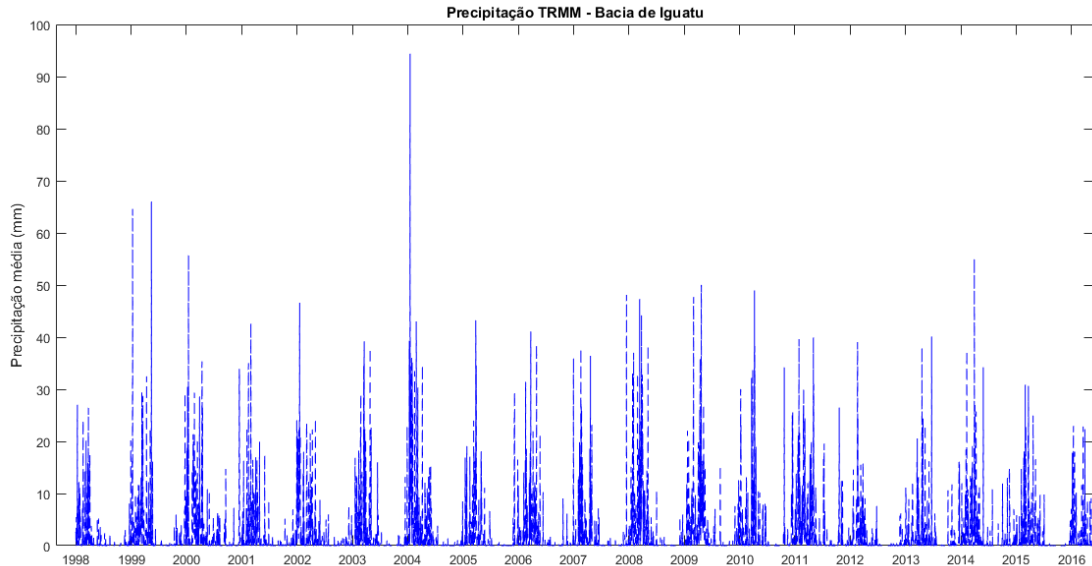
Os dados da série de precipitação média para a bacia em estudo obtidos a partir do satélite CHIRPS estão dispostos no gráfico da Figura 5. Para esta série o valor máximo de precipitação foi de 46,21 mm.

**Figura 5.** Precipitação média diária do CHIRPS para a Bacia de Iguatu.



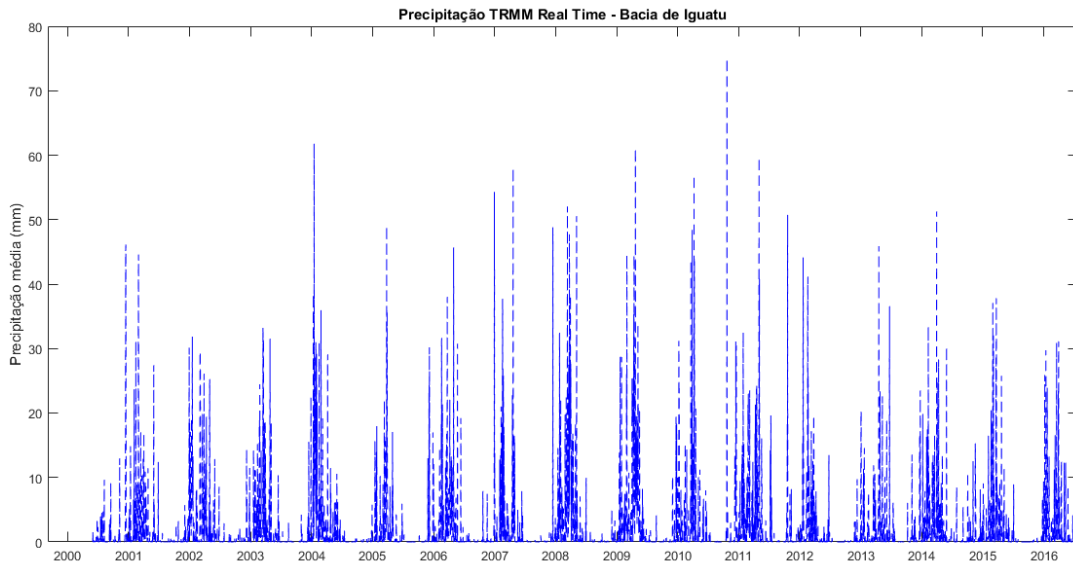
Os dados da série de precipitação média diária para a bacia em estudo obtidos a partir do satélite TRMM, algoritmo 3B42, estão dispostos no gráfico da Figura 6. Para esta série o valor máximo de precipitação diária foi de 94,38 mm.

**Figura 6.** Precipitação média diária do TRMM para a Bacia de Iguatu.



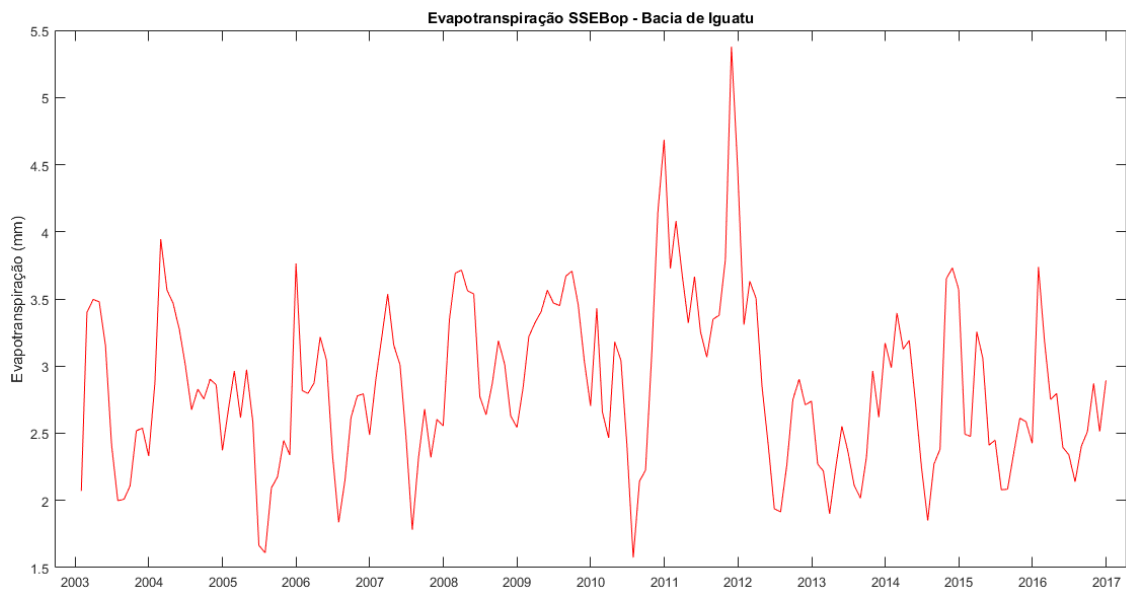
Os dados da série de precipitação média diária para a bacia em estudo obtidos a partir do satélite TRMM, produto *Real Time*, estão dispostos no gráfico da Figura 7. Para esta série o valor máximo de precipitação diária foi de 75,05 mm.

**Figura 7.** Precipitação média diária do TRMM – *Real time* para a Bacia de Iguatu.



Os dados da série de evapotranspiração média diária para a bacia em estudo obtidos a partir do SSEBop, estão dispostos no gráfico da Figura 8. Para esta série o valor máximo de evapotranspiração diária foi de 5,37 mm, médio 2,82 e mínimo 1,57 mm.

**Figura 8.** Evapotranspiração média diária do SSEBop para a Bacia de Iguatu.



Os resultados dos testes de eficiência dos produtos de sensoriamento comparados aos dados de observação estão dispostos na Tabela 3. Os três produtos de precipitação tiveram desempenho semelhantes considerando o R e o NSE. O CHIRPS obteve melhor desempenho global, uma vez que alcançou o maior NSE, o

menor percentual de viés e um coeficiente de determinação satisfatório. A semelhança no desempenho do TRMM e do TRMM - Real Time deve-se ao fato dos dados derivarem do mesmo sensor, com diferença que os dados do TRMM são corrigidos por estações *in-situ* e possuem pós-processamento. O desempenho do SSEBop comparado à ETP estimada pelo método de Hargreaves e Samani (1985) foi insatisfatório para todas as métricas avaliadas. O resultado do PBIAS para o SSEBop indica que o produto tende a subestimar em boa parte da série os valores de ETP.

**Tabela 3.** Resultados das métricas de comparação dos sensores com os dados observados.

Combinação	R	PBIAS	NSE
CHIRPS vs Obs.	0,78	3,13	0,56
SSEBOP vs Obs.	-0,08	-43,05	-8,44
TRMM vs Obs.	0,83	18,41	0,50
TRMM-RT vs Obs.	0,82	22,48	0,41

Obs=Observado

Na Tabela 4 tem-se o resultado da comparação entre os dados de precipitação do CHIRPS, TRMM e TRMM-RT. Nota-se que os produtos possuem alta correlação entre si, baixo PBIAS e NSE satisfatório.

**Tabela 4.** Resultados das métricas de comparação dos sensores de precipitação.

Combinação	R	PBIAS	NSE
TRMM vs CHIRPS	0,85	8,90	0,57
TRMM RT vs CHIRPS	0,84	12,10	0,48
TRMM vs TRMM-RT	0,96	3,66	0,90

## 5.2 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO SMAP

A Tabela 5 apresenta os resultados de calibração do SMAP utilizando os dados de precipitação do CHIRPS. A calibração que obteve o maior desempenho de NSE combinado de calibração e validação foi a de 1981 a 1988 e suas métricas de eficiência são satisfatórias com exceção do RMSE que pode está alto devido a *outliers*.

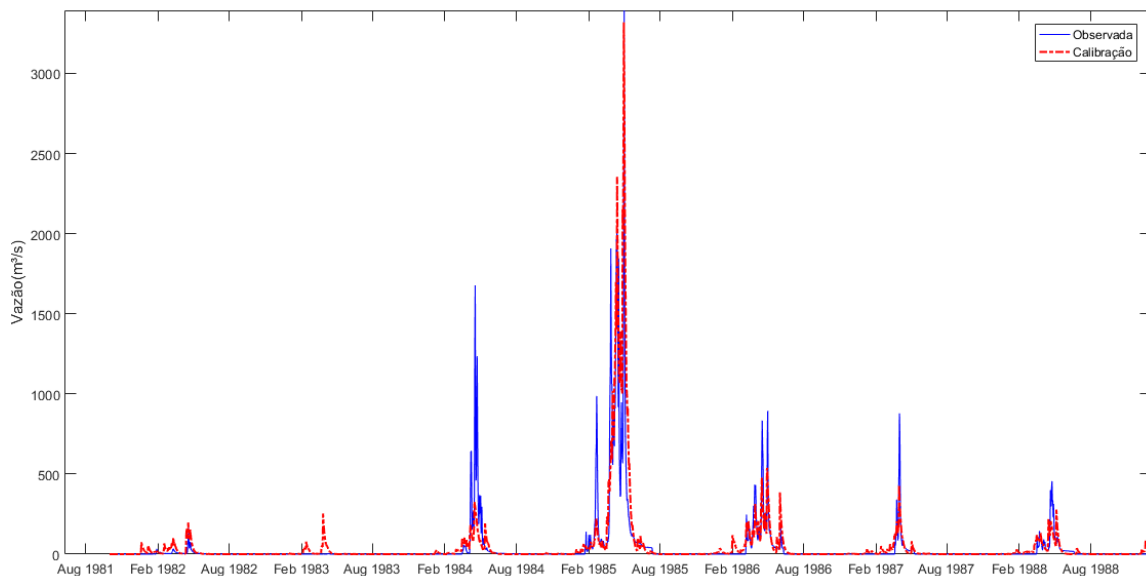
**Tabela 5.** Resultados das calibrações do modelo SMAP usando os dados de precipitação do CHIRPS.

-	Período	nº dias	NSE	RMSE	PBIAS %	Str (mm)	K2t (dias)	Ai (mm)	Capc (%)
Calibração	01/10/1981 a 31/12/1988	2648	0,64	111,13	12,30	399,16	3,64	1,00	48,29
Validação	01/01/1989 a 31/12/1996	2921	0,42	68,09	-14,10				
Calibração	01/10/1988 a 31/12/1996	3013	0,49	63,18	9,60	353,25	3,99	1,00	44,88
Validação	01/01/1998 a 31/12/2006	3286	0,56	88,52	-4,40				

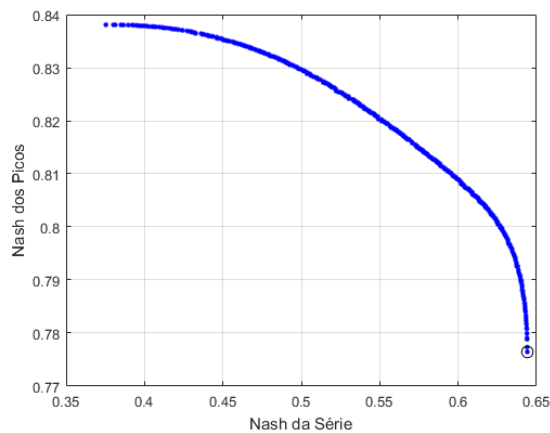
-	Período	nº dias	NSE	RMSE	PBIAS %	Str (mm)	K2t (dias)	Ai (mm)	Capc (%)
Calibração	01/10/1997 a 31/12/2004	2648	0,86	55,88	23,60	218,28	4,16	4,63	36,79
Validação	01/01/2005 a 31/12/2010	2190	-1,64	127,50	152,30				

Na Figura 9 tem-se o hidrograma para os parâmetros de calibração ótimo do modelo, percebe-se que esses parâmetros conseguem capturar os padrões médios da bacia. Nota-se ainda que no início da calibração o modelo superestima os picos de cheia (1982 e 1983) e de 1984 a 87 o modelo subestima os picos de cheia. Na Figura 10 tem-se a frente de Pareto da calibração para o intervalo de 1981 a 1988, onde o parâmetro ótimo escolhido está destacado. A validação dos parâmetros de calibração encontra-se disposta na Figura 11. No início da validação o modelo não consegue capturar os picos de cheia, em seguida, subestima os picos e no final atrasa a resposta da vazão em relação a precipitação.

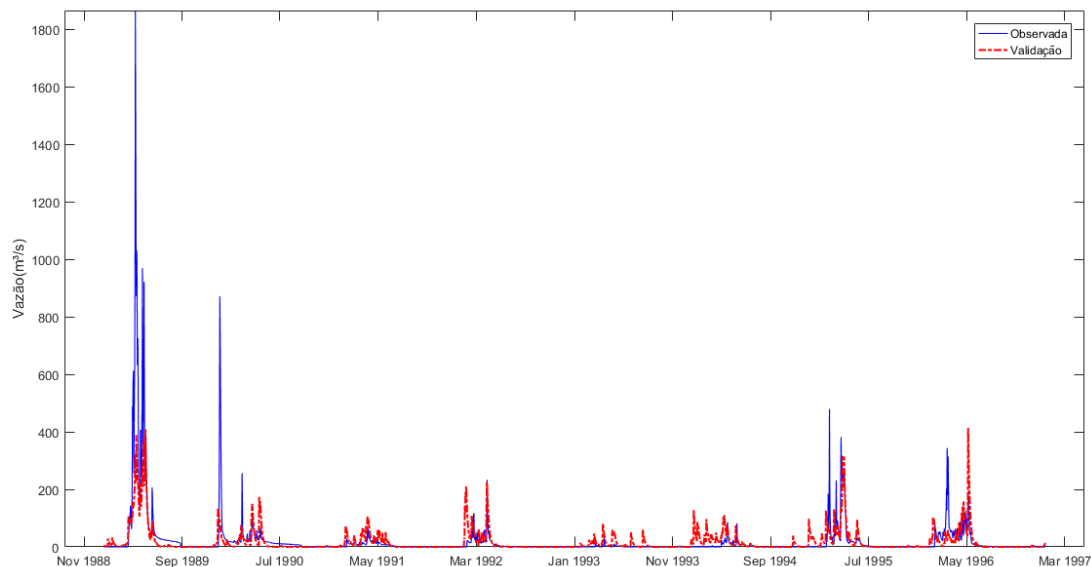
**Figura 9.** Hidrograma da melhor calibração do SMAP usando os dados de Precipitação do CHIRPS.



**Figura 10.** Frente de Pareto e funções objetivo para a melhor calibração do SMAP usando dados do CHIRPS.



**Figura 11.** Resultado da validação do SMAP para os melhores parâmetros de calibração usando dados do CHIRPS.



De acordo com Moriasi et al. (2007), em geral, a simulação do modelo pode ser julgada como satisfatório se  $NSE > 0,50$  e se  $PBIAS \pm 25\%$  para simulações de vazão.

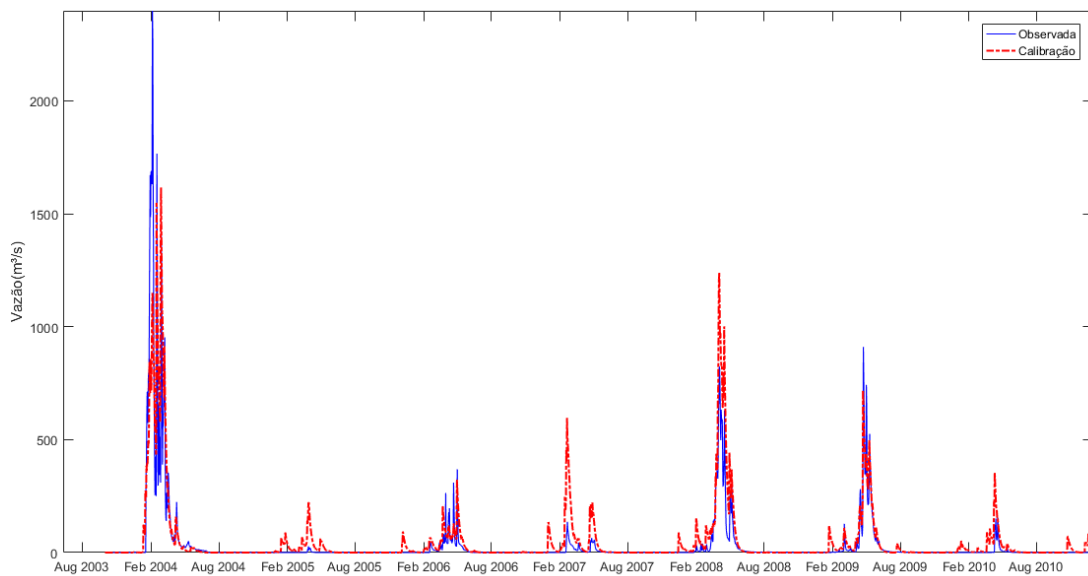
O resultado da calibração do SMAP utilizando os dados de ET do SSEBop estão expostos na Tabela 6. O NSE da calibração foi considerado satisfatório e a percentagem de viés indica uma tendência dos parâmetros em superestimar as vazões. Analisando o hidrograma da Figura 12, percebe-se uma tendência em subestimar os picos de vazão no primeiro ano da calibração, seguido de superestimação de picos em todos os outros anos. Na Figura 13 tem-se a frente de Pareto da calibração e os parâmetros ótimos em destaque. A validação dos parâmetros (Figura 14) foi insatisfatória nas três métricas calculadas e percebe-se

pelos hidrogramas que o modelo errou tanto nos picos e quanto no comportamento médio da série.

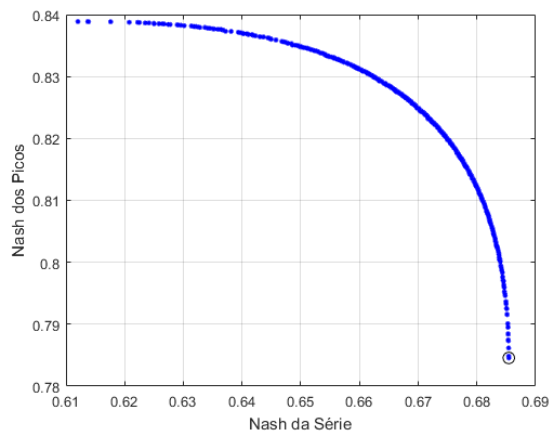
**Tabela 6.** Resultado da calibração do modelo SMAP usando os dados de evapotranspiração do SSEBOP.

-	Período	nº dias	NSE	RMSE	PBIAS %	Str (mm)	K2t (dias)	Ai (mm)	Capc (%)
Calibração	01/10/2003 a 31/12/2010	2648	0,69	89,55	41,10	375,38	4,70	1,00	47,29
Validação	01/01/2014 a 31/12/2016	1095	-1,20	32,23	132,70				

**Figura 12.** Hidrograma da calibração do SMAP usando os dados de Evapotranspiração do SSEBop.

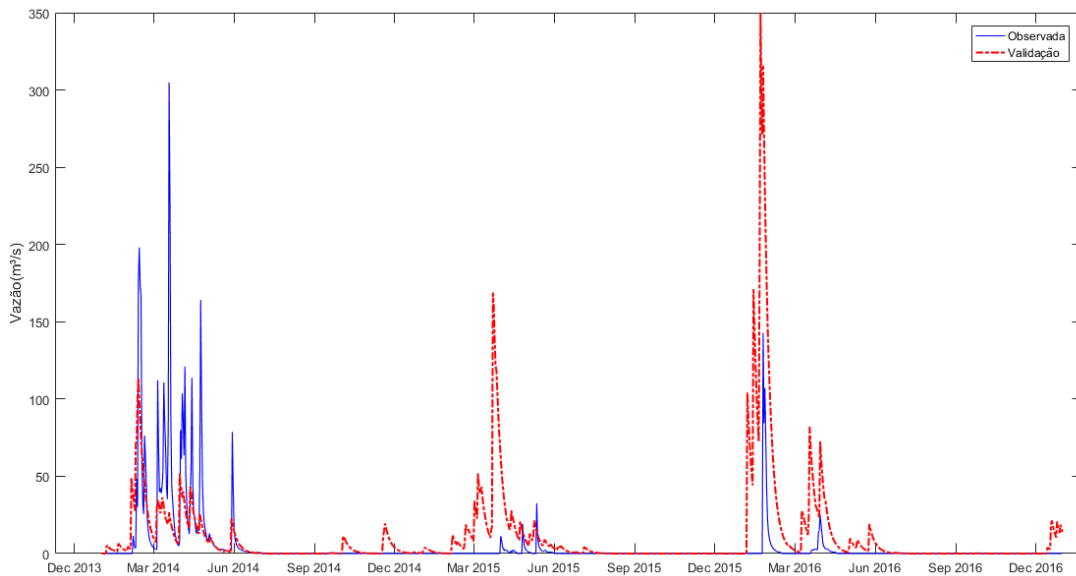


**Figura 13.** Frente de Pareto e funções objetivo para a calibração do SMAP usando dados do SSEBop.





**Figura 14.** Resultado da validação do SMAP para os parâmetros de calibração obtidos usando os dados do SSEBop.



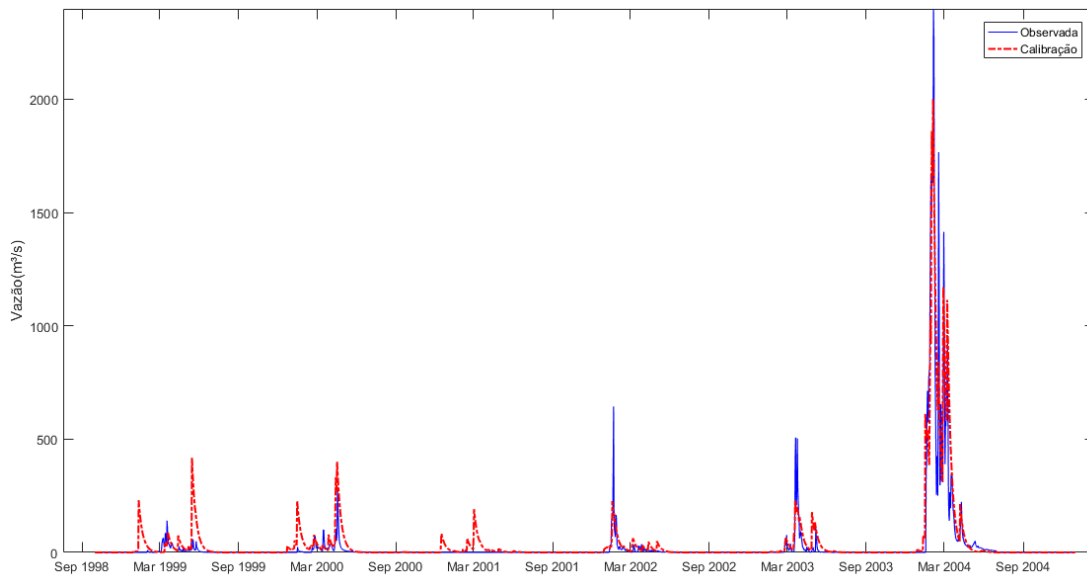
Na Tabela 7 estão dispostos os resultados da calibração do modelo SMAP usando os dados de precipitação do TRMM B342. O melhor desempenho das métricas foi obtido para a calibração no período de 1998 a 2004, entretanto, tentou-se validar esses parâmetros em dois diferentes períodos da série e a validação foi insatisfatória ( $NSE < 0,50$ ).

**Tabela 7.** Resultados das calibrações do modelo SMAP usando os dados de precipitação do TRMM.

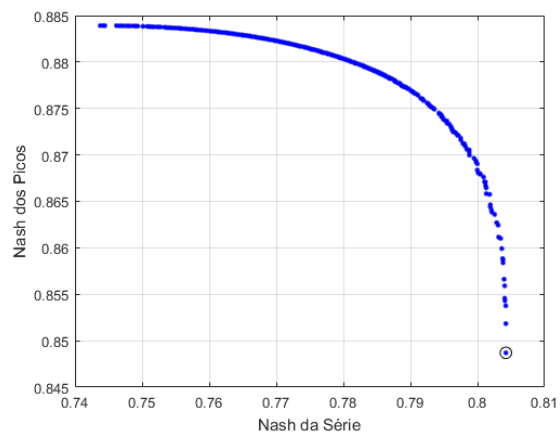
-	Período	nº dias	NSE	RMSE	PBIAS %	Str (mm)	K2t (dias)	Ai (mm)	Capc (%)
Calibração	01/10/1998 a 31/12/2004	2283	0,80	69,91	35,40	309,02	6,42	9,99	41,21
Validação 1	01/01/2005 a 31/12/2010	2190	-0,54	97,30	93,30				
Validação 2	01/01/2014 a 31/05/2016	881	-0,07	24,91	21,90				
Calibração	01/10/2002 a 31/12/2010	3013	0,73	78,49	29,80	355,52	5,70	5,18	46,92
Validação	01/01/2014 a 31/05/2016	881	-0,29	27,27	76,30				

Na Figura 15 tem-se o hidrograma de calibração para os parâmetros ótimos do SMAP do TRMM 3B42. Percebe-se uma subestimação das vazões nos três primeiros anos de calibração, seguida de subestimação nos últimos anos da série. Na Figura 16 tem-se a frente de Pareto da calibração do período de 1998 a 2004, onde os parâmetros ótimos estão destacados. A validação 1 dos parâmetros (Figura 17) foi considerada insatisfatória, subestimando as vazões no início da calibração e superestimando no resto da série.

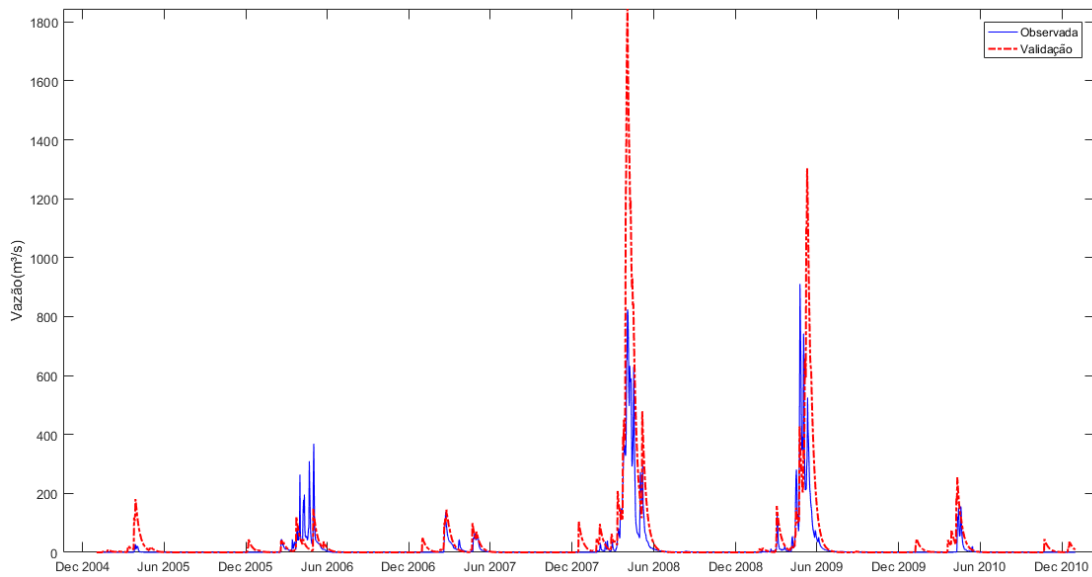
**Figura 15.** Hidrograma da melhor calibração do SMAP usando os dados de Precipitação do TRMM.



**Figura 16.** Frente de Pareto e funções objetivo para a melhor calibração do SMAP usando dados do TRMM.



**Figura 17.** Resultado da validação do SMAP para os melhores parâmetros de calibração usando dados do TRMM.



Na Tabela 8 tem-se os resultados da calibração do modelo SMAP usando dados de precipitação do TRMM – *Real time*. A calibração do período de 2000 a 2006 obteve o melhor desempenho nas métricas (NSE, PBIAS e TMSE), entretanto, os resultados alcançados na validação foram insatisfatórios quando comparados aos valores sugeridos por Moriasi et al. (2007).

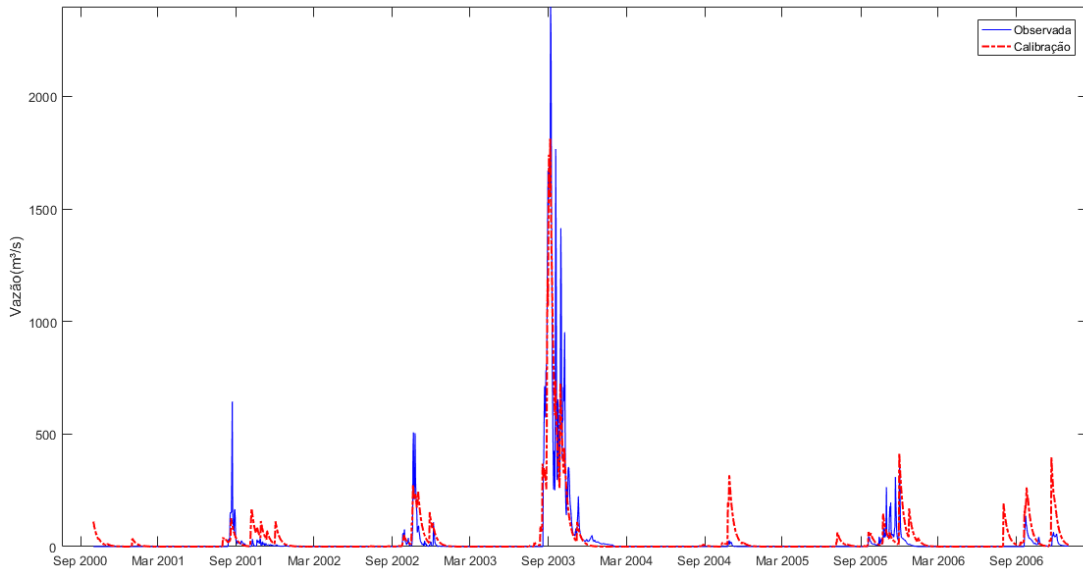
**Tabela 8.** Resultados das calibrações do modelo SMAP usando os dados de precipitação do TRMM Real Time.

-	Período	nº dias	NSE	RMSE	PBIAS %	Str (mm)	K2t (dias)	Ai (mm)	Capc (%)
Calibração	01/10/2000 a 31/12/2006	2282	0,79	72,55	19,30	221,89	6,64	9,99	49,42
Validação	01/01/2007 a 31/12/2010	1460	-12,17	359,58	358,00				
Calibração	01/10/2002 a 31/12/2010	3013	0,32	124,86	-4,30	548,17	6,61	1,00	63,61
Validação	01/01/2014 a 13/07/2016	924	-0,46	28,46	136,30				

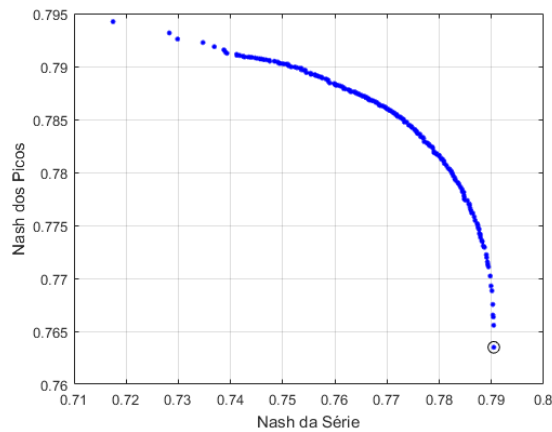
No hidrograma de calibração da Figura 18 tem-se os resultados da calibração do modelo SMAP usando dados de precipitação do TRMM – *Real time*. Avaliando visualmente o gráfico nota-se que o modelo consegue capturar de forma satisfatória o comportamento médio da bacia, por exemplo, não simulando vazão quando não há chuva e simulando quando há. Porém este subestima a maior cheia observada no período (setembro de 2003). A frente de Pareto da calibração para o período de 2000 a 2006 está disposta na Figura 19. Os resultados da validação Figura 20 foram completamente insatisfatórios, pois avaliando o hidrograma visualmente,

percebe-se que o modelo superestimou todas as vazões da série. Isso se deve aos elevados valores dos parâmetros  $A_i$  e  $Capc$ , pois segundo Lopes (1998) valores de  $A_i$  acima de 5 sugerem que a região possui floresta densa e  $Capc$  igual a 50% indica solo argiloso, o que não é o caso da bacia do posto fluviométrico de Iguatu.

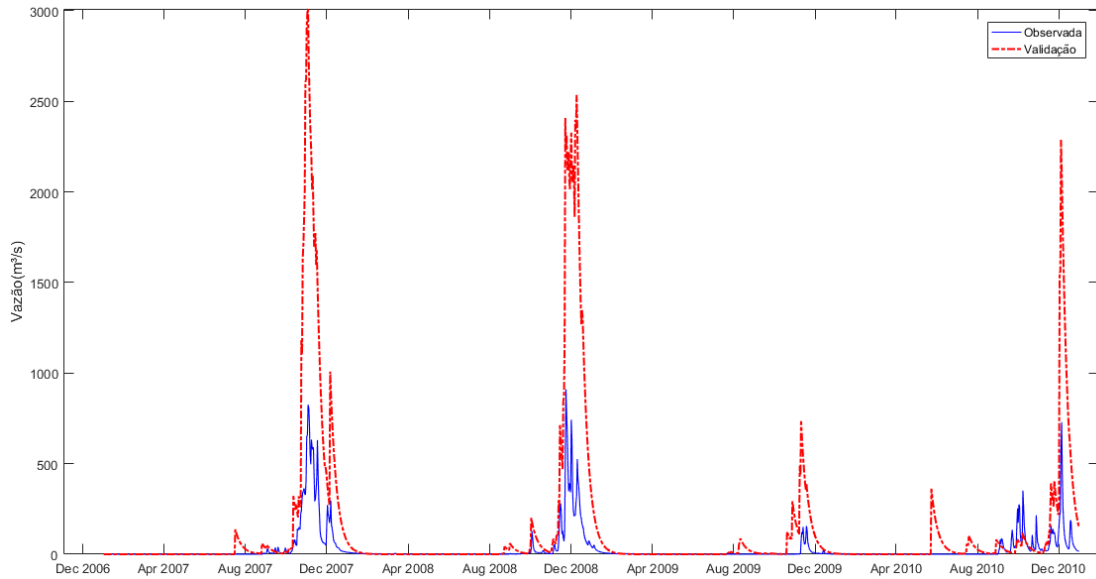
**Figura 18.** Hidrograma da melhor calibração do SMAP usando os dados de Precipitação do TRMM Real time.



**Figura 19.** Frente de Pareto e funções objetivo para a melhor calibração do SMAP usando dados do TRMM Real time.



**Figura 20.** Resultado da validação do SMAP para os melhores parâmetros de calibração usando dados do TRMM Real Time.



Os resultados das calibrações usando os dados de entrada de ET do SSEBop combinados aos dados de precipitação do CHIRPS e do TRMM estão dispostos na Tabela 9. Foram realizadas somente uma calibração para cada combinação de sensores devido a disponibilidade de dados das séries temporais. Os resultados das calibrações foram promissores para as combinações CHIRPS + SSEBop e TRMM + SSEBop NSE de calibração 0,39 e 0,44, respectivamente.

O resultado obtido para a combinação TRMM-RT + SSEBop foram insatisfatórios e puramente matemáticos, uma vez que os parâmetros obtidos não representam as características fisiográficas da bacia hidrográfica em estudo. Por exemplo, a capacidade de saturação do solo (Str) escolhida pelo algoritmo MOPSO foi de 1118,82 mm, este valor elevado está relacionado a solos profundos e de florestas o que não é o caso da área de estudo (LOPES, 1999).

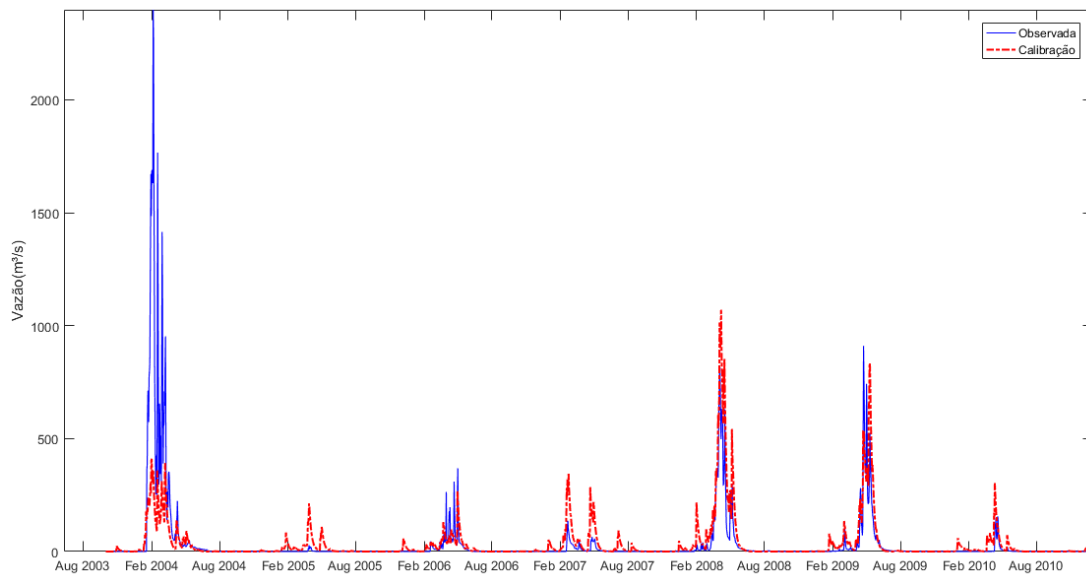
**Tabela 9.** Resultados das calibrações do modelo SMAP utilizando somente dados de sensoriamento remoto.

Combinação	-	Período	nº dias	NSE	RMSE	PBIAS %	Str (mm)	K2t (dias)	Ai (mm)	Capc (%)
CHIRPS + SSEBop	Calibração	01/10/2003 a 31/12/2010	2648	0,39	124,62	0,70	493,95	4,30	1,01	56,09
	Validação	01/01/2014 a 30/04/2018	1580	-2,62	37,30	289,80				
TRMM + SSEBop	Calibração	01/10/2003 a 31/12/2010	2648	0,44	119,78	28,30	570,88	6,77	1,01	67,45
	Validação	01/01/2014 a 31/05/2016	881	-0,17	26,05	111,50				

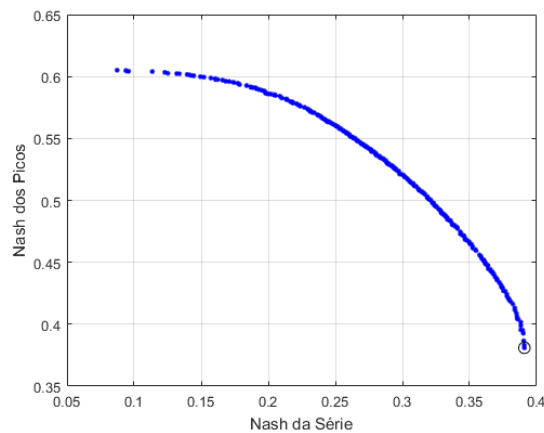
Combinação	-	Período	nº dias	NSE	RMSE	PBIAS %	Str (mm)	K2t (dias)	Ai (mm)	Capc (%)
TRMM-RT + SSEBop	Calibração	01/10/2003 a 31/12/2010	2648	0,17	145,71	-30,40	1118,82	6,91	1,00	47,62
	Validação	01/01/2014 a 13/07/2016	924	0,01	23,36	30,00				

A calibração CHIRPS + SSEBop (Figura 21) não conseguiu representar o evento extremo ocorrido em fevereiro de 2004, subestimando este em 85% da sua magnitude. Contudo, analisando o hidrograma nota-se que a calibração conseguiu representar o comportamento médio, por exemplo onde a vazão é nula nos dados observados o modelo também consegue representar esse comportamento, para o restante da série temporal de vazão. A Figura 22 representa a frente de Pareto da calibração multiobjetivo para a combinação CHIRPS+SSEBop. Ao analisar o gráfico da validação dos parâmetros calibrados (Figura 23) nota-se que o modelo superestima os valores de vazão, por exemplo em abril de 2015 a vazão observada foi de aproximadamente 10 m<sup>3</sup>/s enquanto o valor simulado pelo modelo foi de aproximadamente 200 m<sup>3</sup>/s. Assim, a validação foi insatisfatória (NSE -2,62) uma vez que o modelo superestimou os dados de vazão em quase toda a série.

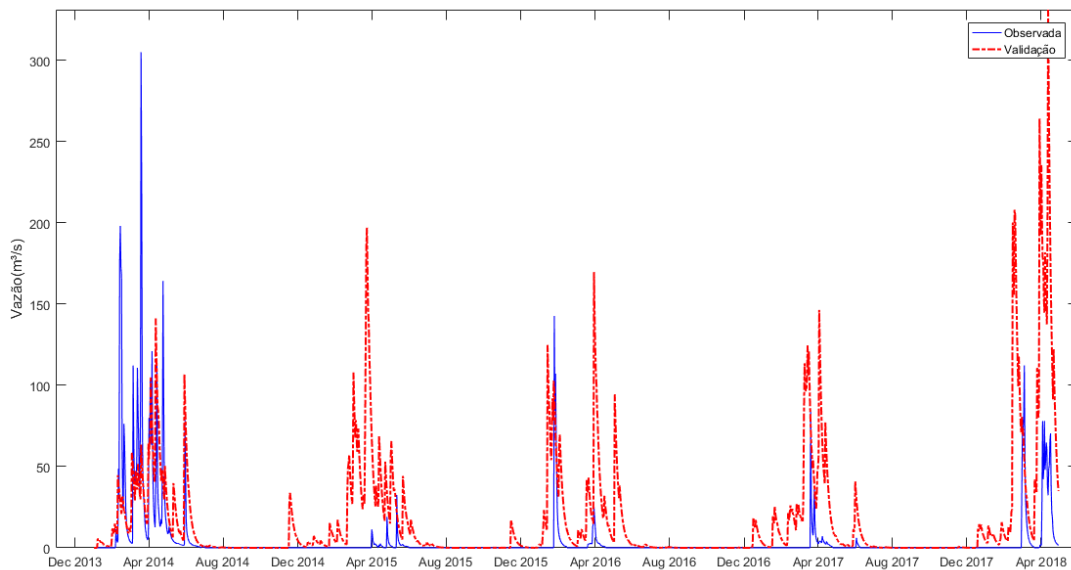
**Figura 21.** Hidrograma da calibração do SMAP usando os dados de Precipitação do CHIRPS e de ETP do SSEBop.



**Figura 22.** Frente de Pareto e funções objetivo para a calibração do SMAP usando dados do CHIRPS+SSEBop.

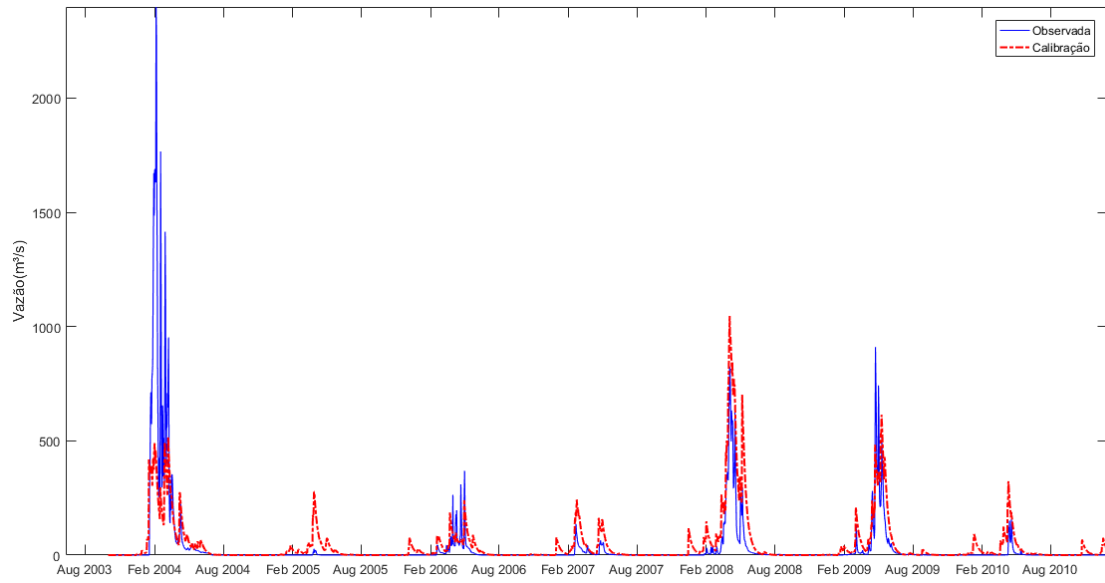


**Figura 23.** Resultado da validação do SMAP para os melhores parâmetros de calibração usando dados do CHIRPS + SSEBop.

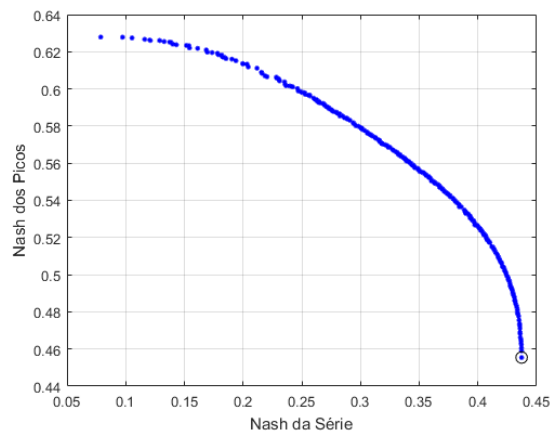


A calibração TRMM + SSEBop (Figura 24) também não conseguiu representar o evento extremo de fevereiro de 2014 (valor observado 2399 m<sup>3</sup>/s e simulado de aproximadamente 500 m<sup>3</sup>/s). A Figura 25 representa a frente de Pareto dos parâmetros de calibração com o ótimo global destacado. Analisando o gráfico visualmente, percebe-se que a validação dos parâmetros (Figura 26) obteve resultados precários, pois o modelo superestimou a vazão de setembro de 2014 a julho de 2015. Este fato é facilmente notado, pois a linha vermelha que representa os valores simulados pelo modelo fica maior parte do tempo acima da linha azul que representa os dados observados.

**Figura 24.** Hidrograma da calibração do SMAP usando os dados de Precipitação do TRMM e de ETP do SSEBop.

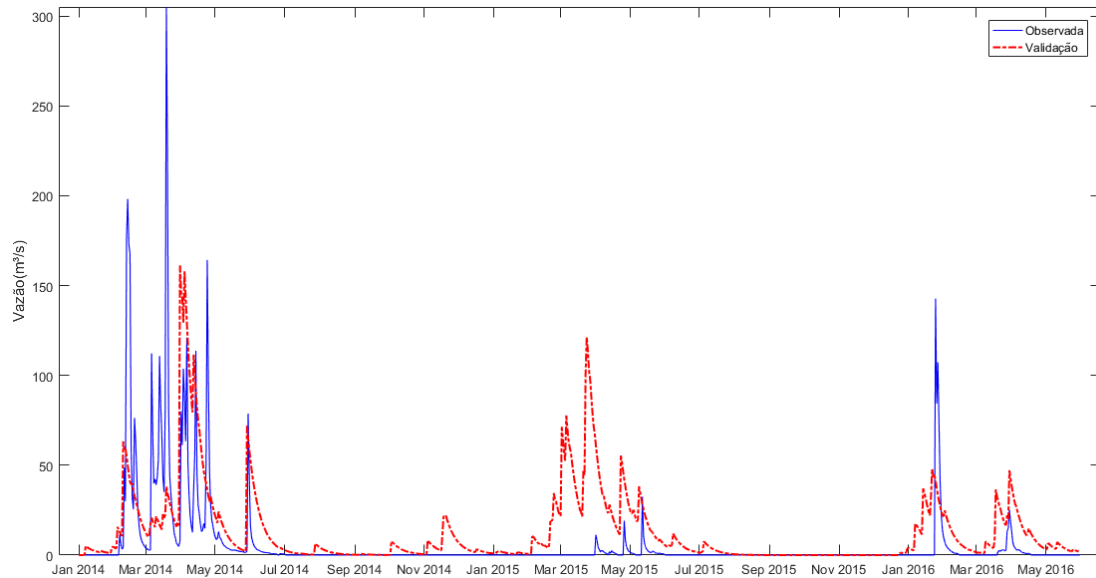


**Figura 25.** Frente de Pareto e funções objetivo para a calibração do SMAP usando dados do TRMM+SSEBop.





**Figura 26.** Resultado da validação do SMAP para os melhores parâmetros de calibração usando dados do TRMM + SSEBop.



Por fim, os resultados obtidos indicaram que os dados do TRMM representam de forma eficaz a precipitação convergindo com os resultados alcançados por Collischonn et al. (2007). Da mesma forma, as simulações realizadas com o CHIRPS foram satisfatórias e condizem com o descrito em Nogueira et al. (2018). Todavia, os dados do SSEBop não conseguiram representar a evapotranspiração potencial a contento.

Não obstante, as calibrações e validações do modelo SMAP diário usando o algoritmo MOPSO para a bacia do posto fluviométrico de Iguatu realizadas nesse trabalho foram satisfatórias em maioria, com exceção da calibração do conjunto TRMM-RT + SSEBop.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho conseguiu identificar que os dados do CHIRPS e do TRMM 3B42 conseguem representar satisfatoriamente a precipitação média diária na bacia do posto fluviométrico de Iguatu (R 0,78, NSE 0,56 e R 0,83, NSE 0,50, respectivamente), apresentando-se como uma ótima alternativa para bacias não monitoradas. Além disso, o TRMM-RT apresentou-se como uma alternativa rápida e eficiente na representação da precipitação, uma vez que a disponibilização dos dados é feita em tempo real.

Por outro lado, o dado de evapotranspiração do SSEBop se mostrou ineficiente quando comparado a ETP estimada pelo método de Hargreaves e Samani. A calibração do SMAP utilizando somente o dado do SSEBop separado foi precária. Entretanto, recomenda-se estudar como os dados do SSEBop se comportam quando comparados a medições de evapotranspiração de campo.

O resultado da calibração ótima do SMAP utilizando os dados do CHIRPS como precipitação média diária mostrou-se satisfatória: NSE calibração 0,64 e NSE validação 0,42. A calibração utilizando os dados do TRMM também foi satisfatória (NSE 0,80), entretanto, a validação foi precária com NSE de -0,54. O mesmo ocorreu com o TRMM-RT que obteve NSE de calibração 0,79 e validação insatisfatória de -12,17.

O principal objetivo desse trabalho foi avaliar a possibilidade de utilização de dados de entrada exclusivamente derivados de sensoriamento remoto para calibrar o modelo SMAP diário. Contudo, a grande quantidade de falhas nas séries de dados observados foi impeditiva no aprofundamento desse estudo, pois só se pode realizar uma calibração para cada combinação de sensor e a quantidade de dados para a validação foi muito restrita (inferior a 4 anos).

Os resultados das calibrações para as combinações CHIRPS+SSEBop e TRMM + SSEBop foram satisfatórios, NSE 0,39 e 0,44, respectivamente. Todavia, não foi possível validar, pois o NSE das validações foram precário -2,62 e -0,17, respectivamente.

Por fim, recomenda-se realizar testes para bacias de diferentes tamanhos para testar a influência da escala nesse tipo de estudo. Por outro lado, indica-se a utilização de outros tipos de dados para estimar a ETP, como o SEBAL.

## REFERÊNCIAS

- ALLASIA, D. G. et al. Modelo hidrológico da bacia do Alto Paraguai. **Anais do III Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste, CD ROM, Goiânia, Brasil**, v. 20, 2004.
- ALVAREZ-BENITEZ, J. E. et al. A MOPSO algorithm based exclusively on pareto dominance concepts. In: **International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization**. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 459-473, 2005.
- BARROS, F. V. F. **Uso de algoritmos evolucionários na calibração de modelos hidrológicos e na operação de sistemas de reservatórios**. 2007. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.
- BARROS, F. V. F. et al. Regionalização de Parâmetros do modelo chuva-vazão SMAP das bacias hidrográficas do Ceará. In: SOUZA FILHO, F. A; CAMPOS, J. N. B.; AQUINO, S. H. S. (Org.). **Gerenciamento de Recursos Hídricos no Semiárido**. Fortaleza: Expressão Gráfica, 2013. cap.9, p.186-207.
- CAZENAVE, A.; SAVENIJE, H. Preface to the Special Issue on “hydrology from Space”. **Surveys in Geophysics**, v. 29, n. 4-5, p. 241-245, 2008.
- CHAVES, H. M. L. et al. Regionalização de vazões mínimas em bacias através de interpolação em sistemas de informação geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 3, p. 43-51, 2002.
- COLLISCHONN, B. et al. Desempenho do satélite TRMM na estimativa de precipitação sobre a bacia do Paraguai superior. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 59, n. 1, 2007.
- COLLISCHONN, B. **Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído**. 2006. 193 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- CRUZ, M. A. S. et al. Applicability of TRMM Precipitation for Hydrologic Modeling in a Basin in the Northeast Brazilian Agreste. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, p. 57-64, 2018.
- DE OLIVEIRA, L. F. C. et al. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 14, n. 11, 2010.
- DE PAULA, A. C. P. **Estimativa da evapotranspiração real da cultura da soja e do feijoeiro pelo método da razão de Bowen e pelo modelo SSEBop**. 2018. 88 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Agronomia, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

FUNK, C. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific data**, v. 2, p. 150066, 2015.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied engineering in agriculture**, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.

JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). Earth Observation Center. TRMM data users handbook. **National Space Development Agency of Japan**: Hiki-gun, Saitama, Japan, 2001.

KUMMEROW, C. et al. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit. **Journal of Applied meteorology**, v. 39, n. 12, p. 1965-1982, 2000.

LOPES, J. D. **Avaliação e aprimoramento de métodos para estimativa da evapotranspiração real por sensoriamento remoto**. 2018. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

LOPES, J. E. G. **Manual do modelo SMAP**. 1999. Disponível em: <[http://pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id\\_arq=3596](http://pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=3596)>. Acesso em: 27 nov. 2018.

LOPES, J. E. G. SMAP - A Simplified Hydrologic Model. In: SINGH, V. P. **Water Resources Publication**. (Org.). Applied Modeling in Catchment Hydrology. Hittleton. p. 167-176, 1982.

LOPES, J. E. G.; BRAGA JR, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. **SMAP: A Simplified Hydrologic Model**. In: Symposium on Rainfall Runoff Modeling, 1981, Mississippi, 1981.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Precipitation measurement missions: Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)**. 2015. Disponível em: <<https://pmm.nasa.gov/TRMM>>. Acesso em: 20 out. 2018.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **TRMM: instruments**. 2015. Disponível em: <<https://pmm.nasa.gov/TRMM/trmm-instruments>>. Acesso em: 20 out. 2018.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles. **Journal of hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

NOGUEIRA, S. M. C.; MOREIRA, M. A.; VOLPATO, M. M. L. Evaluating Precipitation Estimates from Eta, TRMM and CHRIPS Data in the South-Southeast Region of Minas Gerais State - Brazil. **Remote Sensing**, v. 10, n. 2, p. 313, 2018.

- NUNES, F. M. S. et al. Modelagem hidrológica via SMAP para estimativa de vazões mensais na bacia do rio Piancó. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 9, n. 3, p.289-295, jul-set, 2014.
- PAREDES-TREJO, F. J.; BARBOSA, H. A.; KUMAR, T. V. L. Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. **Journal of arid environments**, v. 139, p. 26-40, 2017.
- PEREIRA, W. J. X. **Calibração de um modelo hidrológico de escala diária para bacias hidrográficas do semiárido cearense**. 2017. 86 f. TCC (Graduação) – Engenharia Ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- PONTES, P. R. M. et al. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 888-904, 2015.
- REIS JUNIOR, D. S.; MARTINS, E. S. P. R.; NASCIMENTO, L. S. V. Avaliação do Algoritmo Evolutivo MOPSO na Calibração Multiobjetivo do Modelo SMAP no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p.85-97, 2009.
- SANTOS, L. L. MODELOS HIDROLÓGICOS: Conceitos e Aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, n. 3, p. 1-19, 2009.
- SAVOCA, M. E. et al. **Actual Evapotranspiration Modeling Using the Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) Approach**. US Department of the Interior, US Geological Survey, 2013.
- SENAY, G. B. et al. A coupled remote sensing and simplified surface energy balance approach to estimate actual evapotranspiration from irrigated fields. **Sensors**, v. 7, n. 6, p. 979-1000, 2007.
- SENAY, G. B. et al. Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather datasets: A new parameterization for the SSEB approach. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 49, n. 3, p. 577-591, 2013.
- SERRÃO, E. A. O. et al. Avaliação estatística entre as estimativas de precipitação da constelação GPM com TRMM: Uma análise a bacia hidrográfica do Rio Solimões. **Revista brasileira de climatologia**, v. 18, 2016.
- SOROOSHIAN, S. et al. (Ed.). **Hydrological modelling and the water cycle: coupling the atmospheric and hydrological models**. Springer Science & Business Media, 2008.
- THIESSEN, A. H. Precipitation averages for large areas. **Monthly weather review**, v. 39, n. 7, p. 1082-1089, 1911.

TUCCI, C. E. M. **Regionalização de vazões**. Editora da Universidade, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

VILLAZON, M.; INTURIAS, D. Modelación hidrológica distribuida con datos satelitales a gran escala, escenarios de precipitación con datos de Tierra y TRMM. Caso de estudio: Cuenca del Rio Mamoré, In: Conferência nacional de especialistas em sistemas de informação geográfica y teledetección aplicado a cuencas y recursos hídricos, 1., **Anais do evento**. La Paz, 2015.

WHEATER, H.; SOROOSHIAN, S.; SHARMA, K. D. (Ed.). **Hydrological modelling in arid and semi-arid areas**. Cambridge University Press, 2007.

XU, C. Y. Textbook of Hydrologic Models. **Uppsala University**, Sweden, 2002.

ZULKAFI, Z. et al. A comparative performance analysis of TRMM 3B42 (TMPA) versions 6 and 7 for hydrological applications over Andean–Amazon river basins. **Journal of Hydrometeorology**, v. 15, n. 2, p. 581-592, 2014.