



UFPB

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**MODELAGEM HIDROLÓGICA UTILIZANDO OS DADOS DE
PRECIPITAÇÃO PERSIANN-CDR E O MODELO SWAT PARA A
BACIA DO RIO PIANCÓ - PB**

TATIANE GOMES FRADE

JOÃO PESSOA – PB

MAIO/2019

TATIANE GOMES FRADE

**MODELAGEM HIDROLÓGICA UTILIZANDO OS DADOS DE
PRECIPITAÇÃO PERSIANN-CDR E O MODELO SWAT PARA A
BACIA DO RIO PIANCÓ - PB**

Monografia apresentada ao departamento de Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, Campus I, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos

JOÃO PESSOA – PB

MAIO/2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

F799m Frade, Tatiane Gomes.

MODELAGEM HIDROLÓGICA UTILIZANDO OS DADOS DE
PRECIPITAÇÃO PERSIANN-CDR E O MODELO SWAT PARA A BACIA
DO RIO PIANCÓ - PB / Tatiane Gomes Frade. - João
Pessoa, 2019.

103 f. : il.

Orientação: Celso Augusto Guimarães Santos.
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. SWAT, PERSIANN-CDR, semiárido. I. Santos, Celso
Augusto Guimarães. II. Título.

UFPB/BC

FOLHA DE APROVAÇÃO

TATIANE GOMES FRADE

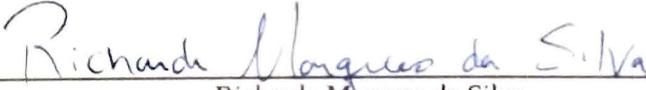
MODELAGEM HIDROLÓGICA UTILIZANDO OS DADOS DE PRECIPITAÇÃO PERSIANN-CDR E O MODELO SWAT PARA A BACIA DO RIO PIANCÓ - PB

Trabalho de Conclusão de Curso em 10/05/2019 perante a seguinte Comissão Julgadora:



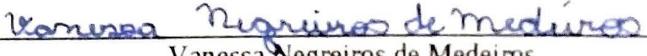
Celso Augusto Guimarães Santos
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

Aprovado



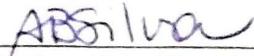
Richarde Marques da Silva
UFPB

APROVADO



Vanessa Negreiros de Medeiros
UNIPÊ

Aprovada



Prof.ª Andrea Brasiliano Silva
Matrícula Siape: 1549557
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo o que Ele fez por mim, por todo amor e toda força que me foram dados em toda a minha vida. Por ter sido meu Refúgio, Amigo, Pai, Salvador e Consolador. Por todas as pessoas que Ele botou em meu caminho, por todas as coisas boas que Ele me proporcionou nesses anos de vida e também pelos aprendizados.

A minha mãe, por sempre ter feito todo o possível por mim, por sempre ter as palavras que eu preciso ouvir, por todo amor e compreensão.

Ao meu pai, por seu amor e por tudo o que fez pela minha educação e por mim.

A vovô Rosalvo, vovó Jovita, tias Nena e Pu, por terem sido como pai e mães para mim, por sempre buscarem o meu bem e fazerem o que estava ao alcance deles por mim.

Também agradeço especialmente ao meu irmão Francisco e aos meus irmãos do coração Cybelle e Maxwell, vocês são essenciais na minha vida.

Às minhas tias Belinha, Pinha, Lica, Roselma, Rose, Roseli e Lana.

A Hyago, pelo companheirismo, amor e carinho de todos os dias.

Aos meus amigos do Leppan: Alexandro, Glauciene, Jorge, Franklin, Cláudia e Jennifer, por terem me ajudado na minha pesquisa e pelos momentos de risada no Leppan.

Aos meus amigos da vida e do curso.

Aos professores Celso e Richarde, pelos ensinamentos, auxílios e oportunidades.

Obrigada a todos, de todo o meu coração!

Dedico este trabalho a Deus e às
pessoas que amo e que me deram
suporte para buscar os meus sonhos.
Gratidão.

Porque dele, por Ele e para Ele
são todas as coisas. Glória, pois,
a Ele eternamente. Amém.
Romanos 11:36.

RESUMO

A precipitação é uma das variáveis mais importantes na modelagem hidrológica e no estudo do ciclo hidrológico. Devido a relativa escassez de dados de pluviômetros em determinados períodos e regiões por diversas razões, o uso de dados de precipitação estimados por satélite vem se mostrando viável. Nesse sentido, o PERSIANN-CDR é uma das alternativas para a realização de estudos em locais onde os dados observados são escassos. Esse trabalho possui o intuito de analisar a aplicabilidade dos dados de precipitação estimada PERSIANN-CDR na modelagem hidrológica utilizando o software *Soil & Water Assessment Tool – SWAT* associado a SIG na bacia hidrográfica do rio Piancó para o período de 1983 – 2011. A BHRP é uma sub-bacia do rio Piranhas-Açu e está localizada na região sudoeste do estado da Paraíba, inserida no semiárido nordestino, na região denominada “Polígono das Secas”. Para a realização da modelagem, foi utilizado o modelo SWAT, que consiste em um modelo hidrossedimentológico, semi-distribuído, contínuo e de base semi-física, capaz de simular processos de escoamento superficial, produção de sedimentos, dentre outros. O modelo foi calibrado utilizando o *software* SWAT-CUP, de acordo com o algoritmo SUFI-2, utilizando 19 parâmetros e 300 iterações. O período de calibração foi de 2003 – 2011 e o de validação de 1983 – 1987. Com base nos índices estatísticos dos dados do PERSIANN-CDR para a BHRP, pode-se observar que esse produto de precipitação consegue representar bem o comportamento da precipitação em escala mensal e anual, porém a escala diária não foi bem representada. Além disso, os índices também demonstraram que os dados do algoritmo tendem a superestimar os valores de precipitação observados. As vazões simuladas no período de calibração e validação, tanto para os dados de precipitação observados, quanto para os estimados, possuíram um desempenho muito bom, com R^2 e COE iguais a 0,90 e 0,80, respectivamente, com dados de precipitação observada e $R^2 = 0,81$ e $COE = 0,80$, com os dados de precipitação estimada, ambos no período de calibração. Os resultados demonstraram que os dados do PERSIANN-CDR podem ser utilizados na região da BHRP em modelagem chuva-vazão, sendo então, uma possível alternativa para outras regiões que possuem dados observados escassos.

Palavras-chave: SWAT, PERSIANN-CDR, semiárido.

ABSTRACT

Precipitation is one of the most important variables in hydrological modeling and in the study of the hydrological cycle. Due to the relative scarcity of rainfall data in certain periods and regions for a number of reasons, the use of other precipitation data sources has proven to be feasible. In this sense, the PERSIANN-CDR is one of the alternatives for carrying out studies in places where the observed data are scarce. This research intends to model the rain-flow process with data estimated by this algorithm and to analyze the performance of the simulated flows, as well as the PERSIANN-CDR precipitation estimates for the Piancó River basin (PRB) in the state of Paraíba, and thereby verify the feasibility of using such data for semi-arid regions. The PRB is a subbasin of the Piranhas-Açu River and is located in the southwestern of Paraíba state, inserted in the northeastern semi-arid in the region called "Polígono das Secas". For the modeling, the Soil and Water Assessment Tool - SWAT model was used, which consists of a hydrosedimentological, semi-distributed, continuous and physically based model capable of simulating surface runoff processes, sediment production, etc. in association with GIS. The model was calibrated using the SWAT-CUP software, according to the SUFI-2 algorithm, using 19 parameters and 300 iterations. The calibration period was from 2003 to 2011 and the validation period from 1983 to 1987. Based on the statistical indices of the PERSIANN-CDR data for the PRB, it can be observed that the algorithm is able to represent well the precipitation behavior in monthly and annual scale, but the daily scale was not well represented. In addition, the indices also demonstrated that the algorithm data tend to overestimate the precipitation values observed. Simulated flow rates in the calibration and validation period, both for observed and estimated precipitation data, performed very well, with R^2 and COE greater than 0.80. The results showed that the data of the PERSIANN-CDR can be used in the region of the PRB in rainfall-flow modeling, being a possible alternative for other regions that have scarce observed data.

Keywords: SWAT, PERSIANN-CDR, semi-arid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do Rio Piancó.....	21
Figura 2 – Comportamento da precipitação média mensal na bacia do Rio Pianco – PB	22
Figura 3 – Esquematização de uma bacia hidrográfica.....	23
Figura 4 – Esquematização do ciclo hidrológico.....	25
Figura 5 – Esquematização do algoritmo PERSIANN-CDR.....	31
Figura 6 – Fluxograma dos processos de execução do modelo SWAT	37
Figura 7 – Modelo digital de elevação utilizado na BHRP.....	38
Figura 8 – Rede de drenagem e sub-bacias geradas pelo ArcSWAT para a BHRP.....	39
Figura 9 – Distribuição espacial dos diferentes tipos de coberturas do solo na BHRP.....	41
Figura 10 – Distribuição espacial dos diferentes tipos de solo na BHRP.....	43
Figura 11 – Distribuição espacial das classes de declividade na BHRP.....	45
Figura 12 – Distribuição espacial dos postos pluviométricos utilizados nesse estudo.....	47
Figura 13 – Distribuição espacial dos centróides do satélite PERSIANN-CDR utilizados na BHRP.....	49
Figura 14 – Espacialização dos postos pluviométricos em relação à grade PERSIANN-CDR.....	58
Figura 15 – Comportamento da precipitação média mensal observada e PERSIANN-CDR entre os anos de 1983 – 2011.....	61
Figura 16 – Comportamento entre precipitação média mensal observada e PERSIANN-CDR entre os anos de 1983 – 2011 para os postos pluviométricos individualmente.....	62
Figura 17 – Espacialização dos índices estatísticos dos dados mensais de precipitação observados e PERSIANN-CDR entre 1983 – 2011.....	65
Figura 18 – Variação espaço-temporal da precipitação média mensal observada entre os anos de 1983 – 2011.....	67

Figura 19 – Variação espaço-temporal da precipitação média mensal PERSIANN-CDR entre os anos de 1983 – 2011.....	68
Figura 20 – Variação das precipitações mensais médias: (A) dados observados e (B) dados PERSIANN-CDR para os anos entre 1983 – 2011.....	69
Figura 21 – Variação espacial das precipitações médias no período chuvoso (Janeiro – Abril) (A) dados observados e (B) dados PERSIANN-CDR para os anos entre 1983 – 2011.....	70
Figura 22 – Variação espacial das precipitações médias no período seco (Maio – Dezembro) (A) dados observados e (B) dados PERSIANN-CDR para os anos entre 1983 – 2011.....	71
Figura 23 – Comportamento da precipitação total anual observada e PERSIANN-CDR entre os anos de 1983 – 2011 para os postos pluviométricos individualmente.....	74
Figura 24 – Espacialização dos índices estatísticos dos dados anuais de precipitação observados e PERSIANN-CDR entre 1983 – 2011.....	77
Figura 25 – Variação das precipitações totais anuais: (A) dados observados e (B) dados PERSIANN-CDR para os anos entre 1983 – 2011.....	78
Figura 26 – Variação espacial das precipitações totais anuais: (A) dados observados e (B) dados PERSIANN-CDR para os anos entre 1983 – 2011.....	79
Figura 27 – Resultado do processo de calibração do modelo SWAT para o período de 2003 a 2011 utilizando precipitação observada.....	80
Figura 28 – Validação do modelo SWAT para o período de 1983 a 1987 utilizando precipitação observada.....	82
Figura 29 – Resultado da modelagem do SWAT utilizando os parâmetros otimizados com dados de precipitação observada no período de 2003 a 2011 utilizando precipitação do PERSIANN-CDR.....	83
Figura 30 – Resultado do processo de calibração do modelo SWAT para o período de 2003 a 2011 utilizando precipitação do PERSIANN-CDR.....	84
Figura 31 – Validação do modelo SWAT para o período de 1983 a 1987 utilizando precipitação PERSIANN-CDR.....	85

Figura 32 – Análise de sensibilidade do modelo para a modelagem utilizando dados de precipitação observada.....	87
Figura 33 – Análise de sensibilidade do modelo para a modelagem utilizando dados PERSIANN-CDR.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de uso e ocupação do solo identificadas na BHRP e suas respectivas associações com o banco de dados do ArcSWAT.....	40
Tabela 2 – Tipos e informações básicas dos solos existentes na BHRP	42
Tabela 3 – Postos pluviométricos utilizados nesse estudo.....	46
Tabela 4 – Coordenadas dos centróides do satélite PERSIANN-CDR utilizadas na BHRP.....	48
Tabela 5 – Definição dos parâmetros utilizados no gerador climático do ArcSWAT.....	51
Tabela 6 – Classificação da eficiência da modelagem hidrológica a partir da análise dos valores de R ² e COE.....	54
Tabela 7 – Parâmetros utilizados na calibração do modelo.....	55
Tabela 8 – Pontos PERSIANN-CDR utilizados para comparação das séries de precipitação entre 1983-2011.....	57
Tabela 9 – Análise estatística da precipitação observada e PERSIANN-CDR em escala diária entre 1983 e 2011.....	59
Tabela 10 – Análise da precipitação média mensal observada e PERSIANN-CDR entre os anos de 1983 a 2011.....	60
Tabela 11 – Análise estatística da precipitação observada e PERSIANN-CDR em escala mensal entre 1983 e 2011.....	63
Tabela 12 – Análise da precipitação total anual observada e PERSIANN-CDR entre 1983–2011.....	72
Tabela 13 – Análise estatística da precipitação observada e PERSIANN-CDR em escala anual entre 1983 e 2011.....	75
Tabela 14 – Valores dos parâmetros otimizados para a modelagem com dados de precipitação observada.....	81
Tabela 15 – Valores dos parâmetros otimizados para a modelagem com dados PERSIANN-CDR.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – *Agência Nacional de Águas*

AESA - *Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba*

ANSWERS - *Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation*

ASTER - *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*

BDMEP - *Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa*

BHRP – *Bacia Hidrográfica do Rio Piancó*

CHRS - *Center for Hydrometeorology and Remote Sensing*

CFSR - *Climate Forecast System Reanalysis*

CMORPH - *Climate Prediction Center Morphing*

CPC - *Climate Prediction Center*

CREAMS - *Chemicals Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*

EPIC – *Erosion-Productivity Impact Calculator*

EUROSEM - *European Soil Erosion Model*

GLDAS - *Global Land Data Assimilation System*

GLEAMS – *Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems*

GPCP – *Global Precipitation Climatology Project*

HIMS - *Hydroinformatic Modeling System*

HRU – *Hydrologic Responde Unit*

IDW – *Inverse Distance Weighting*

INMET – *Instituto Nacional de Meteorologia*

INPE – *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Changes*

MDE - *Modelo Digital de Elevação*

MGB – *Modelo Hidrológico Distribuído para Grandes Bacias*

MODIS - *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

NCDC NOCD CDR – *National Climatic Data Center/ National Oceanic and Atmospheric Administration/ Climate Data Record*

NCEP - *National Centers for Environmental Prediction*

PERSIANN CDR - *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks Climate Data Record*

RFE2 - *African Rainfall Estimate*

RMSE - *Raiz quadrada do erro médio*

ROTO - *Routing Outputs To Outlets*

SCS - *Soil Conservation Service*

SIG – *Sistema de Informações Geográficas*

SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*

SUDENE – *Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste*

SUFI-2 - *Sequential Uncertainty Fitting*

SWAT – *Soil and Water Assessment Tool*

SWAT-CUP - *Soil and Water Assessment Tool Calibration and Uncertainty Programs*

SWRRB - *Simulator for Water Resources in Rural Basins*

TMPA TRMM - *Tropical Rainfall Measuring Mission Multisatellite Precipitation Analysis*

TRMM – *Tropical Rainfall Measuring Mission*

UCI - *Universidade da Califórnia, Irvine*

UNESP – *Universidade Estadual Paulista*

USDA-ARS - *United States Department of Agriculture - Agricultural Research Service*

USGS – *United States Geological Survey*

WEPP - *Water Erosion Prediction Project*

SUMÁRIO

Sumário

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. Objetivos	20
1.1.1. Objetivo geral	20
1.1.2. Objetivos específicos	20
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	20
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
3.1. Bacia hidrográfica.....	23
3.2. Ciclo hidrológico	24
3.3. Modelos hidrológicos e SIG.....	25
3.3.1. Aplicações de modelagem hidrológica	27
3.4. Dados de precipitação PERSIANN-CDR	29
3.4.1. Aplicações dos Dados PERSIANN-CDR	31
4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	33
4.1. Breve descrição do modelo SWAT.....	33
4.2. Banco de dados	36
4.2.1. Discretização da bacia hidrográfica	37
4.2.2. Geração das HRUs.....	39
4.2.3. Gerador Climático.....	46
4.3. Análise de desempenho do modelo.....	52
4.4. Análise dos dados de precipitação PERSIANN-CDR.....	53
4.5. Calibração e validação do modelo SWAT	54
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
5.1. Análise da variabilidade espaço-temporal dos dados de precipitação observados e PERSIANN – CDR entre os anos de 1983 a 2011 na BHRP	57
5.1.1. Análise espaço-temporal das séries de precipitação em escala diária	58
5.1.2. Análise espaço-temporal das séries de precipitação em escala mensal	60
5.1.3. Análise espaço-temporal das séries de precipitação em escala anual	72
5.2. Análise das vazões e desempenho do modelo	80
5.3. Análise de sensibilidade da calibração do modelo SWAT utilizando o SWAT-CUP	86
6. CONCLUSÃO	88
7. REFERÊNCIAS.....	90
APÊNDICE A – Banco de dados de solos	101

APÊNDICE B – Gerador climático utilizado (WGEN).....	103
--	-----

1. INTRODUÇÃO

Na região semiárida do Brasil, o comportamento da erosão e do escoamento superficial, além de estar associado ao uso do solo, está intimamente relacionado com a dinâmica das precipitações que ocorrem durante o ano: uma estação chuvosa concentrada em apenas três ou quatro meses do ano com notáveis variações espaciais e temporais, e recorrentes períodos de estiagem (SRINIVASAN e PAIVA, 2009). Esses fatores podem exercer uma enorme influência para a análise das variáveis do ciclo hidrológico. Além disso, o regime de vazão do semiárido brasileiro pode variar bastante, podendo alcançar altos picos de vazão no período chuvoso e chegar à vazão zero no período de estiagem (FÉLIX e PAZ, 2016).

Segundo Srinivasan e Paiva (2009), a região semiárida requer uma análise mais complexa da dinâmica hidrológica devido aos aspectos do seu clima e solo. Logo, é requerida uma maior atenção em relação à aplicação de técnicas de pesquisa referentes aos estudos hidrológicos nessa região, que se tornam ainda mais complexos quando essas regiões possuem dados climatológicos escassos.

Estimar os processos relacionados ao comportamento hídrico de uma bacia hidrográfica constitui uma importante etapa no gerenciamento ambiental. A modelagem hidrológica é uma ferramenta útil para predição do comportamento dinâmico da água em uma bacia e, por conseguinte, fornece uma estimativa detalhada do balanço hídrico, sendo esta uma informação de grande valia para a gestão dos recursos hídricos (MELO NETO et al., 2014)

Diversas pesquisas sobre a dinâmica chuva – vazão vêm sendo realizadas no Brasil e no mundo. Na região do semiárido nordestino, pode-se citar (FÉLIX et al., 2016; DANTAS, 2016), e outras regiões do Brasil e do mundo (EDUARDO, 2016; LELIS, 2011; DHAR et al., 2009). Essas pesquisas utilizaram modelagem hidrológica com o modelo *Soil and Water Assessment Tool* – SWAT, com exceção de Félix et al. (2016), que utilizou o *Modelo Hidrológico Distribuído para Grandes Bacias* – MGB-IPH. São, portanto, pesquisas de grande valia para a compreensão dos processos hidrológicos de diferentes regiões.

O modelo SWAT foi desenvolvido para verificar os efeitos resultantes das modificações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, bem como a produção de sedimentos e a qualidade das águas (NEITSCH et al., 2005). É um modelo computacional gratuito que utiliza dados provenientes do sensoriamento remoto tais como os *Modelos Digitais de Elevação* – MDE, adquiridos por sensores orbitais, além de outros

mapeamentos como dados de cobertura e tipo de solo. As tecnologias atuais permitem assim, a aquisição de tais dados através de satélites, o que possibilita a execução do modelo em áreas que não possuem estes levantamentos de campo (CARVALHO NETO, 2011), o que permite a simulação de diversos cenários que já ocorram na bacia ou que possam vir a ocorrer, por processos naturais ou desencadeados pela intervenção humana (SOUZA, 2016).

É de se destacar o papel dos *Sistemas de Informações Geográficas – SIG*, na realização de pesquisas que se propõem a compreender a dinâmica dos fenômenos físicos que ocorrem na superfície terrestre, pois possibilitam que sejam feitas análises espaço-temporais dos processos que se deseja investigar, facilitando a execução de estudos destinados a avaliar as modificações promovidas pelas atividades humanas no espaço (SILVA et al., 2003).

O conhecimento da chuva é preponderante para o desenvolvimento de estudos relacionados aos diversos aspectos relativos à hidrologia. Em geral, a distribuição dos postos pluviométricos é muito esparsa, sobretudo, em algumas partes do Brasil com menor densidade populacional, o que dificulta a realização de aplicações que necessitam de dados de precipitação (GADELHA, 2018).

Nesse cenário, os dados de precipitação fornecidos por satélite se mostram como uma boa alternativa, visto que proporcionam longas séries históricas sem falhas, bem distribuídas espacialmente. Porém, análises estatísticas devem ser realizadas com estes dados e os observados para que seja verificada a adequação e a confiabilidade desta maneira alternativa de obtenção dos dados. Por vezes, ocorrendo discrepância entre eles, visto que as medições observadas podem ser questionáveis por diversos motivos como: falha na leitura, falta de medição em determinados dias, problemas relacionados aos equipamentos de medição etc.

Devido a relativa escassez de dados de pluviômetros no Brasil e outras partes do mundo, causada por falhas e baixa densidade de pluviômetros, o uso de dados de satélite vem se mostrando bastante confiável para utilização em pesquisas científicas (CREMONINI et al., 2017; ASHOURI et al., 2016; CASSE e GOSSET, 2015). Dentre os produtos de precipitação existentes para este fim, destaca-se o *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks Climate Data Record – PERSIANN CDR*, desenvolvido pelo *Center for Hydrometeorology and Remote Sensing – CHRS* da *Universidade da Califórnia, Irvine – UCI*. Desenvolvido com o objetivo de ser uma ferramenta para analisar padrões de tendência e mudanças no comportamento da precipitação mundial, com resolução espacial de $0,25^\circ$, englobando a faixa de latitudes $60^\circ\text{N} - 60^\circ\text{S}$ e longitudes $0^\circ - 360^\circ$, para o período de 01/01/1983 até o presente.

Diante disso, esse trabalho possui o intuito de analisar a aplicabilidade do uso de precipitação estimada PERSIANN-CDR na modelagem hidrológica na bacia do rio Piancó, localizada na região semiárida do nordeste brasileiro, a partir do modelo SWAT.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

Analisar a aplicabilidade dos dados de precipitação estimada PERSIANN-CDR na modelagem hidrológica utilizando o software *Soil & Water Assessment Tool* – SWAT associado ao SIG na bacia hidrográfica do rio Piancó para o período de 1983-2011.

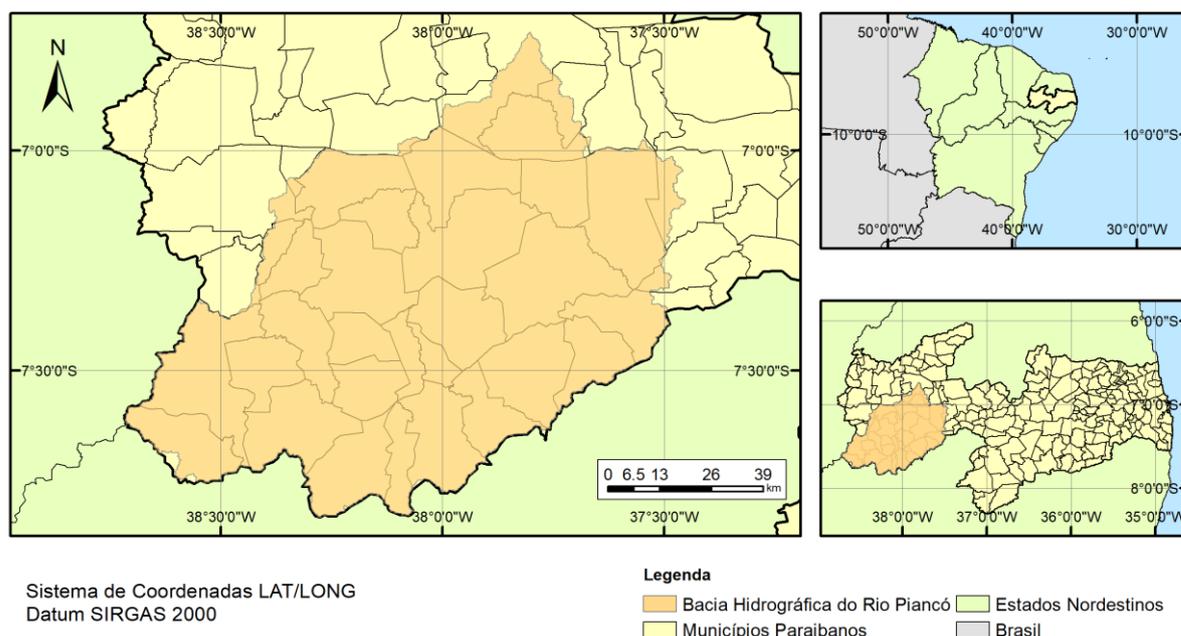
1.1.2. Objetivos específicos

- a) Comparar a variabilidade espaço-temporal dos dados de precipitação observados e estimados PERSIANN – CDR;
- b) Analisar a relação entre chuva e vazão em escala mensal na bacia do Rio Piancó nos períodos de 1983 a 1987 e 2003 a 2011;
- c) Verificar a sensibilidade dos parâmetros do SWAT para a modelagem utilizando os dados de precipitação observada e estimada PERSIANN – CDR.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Rio Piancó (BHRP) é uma sub-bacia do Rio Piranhas-Açu e está localizada na região sudoeste do estado da Paraíba (Fig.1), entre as coordenadas 38°43'12" W, 37°27'0" W e 6°44'24" S e 7°51'36" S. A mesma faz fronteira com o estado do Ceará a oeste, com a bacia do rio Espinharas a leste, com Alto e Médio Piranhas ao norte e com o estado de Pernambuco ao sul, possuindo uma área total de 9.205 km², engloba 41 municípios, tendo uma população total de 350.284 habitantes (IBGE, 2010).

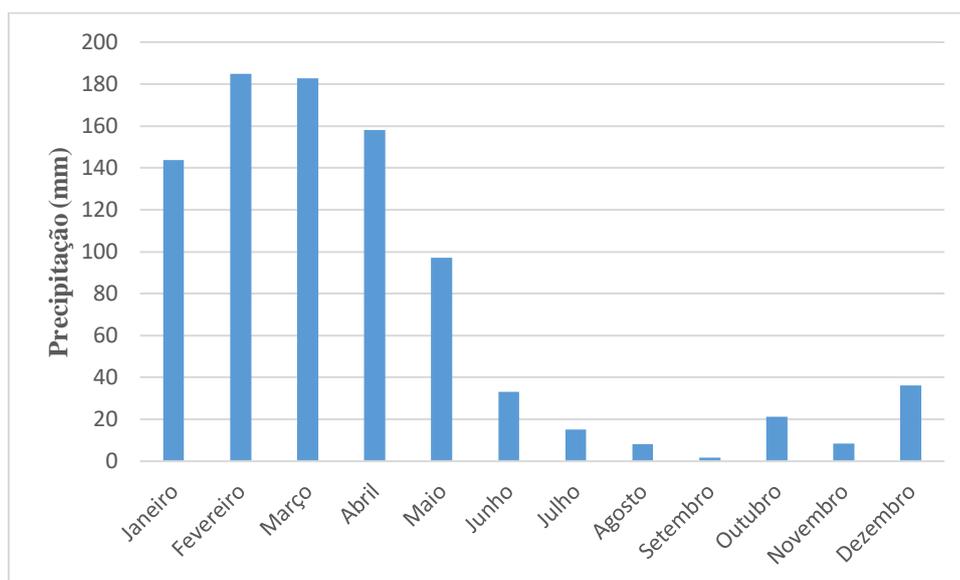
Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do Rio Piancó – PB



Fonte: Autora (2019).

Em relação ao clima, a bacia encontra-se no semiárido nordestino na região denominada “Polígono das Secas”, sendo uma área quente e seca. As temperaturas médias anuais variam de 23 a 30°C, sendo mais elevadas durante o dia e na estação seca. Além disso, a média anual da umidade relativa do ar, varia entre 64 e 72% (INMET, 2018). Possui evaporação média anual superior a 2.000 mm, intensa insolação (média de 2.880 h/ano) e precipitações bastante irregulares não possibilitando práticas agrícolas rentáveis aos produtores nas áreas rurais (SUDENE, 1996). A pluviosidade média da região (Fig.2) é de 890 mm por ano, com estação chuvosa de janeiro a abril, esta compreendendo mais de 70% de todo o volume anual. O período seco é observado entre os meses de maio a dezembro, com precipitações inferiores a 100mm (ANA, 2018).

Em relação à geologia, predominam amplamente rochas ígneas e metamórficas, representadas por gnaisses, xistos, migmatitos e granitos, que formam o embasamento cristalino. Depósitos quaternários distribuem-se por toda a bacia, na forma de aluviões e coberturas detrítico-lateríticas. Na região do embasamento cristalino predominam o luvissole crômico e o neossolo litólico, além de argissolo vermelho-amarelo, ambos desfavoráveis à agricultura, enquanto que na área de bacia sedimentar, predomina cambissolo háplico (ANA, 2016).

Figura 2 – Comportamento da precipitação média mensal na BHRP

Fonte: Autora (2019).

O bioma predominante é a caatinga. A vegetação encontrada na bacia é formada basicamente por plantas xerófilas, onde se destacam espécies herbáceas, arbustivas e arbóreas, principalmente as cactáceas, as plantas arbustivas e árvores de médio e pequeno porte (BRANCO, 2017). Esse bioma vem despertando cada vez mais o interesse, principalmente de pesquisadores e cientistas que trabalham com áreas em processo de desertificação, pois observa-se uma tendência à expansão de áreas desérticas nessa região. O avanço do processo de degradação ambiental na região deve-se a vários fatores, entre os quais, destacam-se: as práticas agrícolas inadequadas, o desmatamento, a infertilidade, a compactação do solo, os processos erosivos e a salinização de algumas áreas (BRASILEIRO, 2009). Observa-se que a atividade agrícola é a principal atividade econômica da região estudada.

Em relação ao relevo e geomorfologia, ocorrem superfícies dissecadas diversas na parte norte da bacia, maciços e serras baixas na parte central e na região sul, maciços e serras altas (ANA, 2018). Com o auxílio do *Modelo Digital de Elevação* – MDE, estimou-se a altitude média da bacia de 432m, variando de 214m a 725m e declividade predominante na faixa de 0 – 8%.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

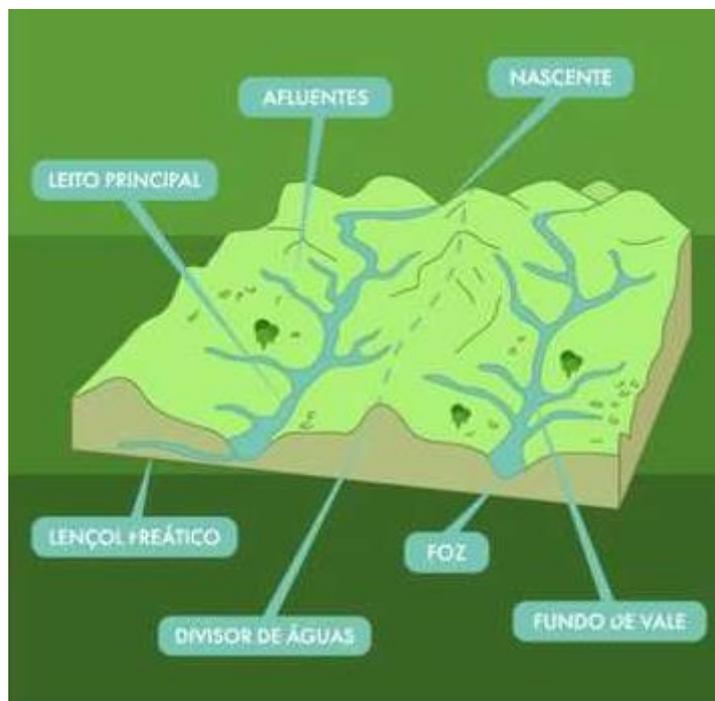
3.1. Bacia hidrográfica

Uma bacia hidrográfica é definida como uma unidade física, caracterizada como uma área drenada por um determinado curso de água e limitada, perifericamente, pelo chamado divisor de águas e engloba todas as modificações que os recursos naturais venham a sofrer. Não existe área qualquer na Terra, por menor que seja, que não se integre a uma bacia ou microbacia (PRADO, 2005).

De acordo com Tucci (2005), a bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída. Compõe-se de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um leito único no seu exutório. Tal fenômeno do fluxo superficial se dá devido as conformações topográficas da área da bacia (DINGMAN, 2008).

Na Figura 3, pode-se observar a esquematização de uma bacia hidrográfica:

Figura 3 – Esquematização de uma bacia hidrográfica



Fonte: UNESP (2017).

É o elemento fundamental de análise no ciclo hidrológico, principalmente na sua fase terrestre, que engloba a infiltração e o escoamento superficial (SILVEIRA, 1993). Trata-se de um sistema aberto, já que nem toda a precipitação (entrada de água) se torna escoamento no exutório (saída) ou fica armazenada na própria bacia. Há perdas intermediárias, relativas aos volumes evaporados, transpirados ou infiltrados profundamente. Tais volumes de água representam parcela da entrada no sistema que é “perdida” para a atmosfera ou para camadas profundas do subsolo (PAZ, 2004).

Sabe-se que uma bacia hidrográfica pode conter sub-bacias que, a depender do contexto do estudo e sua escala, podem representar isoladamente uma bacia hidrográfica. Logo, diversas sub-bacias podem estar associadas ao corpo hídrico principal (HORNBERGER, 1998).

3.2.Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico é observado como um processo fechado, em nível global, no qual a água circula entre os reservatórios terrestres (continentes e oceanos) e atmosférico, impulsionada, principalmente, pela energia solar sob os três estados físicos (gasoso, líquido e sólido) (TUCCI, 2009). Nota-se ainda que a gravidade e a rotação da Terra também são responsáveis por mover esse ciclo. As etapas do mesmo são: precipitação, evapotranspiração (evaporação e transpiração), infiltração, percolação, escoamento superficial, escoamento subterrâneo e condensação.

Segundo Paz (2004), de maneira simplificada, o ciclo hidrológico pode ser descrito da seguinte forma: ocorre evaporação da água dos oceanos e formação do vapor de água. Sob determinadas condições, o vapor precipita. Parte da precipitação não chega a atingir a superfície terrestre, sendo evaporada, enquanto que boa parte da precipitação atinge diretamente a superfície de lagos e oceanos, evaporando parcela. Da precipitação que atinge a superfície terrestre, uma parte é interceptada pela cobertura vegetal, de onde parte evapora e parte acaba escorrendo até o solo. A precipitação que chega ao solo, tem parcela infiltrada sub-superficialmente, e desta, uma parte escoam até corpos d’água próximos, como rios e lagos, enquanto que uma parte percola, atingindo os aquíferos, que escoam lentamente até rios e lagos. Ainda quanto à parte da precipitação que atinge o solo, esta vai escoar superficialmente, sendo retida em depressões do solo, infiltrada, evaporada ou sendo absorvida pela vegetação. A vegetação, que retém água das depressões do solo e infiltrações, elimina vapor d’água para a atmosfera, evapotranspiração. A outra parcela do escoamento superficial segue para rios, lagos e oceanos, governada pela gravidade (PAZ, 2004).

Na Figura 4, são apresentadas as principais etapas do ciclo hidrológico:

Figura 4 – Esquemática do ciclo hidrológico



Fonte: USGS (2018).

Observa-se que quando o fluxo é da superfície para a atmosfera ocorre predominantemente no estado de vapor, devido principalmente ao processo de evapotranspiração. Da atmosfera para a superfície, a transferência de água pode ocorrer nos três estados físicos, sendo a precipitação da chuva em estado líquido o mais representativo (TUCCI, 2009).

Por fim, nota-se que, por ser um processo cíclico, o mesmo não possui início e fim definidos, ocorrendo continuamente.

3.3. Modelos hidrológicos e SIG

De modo geral, um modelo pode ser compreendido como sendo qualquer representação simplificada da realidade ou de um aspecto do mundo real que seja de interesse ao pesquisador, que possibilite reconstruir a realidade, prever um comportamento, uma transformação ou uma evolução (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Os modelos são ferramentas utilizadas para representar processos e elaborar prognósticos para gestão dos sistemas. Eles não são objetivos em si só, mas permitem analisar cenários, estudos de alternativas, prever a ocorrência de fenômenos, entre outros. Os modelos

principalmente utilizados são os matemáticos que expressam matematicamente as funções dos processos (TUCCI, 2005).

Os modelos matemáticos vêm sendo desenvolvidos e aperfeiçoados desde a década de 50 para prever o impacto das atividades agrícolas na qualidade das águas superficiais e subterrâneas. O desenvolvimento desses modelos requer experiência, maturidade e critério na sua utilização, pois podem ser aplicados desde a sistemas simples até aos complexos, como as bacias hidrográficas, combinando processos naturais, como precipitação, com fatores relativos às atividades humanas, tais como desmatamento, produção agrícola e construção de represas. Assim, essa sucessão de estados ou mudanças associadas ao ciclo hidrológico, à erosão e à produção de sedimentos podem ser contemplados ao simplificar uma realidade complexa por meio da utilização de alguns aspectos de maior importância envolvidos nos processos mencionados (GRIEBELER et al., 2001).

A análise espacial distingue um modelo hidrológico em concentrado ou distribuído. Um modelo concentrado considera que todos os dados de entrada, em consequência, também os de saída são representativos da área estudada. Enquanto que um modelo distribuído é capaz de enxergar peculiaridades que individualizam ou particularizam áreas semelhantes dentro daquela maior que é estudada, e, portanto, tais observações são expressas nos dados de entrada e saída. Matematicamente verifica-se que o modelo concentrado apresenta apenas o “tempo” enquanto variável independente, sendo representado diretamente por uma equação diferencial ordinária. Por outro lado, modelos distribuídos, possuindo variáveis de “tempo e espaço” independentes, são representados por equações diferenciais parciais (TUCCI, 2005).

Os dados podem ser representados de maneira contínua ou discreta. Observa-se que os fenômenos naturais acontecem de maneira contínua no tempo, porém são representados pelos modelos através de um intervalo de tempo. Pode-se conceber modelos com diferentes representações do tempo, ao passo que quanto menores os intervalos, obtém-se maior precisão e maior custo computacional (RENNÓ, 2003).

Modelo conceitual é o tipo de modelo capaz de simular fenômenos em uma área levando em consideração os processos físicos que ocorrem neste ambiente. Também são chamados de modelos de base física. Enquanto que modelos empíricos objetivam ajustar os valores calculados dos dados observados através de funções estatísticas que não têm relação com os processos físicos envolvidos (TUCCI, 2005).

Entre os modelos hidrológicos, há aqueles que possuem equações ou modelos capazes de investigar os processos hidrossedimentológicos e por este motivo são chamados modelos

hidrossedimentológicos (CARVALHO NETO, 2011). Dentre os modelos hidrossedimentológicos, destacam-se: *Water Erosion Prediction Project – WEPP* (NEARING et al., 1989); *Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation – ANSWERS* (BEASLEY et al., 1980); *European Soil Erosion Model – EUROSEM* (CHISCI e MORGAN, 1988); *Chemicals Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems – CREAMS* (FOSTER et al., 1981); e *Soil and Water Assessment Tool – SWAT* (ARNOLD et al., 2012).

Um grande avanço na modelagem hidrológica foi a integração entre modelos hidrológicos e SIG, o que possibilitou a visualização espacial da distribuição dos resultados dos processos hidrológicos, ou seja, a produção de mapas temáticos referente a um determinado processo hidrológico (SANTOS et al., 2014).

Um sistema de informação geográfica, também conhecido como sistema de informação geoespacial é qualquer sistema para gerenciamento de dados de captura, armazenamento, análise de dados e atributos associados espacialmente referenciados à Terra (ROFFE, 2012). É a cadeia de operações que conduz desde o planejamento de observação e coleta de dados até seu armazenamento e análise, e depois a utilização das informações obtidas em qualquer processo decisório (FAOb, 1993).

A integração do SIG com os modelos hidrológicos e a sua aplicação em estudos de bacias hidrográficas permite a realização de um grande número de operações, como o projeto, calibração, simulação e comparação entre os modelos, com uma grande vantagem que é a velocidade de processo dessas operações. O uso do SIG permite, portanto, subdividir a bacia hidrográfica em subáreas homogêneas, que através dos resultados georreferenciados contribuem com o avanço quantitativo na caracterização dos parâmetros hidrológicos e no apoio à decisão no contexto da gestão eficiente da ocupação do solo e dos recursos hídricos (MELO et al., 2008).

3.3.1. Aplicações de modelagem hidrológica

Lelis (2011) aplicou o modelo SWAT em uma bacia hidrográfica no ribeirão de São Bartolomeu, Viçosa - Minas Gerais, com o objetivo de estudar o escoamento superficial, bem como quantificar a perda de solo por erosão. Nesta pesquisa foram instaladas 10 parcelas experimentais no rio, de modo que se pudesse coletar dados de perda de solo e escoamento superficial em condições naturais de chuva. O modelo realizado possuiu um bom desempenho tendo coeficiente de eficiência para a produção de sedimentos e o escoamento superficial,

respectivamente, 0,953 e 0,999. Além disso, o modelo serviu como base para a simulação de novos cenários de uso e ocupação do solo e de alterações climáticas, usando as previsões do *Intergovernmental Panel on Climate Changes* – IPCC, servindo como uma ferramenta valiosa para a gestão dos recursos hídricos da região.

Carvalho Neto (2011) utilizou o modelo SWAT para analisar a dinâmica hidrossedimentológica na Bacia do Riacho dos Namorados e em duas sub-bacias experimentais da Bacia de São João do Cariri, todas localizadas na Paraíba. Nessa pesquisa, foi analisada a influência nos processos hidrossedimentológicos da existência de açudes na bacia hidrográfica em estudo, bem como os diferentes produtos causados pela inserção de diferentes modelos digitais de elevação, um obtido por interpolação de dados de campo e outro obtido por sensoriamento remoto. Também foram analisadas as diferenças causadas de acordo com os diferentes usos do solo: caatinga, monocultura de milho, reflorestado com Algaroba e totalmente desmatado. Observou-se que o solo reflorestado com Algaroba possui um bom potencial em termos de conservação, inclusive melhor até que a vegetação nativa (caatinga). Observou-se também que os modelos digitais de elevação obtidos por sensoriamento remoto precisam de cuidados mais detalhados, como uma posterior coleta em campo de dados, pois diferentes declividades causam significativas mudanças nos processos hidrossedimentológicos. Por fim, foi observado que os açudes foram responsáveis pela diminuição das taxas de vazão e da carga de sedimentos na bacia.

Cremonini et al. (2017) propuseram a realização da modelagem utilizando o modelo SWAT para a Bacia do Rio dos Bugres, Rio Negrinho – Santa Catarina, utilizando dados de satélite TRMM 3B42 e dados diários medidos em campo para a análise das previsões de vazões. O monitoramento dessa bacia foi encerrado em 2014, logo, esse trabalho possui importância ao permitir a continuidade dos estudos hidrológicos na região. Foi constatado que os dados de satélite tenderam a superestimar os dados de precipitação observados. O modelo obteve desempenho satisfatório em relação às vazões médias, porém não foi satisfatório em relação às vazões de base e de pico, tendo um coeficiente de eficiência Nash – Sutcliffe insatisfatório, pois o mesmo apresentou valor negativo com os dados estimados de satélite e 0,34 com dados observados.

Duru et al. (2018) realizaram uma modelagem hidrossedimentológica com o modelo SWAT na bacia do rio Ankara, Turquia, com o objetivo principal de realizar a predição da produção de sedimentos, de modo que pudesse ser elaborado um mapa de erosão de solos da região. Para calibração e validação do modelo, foram utilizadas séries de, respectivamente, (1989 – 1996) e (1982 – 1984), correspondendo à vazão diária e mensal e a produção de

sedimentos mensal. A vazão diária simulada para o período de calibração apresentou $NS = 0,61$; erro relativo = $-0,55$ e $R^2 = 0,78$. Já a vazão simulada e a produção de sedimentos apresentaram os seguintes valores para os índices estatísticos no período de calibração respectivamente $NS = 0,79$; erro relativo = $-0,58$; $R^2 = 0,89$ e $NS = 0,81$; erro relativo = $-1,55$ e $R^2 = 0,93$. Em relação a validação, o modelo também obteve um bom desempenho, sobretudo em relação ao R^2 , sendo respectivamente o da vazão diária simulada, vazão mensal simulada e produção de sedimentos simulada, $R^2 = 0,71$, $R^2 = 0,84$ e $R^2 = 0,87$. O mapa de erosão obtido mostrou que as áreas mais vulneráveis à erosão são as mais urbanizadas e com agricultura mais intensiva próximas aos canais do rio. A partir do desempenho estatístico, observa-se que o SWAT é capaz de gerar simulações bastante próximas ao comportamento real da bacia de estudo.

3.4. Dados de precipitação PERSIANN-CDR

Segundo Monteiro et al. (2015), a precipitação é uma das variáveis mais importantes em modelagem hidrológica e no estudo do ciclo hidrológico. Além disso, destacam que uma rede de estações pluviométricas possui elevado custo econômico e, exige dedicação constante de técnicos especializados para recolher dados, manter os equipamentos e controlar a consistência dos dados coletados, como consequência, o número de estações em uma área de interesse normalmente está abaixo do ótimo e os dados disponíveis podem incluir períodos de observação curtos, incompletos e de baixa qualidade. Esses problemas, como mencionado, interferem na qualidade da modelagem hidrológica.

De acordo com Jiménez e Collischonn (2014), ao longo dos últimos 20 anos, e desde que o satélite *Tropical Rainfall Measurement Mission* – TRMM foi lançado ao espaço, diversos produtos de estimativa de precipitação foram criados, baseados na observação multiespectral de diversos satélites de diferentes órbitas. Podem ser citados como exemplo os produtos *Climate Prediction Center Morphing* – CMORPH (JOYCE et al., 2004); *TRMM Multisatellite Precipitation Analysis* – TMPA TRMM (HUFFMAN et al., 2007), *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Network* – PERSIANN (HONG et al., 2004).

Como esses produtos têm orientação global (ou semi-global), prevê-se que os desempenhos dos produtos de precipitação por satélite variem espacialmente. Assim, é necessário avaliar o desempenho de produtos de precipitação por satélite com dados locais de pluviometria antes

que esses produtos possam ser usados com alta confiança em uma área de estudo específica. Tal avaliação e intercomparação também podem ajudar a identificar o produto de precipitação por satélite mais preciso e adequado entre várias alternativas (LIU et al.,2015).

PERSIANN-CDR é usado para estimar precipitação com base em dados de satélite e modelos de circulação global, cobrindo mais de três décadas (de 1 de janeiro de 1983 até o presente) de precipitação diária com resolução de $0,25^\circ$ na faixa de latitudes 60°S - 60°N e de longitudes 0° - 360° . O produto PERSIANN-CDR está disponível para o público como um registro de dados climáticos operacionais através do site do Programa *National Climatic Data Center/ National Oceanic and Atmospheric Administration/ Climate Data Record – NCDC/NOCD/CDR* sob a categoria de CDR atmosférico: www.ncdc.noaa.gov/cdr/operationalcdrs.html (CHRS, 2018).

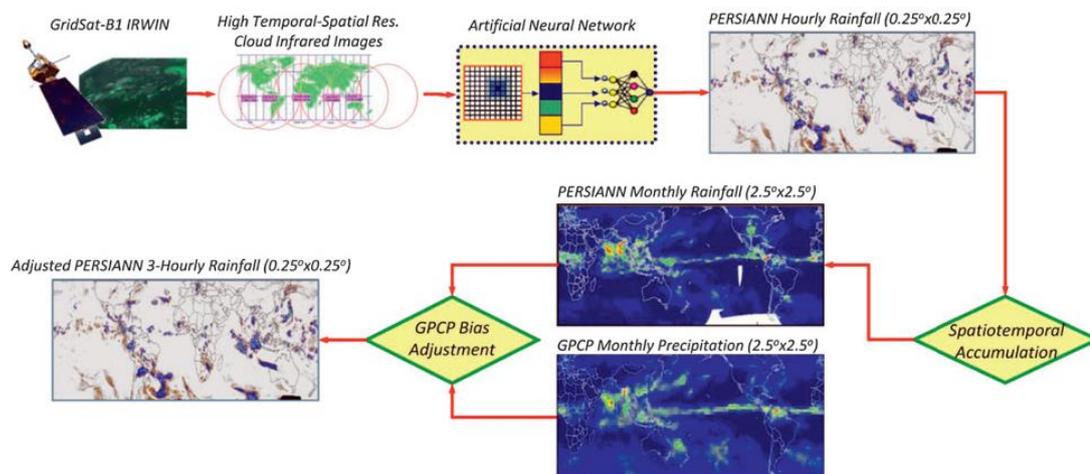
A estimativa da precipitação é obtida a partir da combinação de informações nas faixas espectrais do infravermelho e do micro-ondas de satélites geoestacionários de baixa-órbita. O algoritmo de recuperação usa dados infravermelhos de satélites geossíncronos globais como a principal fonte de informação de precipitação. Para cumprir o requisito de calibração do PERSIANN – CDR, o modelo é pré-treinado usando os dados de precipitação horária do *National Centers for Environmental Prediction – NCEP*. Então, os parâmetros do modelo são mantidos fixos e o modelo é executado para o registro histórico completo de dados GridSat-B1. Para reduzir os vieses na precipitação estimada, preservando os padrões espacial e temporal em alta resolução, as estimativas resultantes são ajustadas usando os produtos de precipitação mensal de $2,5^\circ$ do *Global Precipitation Climatology Project - GPCP* de forma que mantenha a consistência dos dois conjuntos de dados em todo o registro (ASHOURI et al. 2015).

A partir do esquema da Figura 5, pode-se observar como ocorrem os processos de estimativa de precipitação do PERSIANN-CDR.

O PERSIANN-CDR se caracteriza por fornecer uma longa e consistente série histórica, atualizada trimestralmente (ASHOURI et al, 2016; MIAO et al. 2015; LIU et al. 2017). Além de ser confiável por utilizar diferentes fontes de dados para a estimativa de precipitação. Apesar disso, possui algumas limitações. Por possuir intervalos diários de medição, o mesmo não é capaz de estimar curtos eventos de precipitação, como os que duram apenas alguns minutos ou horas. Além disso, por depender fortemente dos dados de infravermelho, os algoritmos são bastante complexos, não se adequando de forma geral ao globo inteiro. Por fim, como já

mencionado, os dados são bastante dependentes de outras fontes como o GPCP, o que pode vir a ser uma limitação.

Figura 5 – Esquemática do algoritmo PERSIANN-CDR



Fonte: ASHOURI et al. (2015).

3.4.1. Aplicações dos Dados PERSIANN-CDR

Ashouri et al. (2016) propuseram um estudo sobre a performance do PERSIANN-CDR em modelos hidrológicos em três bacias experimentais nos Estados Unidos da América. O estudo foi dividido em duas fases. Na primeira, utilizou-se quatro fontes de dados distintas de precipitação para comparação, PERSIANN-CDR, *TRMM Multisatellite Precipitation Analysis* – TMPA, PERSIANN e dados do NCEP para o período de 2003 a 2010. Obteve-se que os dados TMPA e PERSIANN-CDR possuíram performances semelhantes, com uma correlação boa em relação aos do NCEP, sendo 0,80 e 0,75, respectivamente. Além disso, ambos possuíram o mesmo valor do desvio da raiz quadrada média, 6 mm. Já o PERSIANN não possuiu um bom desempenho, visto que diferentemente dos demais, ele não é ajustado por calibração, são dados em tempo real. Em relação aos dados observados de vazão, obteve-se que PERSIANN-CDR e TMPA foram os que se ajustaram melhor entre os quatro em todas as estações do ano. Com isso, obteve-se que os dados provenientes do PERSIANN-CDR possuem boa confiabilidade para a área em estudo. Na segunda fase, utilizaram a série do PERSIANN-CDR, a qual se inicia em 1983, para simular a vazão entre 1983 e 1996, visto que os dados

observados se iniciam a partir desse último ano. Com isso, essa pesquisa tornou possível o uso de uma série histórica maior para pesquisas hidrológicas na área em estudo.

Miao et al. (2015) estudaram o desempenho do PERSIANN-CDR em capturar o comportamento de eventos extremos de precipitação na China entre 1983 e 2006. Foram analisadas três categorias: percentil, limiar absoluto e índices máximos, tanto para PERSIANN-CDR quanto para a base de dados de precipitação diária do leste asiático, de modo que pudesse haver comparação, tendo ao todo onze índices distribuídos pelas três categorias, como por exemplo: precipitação anual para dias úmidos, número de dias do ano com precipitação maior que 20 mm, maior número de dias consecutivos do ano em que a precipitação foi maior ou igual a 1 mm etc. Concluiu-se que o PERSIANN-CDR obteve uma boa performance para a região leste da China e que os índices relativos ao limiar absoluto foram os que melhor foram representados. Porém, foi observado que nas outras regiões da área de estudo, onde a performance do PERSIANN-CDR não foi satisfatória, existe uma baixa densidade de pluviômetros, além de que a topografia não favorece o uso dos mesmos. Por fim, notou-se que o PERSIANN-CDR é uma ferramenta valiosa para estudos hidrológicos e climáticos, sobretudo em regiões com alta densidade de pluviômetros.

Casse e Gosset (2015) analisaram as mudanças hidrológicas e o aumento das inundações na cidade de Niamey – Níger entre 1983 e 2013 utilizando os dados provenientes do PERSIANN-CDR. Nesse estudo, foram utilizados quatro produtos de precipitação, de modo que pudesse ser realizada uma comparação entre os mesmos. São estes: PERSIANN-CDR, TMPA, medições do *Climate Prediction Center* – CPC e medições regionais calibradas por satélite *African Rainfall Estimate* – RFE2. Constatou-se que o PERSIANN-CDR produz um volume anual de precipitação semelhante aos outros três métodos, porém, o mesmo suaviza os eventos de chuva, fornecendo muitos dias de precipitação com baixa intensidade. A simulação hidrológica baseada no PERSIANN-CDR apresentou uma variabilidade interanual realista e foi capaz de detectar os anos onde houve inundação, mas não foi capaz de representar os eventos nos dias exatos em que ocorreram. O estudo dividiu o período em três décadas, sendo constatado que a última foi a que possui um maior número de inundações, sendo cinco ao todo. Concluiu também que as inundações são causadas principalmente por grandes volumes de precipitação na área.

Liu et al. (2017) estudaram a viabilidade do uso do PERSIANN-CDR para modelar chuva – vazão em duas bacias do planalto tibetano entre 1983 e 2012, visto que a rede de pluviômetros

da região é bastante escassa, utilizando o modelo *Hydroinformatic Modeling System* – HIMS. Além disso, foi comparado o desempenho da modelagem utilizando dados de pluviômetros, PERSIANN-CDR e *Global Land Data Assimilation System* – GLDAS. Notou-se que em comparação com os dados observados, PERSIANN-CDR e GLDAS obtiveram simulação com melhor desempenho do que a dos dados dos pluviômetros para a bacia do rio Amarelo, enquanto que na outra, bacia do rio Yangtze, as três simulações obtiveram boa e semelhante performance. Conclui-se que a simulação proveniente dos dados de pluviômetros tendeu a superestimar as vazões na bacia Yangtze, logo em regiões com baixa densidade de pluviômetros, não é aconselhado utilizá-los, pois diminui a acurácia da modelagem. Já nos períodos secos, as três simulações produziram hidrogramas subestimados, provavelmente por questões de o modelo utilizado não compreender todos os fenômenos necessários, como indicado pelos autores.

Portanto, observou-se que o PERSIANN-CDR é uma ferramenta confiável e de grande potencial em regiões com dados de precipitação observados mal espacializados e/ou escassos.

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Nesse estudo, a metodologia utilizada se baseou no modelo SWAT para atingir os objetivos propostos. Para sua devida utilização, é preciso possuir diversos dados em relação à área de estudo, como por exemplo: dados climáticos, topográficos, de tipo de solo, uso e ocupação do solo etc. Além disso, como mencionado anteriormente, os dados são fornecidos ao modelo por meio de um SIG de modo a espacializar e facilitar o manuseio desse volume de dados. Neste tópico, serão descritos o modelo SWAT, bem como os dados necessários para a modelagem e sua organização.

4.1. Breve descrição do modelo SWAT

Com cerca de 30 anos de trabalho conduzidos pelo *United States Department of Agriculture Agricultural Research Service* – USDA ARS, o modelo hidrossedimentológico SWAT agrega em si diversos fundamentos de outros modelos. Os modelos *Simulator for Water Resources in Rural Basins* – SWRRB, QUAL2E e *Routing Outputs To Outlets* – ROTO foram diretamente adaptados para a origem do SWAT. O primeiro citado, SWRRB, foi originado através da

junção das funcionalidades dos modelos *Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems* – GLEAMS, *Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems* – CREAMS e *Erosion Productivity Impact Calculator* – EPIC, além de diversas modificações que proporcionaram maior avanço para realizar as simulações. Com isto, é possível perceber que o modelo foi concebido já com uma vasta gama de experiência intrínseca, haja vista que tais modificações, agregadas pelos diversos modelos, foram feitas visando a superação de obstáculos (GASSMAN, 2007).

O SWAT (Arnold et al., 1998) se constitui como um modelo hidrossedimentológico de base semi-física capaz de simular processos de escoamento superficial, produção de sedimentos, transporte de nutrientes e compostos químicos no solo, por exemplo, em escala de bacia hidrográfica para longas séries temporais, operando em um intervalo de tempo diário (GASSMAN, 2007).

Esta ferramenta está sendo cada vez mais utilizada em nível mundial para as mais diversas linhas de pesquisas por se tratar de um modelo semi-distribuído, capaz de espacializar os processos físicos e por levar em consideração informações sobre clima, hidrologia, propriedades do solo, uso e ocupação do solo, topografia, entre outros parâmetros que possibilitam a obtenção de resultados mais robustos sobre processos físicos muitas vezes complexos (GASSMAN et al., 2007).

Observa-se que o SWAT se caracteriza por ser computacionalmente eficiente, logo, é capaz de simular bacias hidrográficas extensas, estabelecendo diferentes cenários e estratégias de manejo do solo, de forma relativamente rápida e pouco onerosa, além de que é um modelo contínuo, podendo simular os efeitos das mudanças no uso e manejo do solo em longos períodos. (ARNOLD et al., 1998, e NEITSCH et al., 2002).

A equipe de desenvolvimento do SWAT da *Texas A & M University* desenvolveu uma extensão ArcGIS (ESRI, Redlands, CA) para o modelo SWAT2005, conhecido como ArcSWAT (SWAT 2009). Essa extensão agiliza a entrada de dados, a criação de arquivos de entrada necessários e a edição de parâmetros ao mesmo tempo em que permite que os parâmetros espaciais sejam facilmente observados no ambiente ArcGIS (ROFFE, 2012). Essa extensão foi utilizada no desenvolvimento dessa pesquisa.

Segundo Dhar (2009), o SWAT possui oito componentes principais para promover sua simulação, são eles: hidrologia, aporte de sedimentos, clima, temperatura do solo, crescimento vegetal, nutrientes, pesticidas/bactérias e práticas agrícolas. Como o objetivo desse trabalho se

detém em analisar a dinâmica de vazão, apenas serão descritas as equações de escoamento superficial.

No modelo SWAT, o ciclo hidrológico é baseado na equação do balanço hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum(R - Q_{surf} - ET - P - Q_{lat} - Q_{gw}) \quad (Eq.1)$$

em que:

SW_t = quantidade final de água no solo (mm);

SW_0 = quantidade inicial de água no solo (mm);

R = precipitação (mm);

Q_{surf} = escoamento superficial (mm);

ET = evapotranspiração (mm);

P = percolação de água da camada simulada para a camada inferior (mm);

Q_{lat} = escoamento lateral (mm);

Q_{gw} = água que retorna ao curso d'água devido ao escoamento subsuperficial (mm).

Observa-se que o escoamento superficial é o fator principal da perda de solos e ocorre quando a taxa de aplicação de água no solo excede a taxa de infiltração (LELIS, 2011). O escoamento superficial calculado na rotina de simulação do SWAT, se dá através do Método de Curva Número, elaborado em 1954 pelo *Soil Conservation Service* – SCS dos Estados Unidos (ZHANG, 2009), demonstrado a seguir (Eq.2):

$$Q_{surf} = \frac{(R-0,2S)^2}{(R+0,8S)} \quad (Eq. 2)$$

em que:

Q_{surf} = escoamento superficial acumulado ou excesso de chuva (mm);

R = precipitação diária (mm);

S = parâmetro de retenção (mm).

Sabe-se que o parâmetro de retenção (Eq. 3) varia tanto espacial quanto temporalmente, pois é influenciado por fatores como: mudanças no tipo e uso do solo, inclinação, manejo e variações de umidade.

$$S = 25,4 \frac{100}{CN} - 10 \text{ (Eq. 3)}$$

em que:

CN = valor da curva número para um dia.

O fator CN é determinado diariamente, no modelo SWAT, variando numericamente de 1 a 100, sendo o limite inferior representativo de um solo totalmente permeável e o limite superior de um solo que converterá toda a precipitação em escoamento (totalmente impermeável) (Neitsch, 2005).

Outras equações que regem o modelo SWAT como: produção de sedimentos, evapotranspiração, escoamento subterrâneo, vazão de pico, erodibilidade do solo etc., podem ser consultadas em ARNOLD et al. (1998) e NEITSCH et al. (2011).

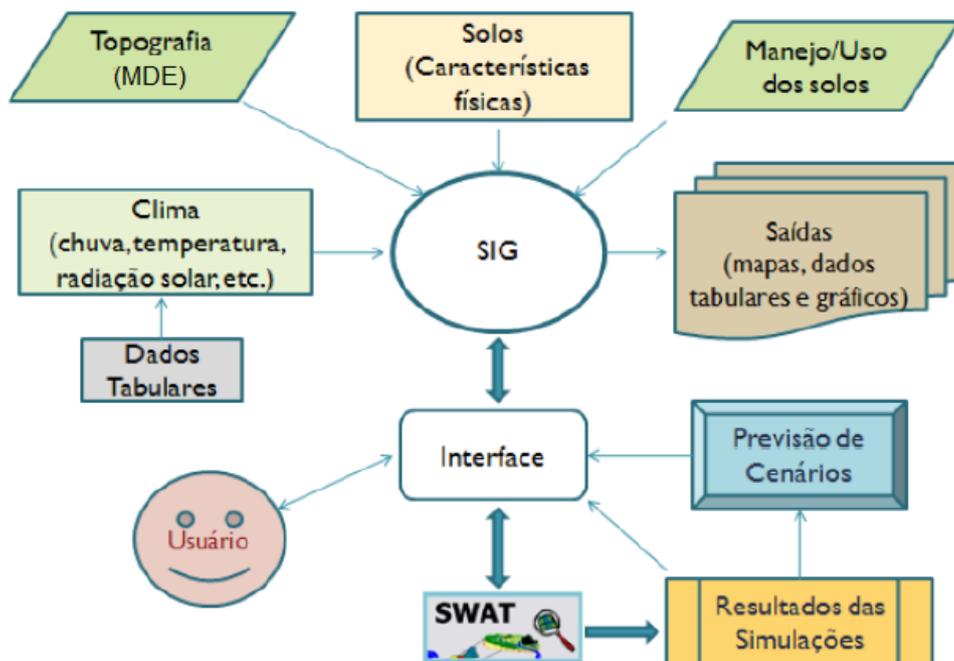
4.2. Banco de dados

Para a construção do banco de dados do SWAT, são necessárias as seguintes etapas:

- Inserção do *Modelo Digital de Elevação* – MDE e discretização da bacia hidrográfica;
- Geração das unidades de resposta hidrológica – HRU, de acordo com uso do solo, tipos de solo e declividade;
- Fornecimento dos dados climáticos para o início da modelagem.

O período de estudo foi de 1983 a 2011. O ano de início do período foi escolhido a partir da disponibilidade dos dados PERSIANN-CDR, ou seja, como o primeiro ano de dados do mesmo era 1983, escolheu-se esse para se obter a série mais longa possível. Já o ano de término, 2011, foi escolhido com base na série de vazão do posto fluviométrico Piancó, pois o mesmo só possui meses sem falhas até este ano. Logo, os dados foram obtidos de acordo com essa série temporal.

Figura 6 – Fluxograma dos processos de execução do modelo SWAT



Fonte: UZEIKA (2009).

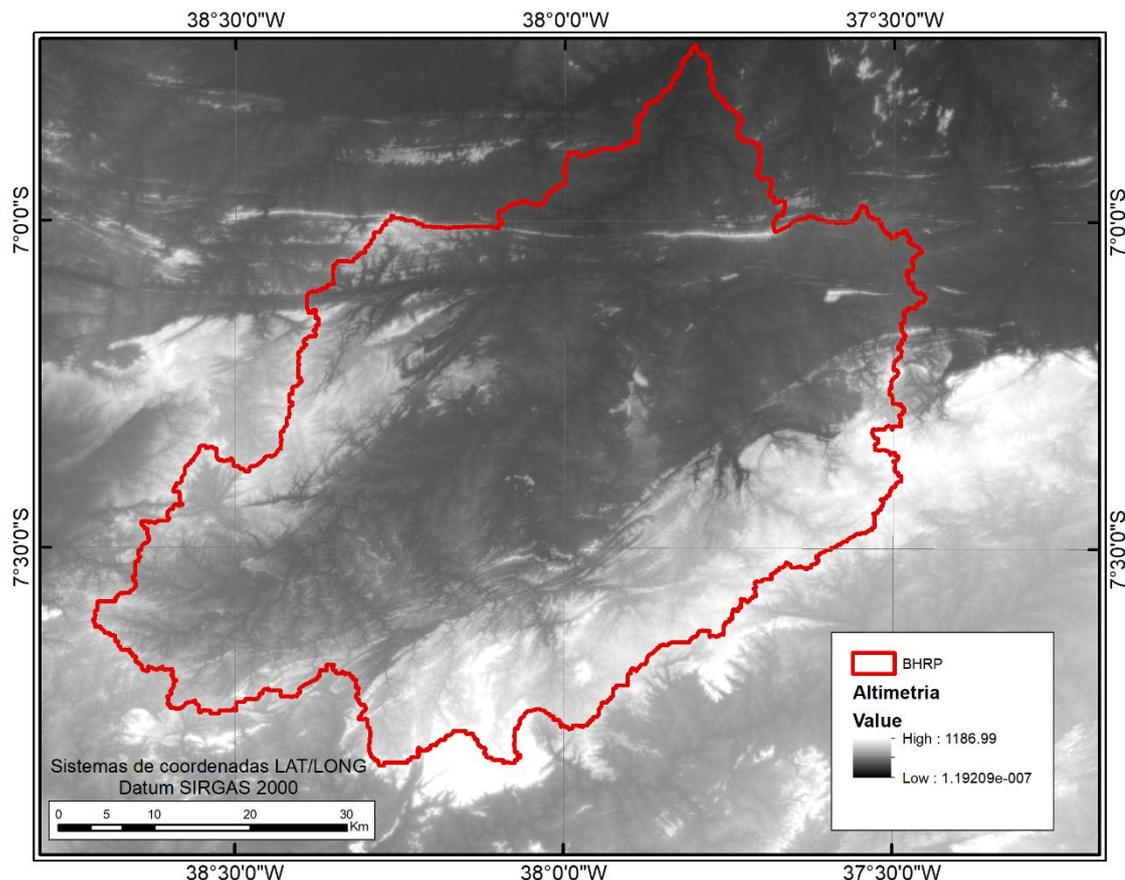
4.2.1. Discretização da bacia hidrográfica

Inicialmente, é necessário inserir o MDE para que o SWAT seja capaz de: indicar a direção do fluxo de escoamento superficial, bem como pontos de acumulação; gerar a rede hidrográfica da bacia; subdividir a bacia em sub-bacias, bem como indicar seus respectivos exutórios; delimitar a bacia hidrográfica, com base no ponto escolhido como exutório principal; e calcular os parâmetros topográficos, como declividade média, elevações e área, apresentando-os em formato de relatório para cada uma das sub-bacias. Também é possível indicar a existência de reservatórios de acumulação (açudes), mas como o intuito desse trabalho não previa o estudo das condicionantes causadas por estes, os açudes existentes não foram identificados na discretização da bacia, visto que essa consideração ocasionaria análises mais complexas das vazões simuladas. Logo, observa-se que o estudo considera o escoamento natural dos canais de drenagem, sem obstáculos e regularização de vazão.

O MDE para esse estudo (Fig.7) foi obtido através do portal do *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* – INPE, disponível pelo projeto TOPODATA que oferece o MDE com resolução de 30 metros e suas derivações locais básicas em cobertura nacional, elaborados a

partir dos dados *Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM, disponibilizados pelo *United States Geological Survey* – USGS na rede mundial de computadores (INPE, 2019).

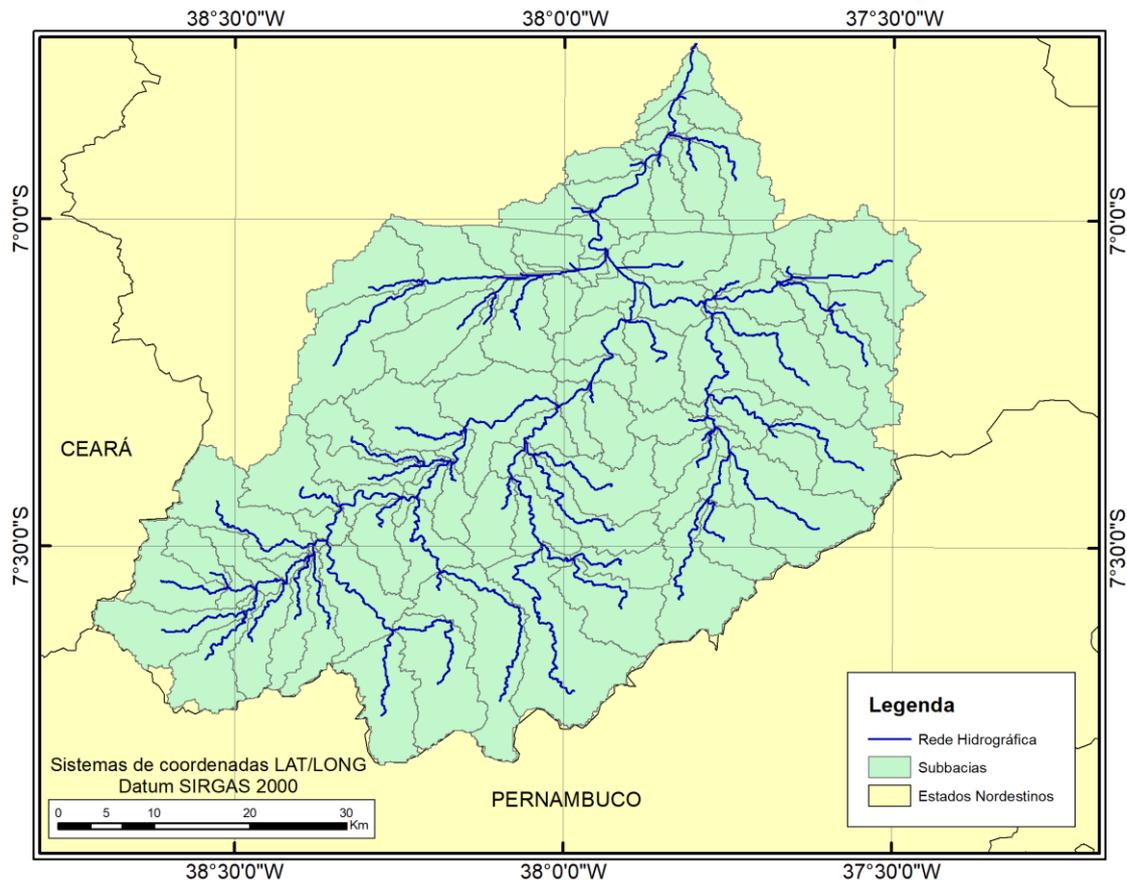
Figura 7 – Modelo digital de elevação utilizado na discretização da BHRP



Fonte: Autora (2019).

O SWAT divide, automaticamente, as bacias hidrográficas em sub-bacias ao se especificar uma área limite de drenagem, ou seja, uma área mínima necessária para originar um canal de fluxo. Assim, cada uma dessas subunidades associa-se a um curso de água ou canal de drenagem e a um exutório, que controla todos os fluxos daquela bacia. A delimitação das áreas limites de drenagem gera o detalhamento da rede de fluxo e define o tamanho e o número das sub-bacias criadas. A escolha do número de sub-bacias para o modelo depende do tamanho da bacia, do detalhamento espacial, da disponibilidade dos dados de entrada e da quantidade de detalhes requeridos para cumprir os objetivos do projeto (MACHADO, 2002). Nesse estudo, a área mínima de drenagem foi 5000 ha, gerando 110 sub-bacias (Fig.8).

Figura 8 – Rede de drenagem e sub-bacias geradas pelo ArcSWAT para a BHRP



Fonte: Autora (2019).

4.2.2. Geração das HRUs

As HRUs são determinadas com base no uso e ocupação do solo, no tipo do solo e na declividade, são importantes para avaliar as variações das condições hidrológicas entre as sub-bacias. O SWAT fornece duas opções de distribuição de HRUs para cada sub-bacia: uma HRU única, com tipo de solo e cobertura predominantes, ou HRUs múltiplas, caso em que cada uma corresponde a uma combinação de solo, cobertura e declividade. Isso é feito adotando-se um nível de sensibilidade que elimina as classes de uso, tipo do solo e declividade com área menor do que o valor arbitrado (LELIS, 2011). Nesse trabalho, o percentual mínimo de área escolhido foi 15%, ou seja, cada HRU tem uma área de no mínimo 15% da área total composta por determinado tipo de solo, uso e cobertura e declividade, totalizando 959 HRUs.

4.2.2.1. Uso e ocupação do solo

O conhecimento do uso e cobertura do solo tornou-se, cada vez mais, um importante fator na sociedade moderna devido à necessidade de garantir a sua sustentabilidade frente a questões ambientais, sociais e econômicas relacionadas com ele e que são motivo de debate sobre desenvolvimento sustentável. Tal conhecimento permite a criação de planos em diferentes níveis, a fim de superar os problemas que surgem com o desenvolvimento descontrolado, a deterioração da qualidade ambiental, a perda de terras agrícolas, a destruição de zonas úmidas importantes, e perda de espécies e habitat dos animais selvagens. Por esta razão, o conhecimento dos dados de cobertura e uso da terra são necessários para a análise dos processos e os problemas ambientais, a fim de tomar decisões (ROFFE, 2012).

O uso do solo na bacia do rio Piancó, nesse trabalho, foi identificado a partir de uma imagem de 18/06/1990 do satélite Landsat-5, sensor TM, órbita 215 e ponto 65, obtida no portal do INPE. Para a determinação foi utilizada a classificação supervisionada usando o método da máxima verossimilhança. Foi utilizada essa imagem de 1990 para todo o período de estudo, visto que as classes identificadas são representativas para a região.

As classes de uso e ocupação do solo na BHRP identificadas foram as seguintes: corpos hídricos, vegetação arbustiva, vegetação arbustiva/herbácea, vegetação arbórea/arbustiva e solo exposto (Tabela 1).

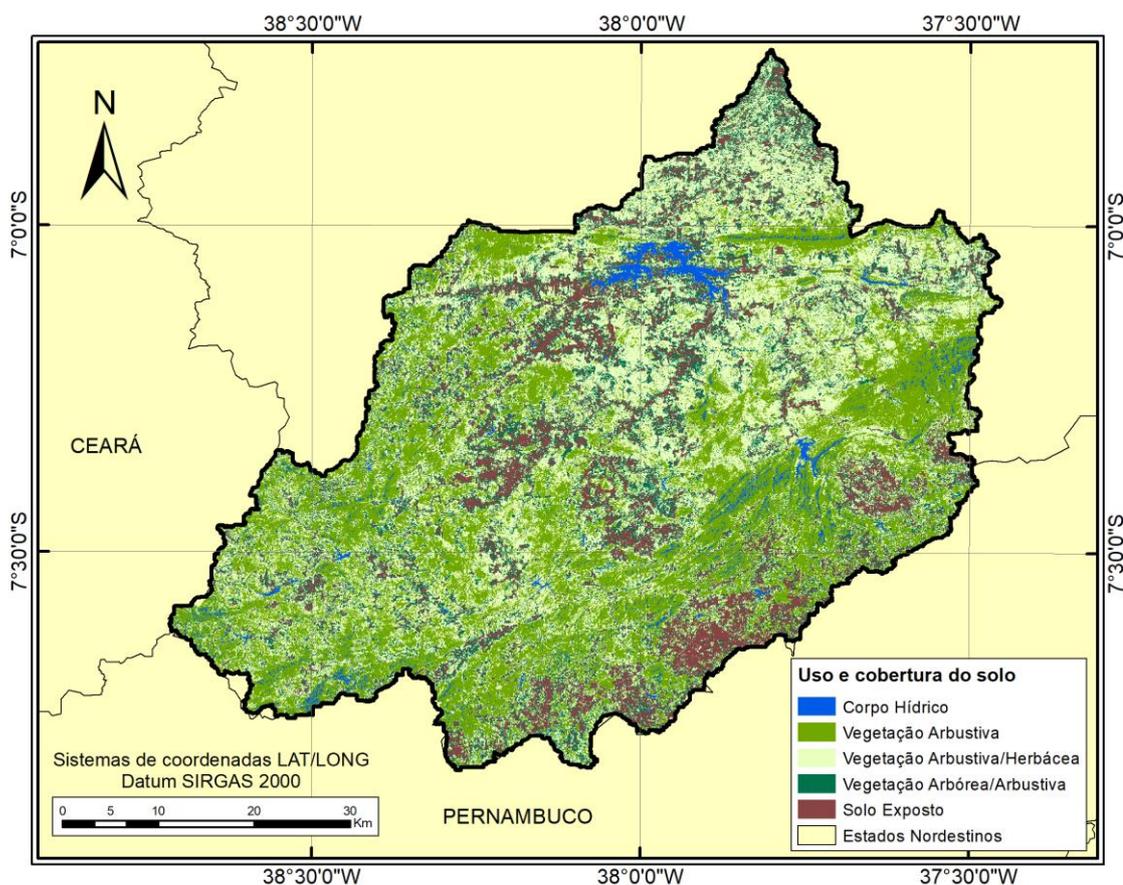
Tabela 1 – Classes de uso e ocupação do solo identificadas na BHRP e suas respectivas associações com o banco de dados do ArcSWAT

Classe identificada	Denominação utilizada no ArcSWAT	Área (%)
Corpos Hídricos	Water (WATR)	2,715
Vegetação arbustiva/herbácea	Range-Grass (RNGE)	36,456
Vegetação arbórea/arbustiva	Forrest-Mixed (FRST)	14,815
Vegetação arbustiva	Range-Brush (RNGB)	33,386
Solo exposto	Barren (BARR)	12,629

Fonte: Autora (2019).

Pode-se observar na figura abaixo (Fig.9) como estão espacializadas as diferentes coberturas do solo na BHRP.

Figura 9 – Distribuição espacial dos diferentes tipos de coberturas do solo na BHRP



Fonte: Autora (2019).

Logo, ao se realizar essa associação com base nos usos de solo preexistentes no banco de dados do ArcSWAT, foi realizada uma reclassificação da cobertura do solo com base nos parâmetros do SWAT correspondentes. Observa-se que esses parâmetros são intervenientes na dinâmica hidrossedimentológica da bacia, principalmente nos fenômenos de produção de sedimentos e escoamento superficial (LENHART, 2002).

4.2.2.2. Tipos de solo

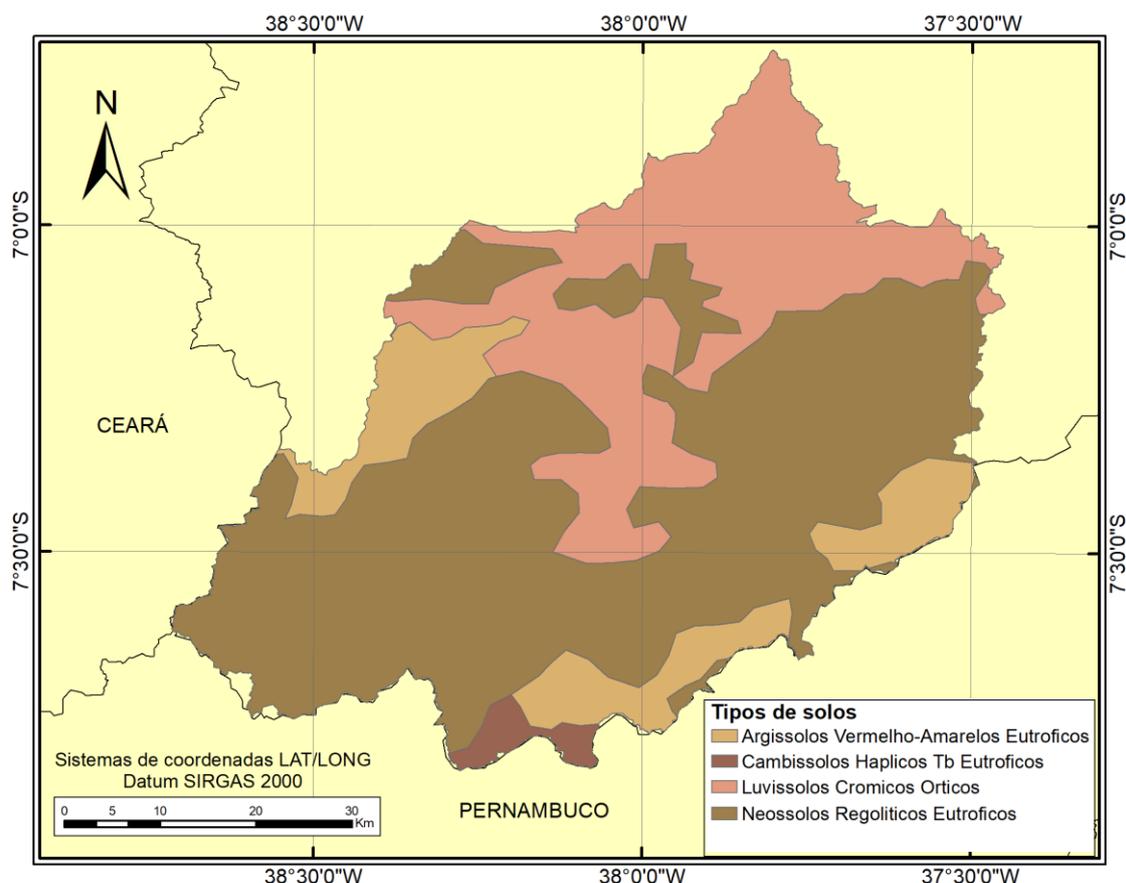
De acordo com a classificação de solos da EMBRAPA (2011), a BHRP possui quatro tipos de solos em sua área (Tabela 2). A Figura 10 mostra como se dá a distribuição dos mesmos na bacia.

Tabela 2 - Tipos e informações básicas dos solos existentes na BHRP

Tipos de solo	Área (km²)	Área (%)	Descrição
Argissolo	1063,62	11,67	Solos que apresentam acúmulo de argila em profundidade devido à mobilização e perda de argila da parte mais superficial do solo. Apresentam frequentemente baixa atividade da argila, podendo ser alíticos, distróficos ou eutróficos, sendo normalmente ácidos.
Cambissolo	129,91	1,434	São solos fortemente, até imperfeitamente, drenados, rasos a profundos, de cor bruna ou bruno-amarelada, e de alta a baixa saturação por bases e atividade química da fração coloidal.
Luvisso	2484,71	27,36	Solos minerais não hidromórficos, grande parte dos solos desta classe possui mudança textural abrupta. São moderadamente ácidos a ligeiramente alcalinos. Podem ou não apresentar pedregosidade na parte superficial e/ou caráter solódico ou sódico, na parte subsuperficial.
Neossolo Litólico	5415,08	59,54	Solos constituídos por material mineral ou por material orgânico pouco espesso, com insuficiência de manifestação dos atributos diagnósticos que caracterizam os diversos processos de formação dos solos. Podem ser eutróficos ou distróficos, apresentar acidez e altos teores de alumínio e de sódio. Variam de solos rasos até profundos e de baixa a alta permeabilidade.

Fonte: EMBRAPA (2019).

Figura 10 – Distribuição espacial dos diferentes tipos de solo na BHRP



Fonte: EMBRAPA (2011).

As informações necessárias para cada tipo de solo dizem respeito às características físico-hídricas, tais quais: grupo de saturação referente ao método da Curva-Número (HYDGRP), a profundidade da raiz (SOL_ZMX), porosidade (ANION_EXCL), profundidade da camada (SOL_Z), densidade aparente (SOL_BD), água disponível no solo (SOL_AWC), condutividade hidráulica saturada (SOL_K), erodibilidade (USLE_K), albedo (SOL_ALB), carbono orgânico (SOL_CBN) e percentagem de argila, silte, areia e seixo (CARVALHO NETO, 2011). Observa-se que, como não houve visita e coleta em campo, alguns dados dos solos foram obtidos junto a EMBRAPA pelo portal http://www.bdsolos.cnptia.embrapa.br/consulta_publica.html e outros em pesquisas que identificaram esses valores para os solos brasileiros como Rawls et al. (1982) e Tsvetsinskaya et al. (2002).

Os parâmetros que podem ser encontrados no banco de dados de solos da EMBRAPA são: número de horizontes do solo (NLAYERS), profundidade dos horizontes (SOL_Z),

profundidade máxima da raiz (SOL_ZMX), percentagens de areia (SAND), silte (SILT), argila (CLAY), cascalho (ROCK) e carbono orgânico (CBN).

De acordo com NRCS (2009), foi possível obter o grupo hidrológico ao qual cada tipo de solo pertence. Nessa classificação, os solos podem ser caracterizados como pertencentes a quatro classes distintas, sendo A, B, C ou D, de acordo com o valor de condutividade hidráulica. Em que o grupo A é constituído de solos com baixo potencial de escoamento e o grupo D de solos com alto potencial de escoamento.

Para a determinação tanto da condutividade hidráulica (SOL_K), quanto da porosidade (ANION_EXCL), foram utilizados os valores propostos por Rawls et al. (1982) que são estabelecidos para os solos de diferentes texturas, sendo definidos os valores para 11 classes texturais no total: arenoso, argilo-siltoso, argilo-arenoso, argiloso, siltoso etc.

Conforme o estudo de Tsvetsinskaya et al. (2002), foram determinados os valores de albedo (SOL_ALB) para as diferentes classificações de solos: cambissolo, argissolo, luvisolo etc., com o auxílio do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* – MODIS, classificando os solos de acordo com as categorias de albedo no solo: baixa, moderada, alta e muito alta.

Para determinar a capacidade de água disponível no solo (SOL_AWC), utilizou-se como base os estudos realizados por Salter e Williams (1967;1969) no qual foram analisados vinte e seis solos de diferentes texturas, para que com a utilização de equações de regressão e observação do comportamento dos solos, fossem determinados os valores da capacidade de água disponível para cada uma das classes texturais analisadas.

O software *Soil Water Characteristics Hydraulic Properties Calculator* desenvolvido por Saxton e Rawls (2006) e disponível para download em: <https://hrsl.ba.ars.usda.gov/soilwater/Index.htm>, foi utilizado para que fosse determinado o parâmetro SOL_BD referente à densidade aparente do solo. Os dados necessários para essa determinação são: textura do solo, salinidade, grau de compactação, presença de matéria orgânica e cascalho no solo.

O fator de erodibilidade foi determinado de acordo com a equação proposta por Williams (1975) e tem seu valor calculado com base no percentual de areia, silte, argila e carbono orgânico presente no solo.

Para a determinação da condutividade elétrica do solo (SOL_EC), os valores foram baseados em outras pesquisas realizadas em campo. Na obtenção dos valores do Cambissolo, Neossolo e Luvisolo, foi utilizada a de Paes et al. (2013). Já para a obtenção dos valores do Argissolo, foi utilizada como base a pesquisa feita por Nazário et al. (2007).

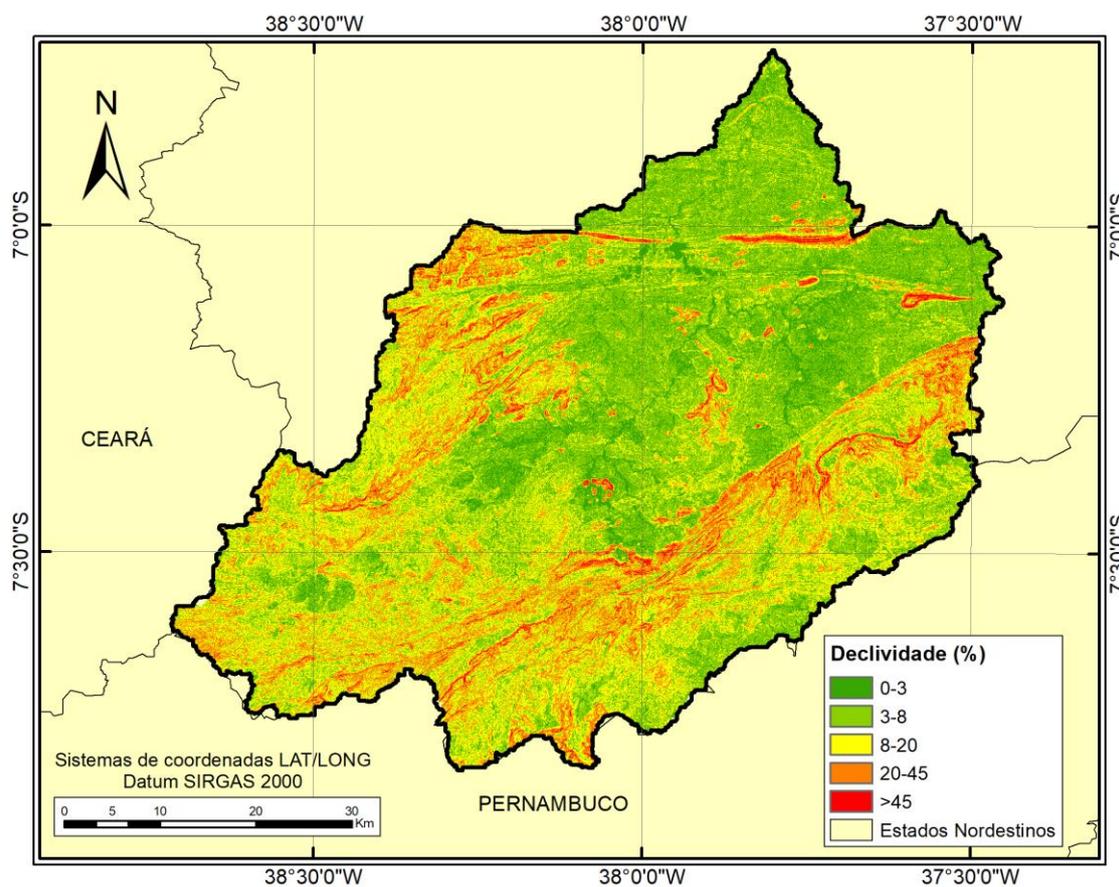
O parâmetro relacionado à fração de fissuras no solo (SOL_CRK) não foi encontrado na literatura, portanto, utilizou-se o valor *default* do ArcSWAT.

De acordo com os dados obtidos, foi construído o banco de dados de solos para a modelagem. Os valores utilizados no mesmo podem ser encontrados no Apêndice A.

4.2.2.3. Declividade

Em relação à declividade, foram utilizadas as classes de declividade propostas pela EMBRAPA (1979), onde o terreno foi subdividido em 5 classes (Fig. 11) de acordo com o modelo digital de elevação obtido para a BHRP.

Figura 11 – Distribuição espacial das classes de declividade na BHRP



Fonte: Autora (2019).

4.2.3. Gerador Climático

Após a discretização da bacia e geração das HRUs, é necessário criar o gerador climático para que seja realizada a simulação do modelo. Essa parte do banco de dados engloba as informações de precipitação, temperatura, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar global. Porém, observa-se que apenas os dados de precipitação foram obtidos em escala diária, logo, o SWAT precisou estimar esses valores com base nas médias mensais dos demais parâmetros.

Observa-se que, para que o objetivo principal desse trabalho fosse atingido, ou seja, fosse comparado o desempenho da modelagem com dados de pluviômetros e dados estimados PERSIANN-CDR, após calibração e validação do modelo, o mesmo sofreu alteração no arquivo de precipitação, logo o modelo foi simulado duas vezes, uma com a precipitação observada dos pluviômetros e outra com a precipitação estimada PERSIANN-CDR.

Os dados dos pluviômetros foram provenientes da *Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba – AESA*, *Agência Nacional de Águas – ANA* e *Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE*. No total, foram utilizados 16 postos pluviométricos com dados de 1983 a 2011 (Tab.3), os mesmos encontram-se bem espacializados na bacia, como pode ser observado na Figura 12. Ressalta-se que não foram utilizados mais postos pluviométricos, devido à escassez de dados para o período de estudo proposto.

Tabela 3 – Postos pluviométricos utilizados nesse estudo

Posto	Código	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Responsável
Água Branca	737022	-7,51	-37,64	710,00	AESA
Aguiar	738025	-7,09	-38,17	280,00	DNOCS
Boa Ventura	738012	-7,42	-38,22	300,00	SUDENE
Bonito De Santa Fé	738021	-7,31	-38,51	575,00	SUDENE
Conceição	738020	-7,56	-38,50	370,00	DNOCS
Ibiara	738018	-7,51	-38,41	330,00	SUDENE
Imaculada	737017	-7,38	-37,51	750,00	DNOCS

Posto	Código	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Responsável
Itaporanga	738017	-7,30	-38,15	230,00	DNOCS
Juru	737016	-7,55	-37,81	470,00	SUDENE
Manaira	738015	-7,71	-38,15	605,00	DNOCS
Nova Olinda	738014	-7,48	-38,04	315,00	DNOCS
Olho D'água	737011	-7,23	-37,75	275,00	DNOCS
Piancó	737006	-7,22	-37,93	250,00	ANA
Princesa Isabel	738013	-7,73	-37,99	660,00	DNOCS
Santana dos Garrotes	738019	-7,38	-37,99	305,00	SUDENE
Serra Grande	738010	-7,21	-38,37	585,00	DNOCS

Fonte: AESA (2018), ANA (2018) e SUDENE (2018).

Figura 12 – Distribuição espacial dos postos pluviométricos utilizados nesse estudo



Fonte: AESA (2018), ANA (2018) e SUDENE (2018).

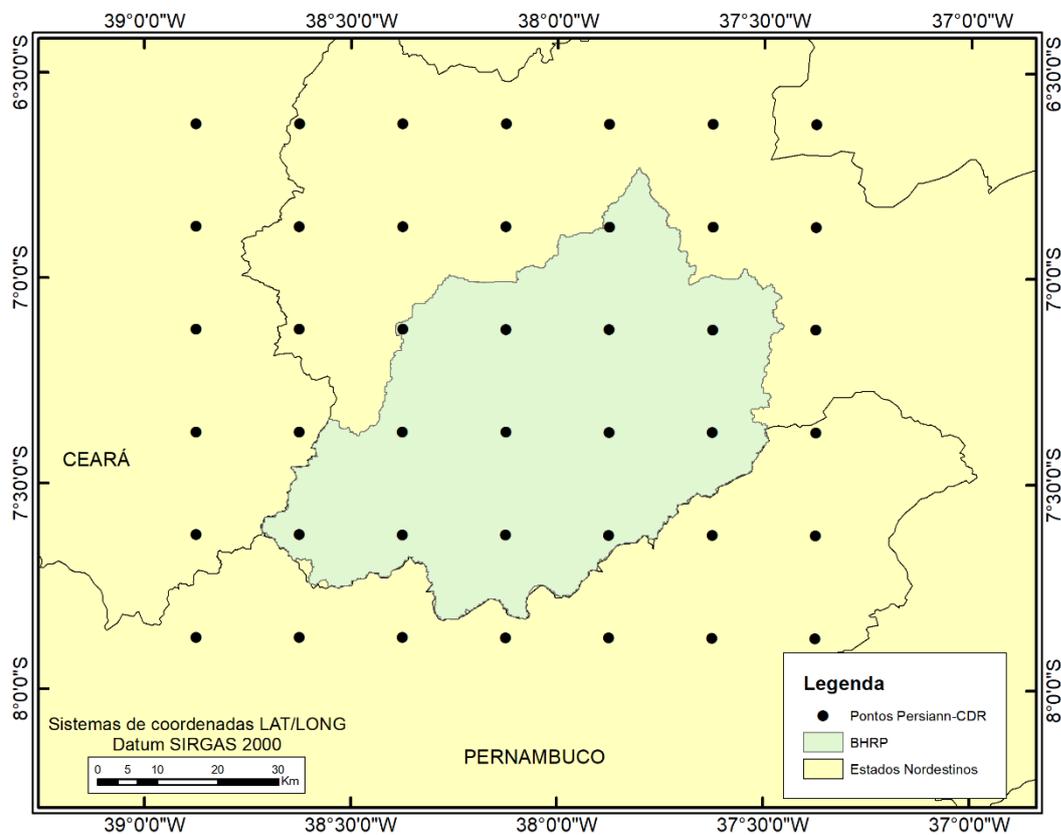
Em relação aos dados pluviométricos do PERSIANN-CDR, foram obtidos, como mencionado, através do site do Programa NCDC NOCD CDR sob a categoria CDRs Atmosféricos. Na BHRP, estão presentes 42 quadrículas do PERSIANN-CDR, as localizações dos centróides estão listadas abaixo (Tab.4), bem como sua espacialização (Fig.13). Observa-se que para fins de modelagem, é necessário informar a altitude dos pontos de precipitação, logo foi utilizada a função *zonal statistics as table* e obteve-se, com o auxílio do DEM, a altitude média da quadrícula.

Tabela 4 – Coordenadas dos centróides PERSIANN-CDR utilizadas na BHRP

Ponto	Longitude (°)	Latitude (°)	Altitude (m)
1	-38,875	-6,625	268,992
2	-38,625	-6,625	328,942
3	-38,375	-6,625	310,628
4	-38,125	-6,625	309,327
5	-37,875	-6,625	305,355
6	-37,625	-6,625	214,896
7	-37,375	-6,625	214,105
8	-38,875	-6,875	310,261
9	-38,625	-6,875	325,602
10	-38,375	-6,875	290,743
11	-38,125	-6,875	260,532
12	-37,875	-6,875	226,27
13	-37,625	-6,875	266,193
14	-37,375	-6,875	246,294
15	-38,875	-7,125	378,573
16	-38,625	-7,125	486,884
17	-38,375	-7,125	465,646
18	-38,125	-7,125	337,511
19	-37,875	-7,125	283,01
20	-37,625	-7,125	339,875
21	-37,375	-7,125	370,123
22	-38,875	-7,375	390,548
23	-38,625	-7,375	550,997
24	-38,375	-7,375	513,606
25	-38,125	-7,375	326,209
26	-37,875	-7,375	397,703
27	-37,625	-7,375	610,032

Ponto	Longitude (°)	Latitude (°)	Altitude (m)
28	-37,375	-7,375	725,434
29	-38,875	-7,625	484,123
30	-38,625	-7,625	542,977
31	-38,375	-7,625	483,8
32	-38,125	-7,625	573,744
33	-37,875	-7,625	666,864
34	-37,625	-7,625	629,645
35	-37,375	-7,625	587,782
36	-38,875	-7,875	540,22
37	-38,625	-7,875	550,529
38	-38,375	-7,875	530,405
39	-38,125	-7,875	677,367
40	-37,875	-7,875	547,74
41	-37,625	-7,875	624,241
42	-37,375	-7,875	640,61

Figura 13 – Distribuição espacial dos centróides do satélite PERSIANN-CDR presentes na BHRP



Fonte: CHRIS (2019).

Tanto nos postos pluviométricos quanto no PERSIANN-CDR foram encontradas falhas, os percentuais são, respectivamente, 12,22% e 1,33% de falhas.

As falhas dos postos pluviométricos foram preenchidas de acordo com o método da ponderação regional. Esse método consiste em utilizar a média de três postos adjacentes ao posto com falha, desde que os mesmos tenham características climáticas semelhantes e uma série de pelo menos dez anos. Desse modo, o valor da precipitação utilizado no preenchimento é:

$$P_x = \frac{1}{3} \left(\frac{M_x}{M_a} P_a + \frac{M_x}{M_b} P_b + \frac{M_x}{M_c} P_c \right) \quad (\text{Eq.4})$$

P_x = Variável correspondente à falha preenchida;

M_x = Média aritmética do posto com falha;

M_a, M_b e M_c = Média aritmética dos postos utilizados para o preenchimento;

P_a, P_b e P_c = Precipitação dos postos utilizados para o preenchimento na mesma data em que houve a falha.

Já em relação ao PERSIANN-CDR, como no dia em que ocorreu falha em um ponto, também ocorreu em todos os outros, o preenchimento da falha foi realizado da seguinte maneira:

$$P_x = \frac{1}{2} (P_{x-1} + P_{x+1}) \quad (\text{Eq. 5})$$

P_x = Variável correspondente à falha preenchida;

P_{x-1} = Precipitação do dia anterior para o ponto que está sendo preenchido;

P_{x+1} = Precipitação do dia posterior para o ponto que está sendo preenchido.

Em relação aos dados de vazão, utilizou-se apenas as médias mensais do posto fluviométrico Piancó, pois os demais presentes na área de estudo possuíam uma série bastante falha, de modo a não se tornarem satisfatórios para o período de estudo. O posto Piancó (código 37340000), está localizado na latitude $-7,20^\circ$ e longitude $-37,93^\circ$, estando numa altitude de 249,00m. Foram utilizadas duas séries do posto, 1983 – 1987 e 2003-2011. Ressalta-se que o período 1988-2002 foi desconsiderado por não apresentar continuidade de dados. Esses dados foram obtidos através do HIDROWEB, portal digital da ANA.

Como não existem observações diárias para os demais dados climáticos, foram utilizados os disponíveis na plataforma digital do *Instituto Nacional de Meteorologia – INMET*, através do *Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa – BDMEP*, da estação meteorológica São Gonçalo. Na Tabela 5, são mostradas as definições de cada um dos parâmetros do gerador climático (WGEN).

Tabela 5 – Definição dos parâmetros utilizados no gerador climático do ArcSWAT

Parâmetro	Definição
TMPMX	Médias das temperaturas máximas diárias de cada mês
TMPMN	Média das temperaturas mínimas diárias de cada mês
TMPSTDMX	Desvio padrão para temperaturas máximas diárias de cada mês
TMPSTDMN	Desvio padrão para temperaturas mínimas diárias de cada mês
PCPMM	Média mensal da precipitação total
PCPSTD	Desvio padrão para a precipitação diária do mês
PCPSKW	Coefficiente de assimetria para a precipitação diária de cada mês
PR_W1	Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos no mês
PR_W2	Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos no mês
PCPD	Número de dias com precipitação no mês
RAINHHMX	Precipitação máxima para meia hora de chuva em todo o período de registro no mês
SOLARAV	Média da radiação solar diária para cada mês
DEWPT	Média das temperaturas diárias de ponto de orvalho a cada mês
WNDVAV	Média da velocidade diária do vento para cada mês

Fonte: Carvalho Neto (2011).

O parâmetro DEWPT foi calculado com o auxílio do programa desenvolvido por Liersch (2003a), disponível em: <http://www.ufz.de/index.php?en=15863>. Este utiliza como dados de entrada médias mensais de precipitação e umidade relativa do ar. Os parâmetros PCPSKW, PR_W1, PR_W2 e PCPD foram obtidos com base no programa desenvolvido por Liersch (2003b) denominado “pcpstat” e disponível em: <http://www.ufz.de/index.php?en=15863>. Por fim, o RAINHHMX foi definido de acordo com o

método proposto por Oliveira et al. (2000), onde a precipitação máxima é multiplicada por um fator de desagregação (nesse caso, 1/3).

Os valores utilizados no gerador climático podem ser observados no Apêndice B.

Logo, ao fim desta etapa, o modelo encontra-se apto para realizar a simulação do ciclo hidrológico e fornecer os valores de vazão necessários para que seja concluído o objetivo dessa pesquisa. Porém, é usual que a simulação não forneça valores satisfatórios, então realiza-se a calibração do modelo para que os parâmetros sejam otimizados e o modelo seja representativo.

4.3. Análise de desempenho do modelo

Para que o desempenho do modelo fosse quantificado, foram realizados testes estatísticos, sendo estes os seguintes: (a) Coeficiente de Determinação (R^2) e (b) Coeficiente de Eficiência (COE) (Nash e Sutcliffe, 1970).

O R^2 determina a relação linear entre duas variáveis. Neste caso, serve como uma medida da qualidade do ajuste entre ambas, ou seja, o quanto o modelo foi capaz de explicar os dados observados. Varia de 0 a 1, onde 1 corresponde ao ajuste perfeito e é calculado como mostrado a seguir (Eq.6):

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m) - (x_i - x_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)(x_i - x_m)^2}} \right)^2 \quad (Eq. 6)$$

Dentre os índices estatísticos mais utilizados para análise de desempenho de modelos hidrológicos está o COE (Eq.7). Este varia de $-\infty$ a 1, onde 1 corresponde ao perfeito ajuste entre dados observados e estimados, já valores menores que 0 correspondem a situações em que a média dos dados observados é uma predição melhor do que as estimativas do modelo.

$$COE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2} \right) \quad (Eq. 7)$$

4.4. Análise dos dados de precipitação PERSIANN-CDR

Além dos coeficientes supracitados (R^2 e COE), para a análise comparativa entre os dados de precipitação observada e estimada PERSIANN-CDR, também foram utilizados: (c) Coeficiente de Correlação (R), (d) Bias, (e) Índice de Concordância proposto por Willmott et al. (1985) (d) e (f) Raiz quadrada do erro médio (RMSE).

O R (Eq.8) mede o grau de correlação entre duas variáveis, variando de -1 a 1. O valor sendo igual a 1, significa que as variáveis são diretamente proporcionais, ou seja, quando o valor de uma cresce, a outra também tem esse comportamento. O oposto ocorre quando o valor é -1, ou seja, as variáveis são inversamente proporcionais. Como esse índice não está relacionado diretamente à magnitude dos valores, está apenas ligado ao comportamento, costuma-se adotá-lo em conjunto com outros índices para melhor quantificar o desempenho.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)(x_i - x_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2}} \quad (Eq. 8)$$

O Bias (Eq.9) é um índice estatístico capaz de informar se os dados observados estão sendo subestimados ou superestimados em relação à predição, neste caso, ao PERSIANN-CDR. Observa-se que quando o valor é negativo, ocorre subestimação. O oposto ocorre quando o valor é positivo. Quanto mais próximo de 0, mais similares são as variáveis estudadas.

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_m - x_i) \quad (Eq. 9)$$

O índice de concordância (Eq.10) exprime o grau em que os dados observados se aproximam dos estimados, variando de 0 a 1, onde 0 se constitui em nenhuma concordância e 1 é o grau máximo de ajustamento.

$$d = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - x_m| + |x_i - x_m|)^2} \right) \quad (Eq. 10)$$

Por fim, o RMSE (Eq.11) representa a raiz do erro médio quadrático da diferença entre o valor estimado e o valor observado, neste estudo, dados do PERSIANN-CDR e pluviômetros, respectivamente. Este valor possui a mesma unidade que as variáveis em estudo, no caso da

precipitação, milímetros. Logo, observa-se que, quanto mais perto de 0, menores são os erros entre as variáveis.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (Eq. 11)$$

Onde:

n = número de eventos;

y_i = valor estimado pelo modelo SWAT ou pelo PERSIANN-CDR;

ym = média dos valores estimados pelo modelo SWAT ou pelo PERSIANN-CDR;

x_i = valor observado;

xm = média dos valores observados.

De acordo com Moriasi et al. (2007), foi realizada a classificação do desempenho da modelagem hidrológica (Tab.6), a partir dos valores obtidos de R^2 e COE, com categorias que variam de insatisfatória a muito boa.

Tabela 6 – Classificação da eficiência da modelagem hidrológica a partir da análise dos valores de R^2 e COE

Classificação	R^2	COE
Muito boa	$0,80 < R^2 \leq 1$	$0,75 < COE \leq 1$
Boa	$0,70 < R^2 \leq 0,80$	$0,65 < COE \leq 0,75$
Satisfatória	$0,60 < R^2 \leq 0,70$	$0,50 < COE \leq 0,65$
Insatisfatória	$R^2 \leq 0,60$	$COE \leq 0,50$

4.5. Calibração e validação do modelo SWAT

Neste trabalho, foram realizadas duas calibrações, uma com os dados de precipitação provenientes de pluviômetros e outra com a estimada do PERSIANN-CDR, visto que os resultados obtidos apenas com a simulação usualmente não são satisfatórios. Além disso, optou-se também por simular a vazão da BHRP inserindo os parâmetros ajustados da calibração com dados observados e utilizando a chuva estimada em estudo. Em todos os casos, as vazões geradas pelo modelo que são utilizadas para análise comparativa são sempre as da sub-bacia 46, por ser esta a que possui o posto fluviométrico Piancó como exutório. O período de

calibração foi de 2003-2011 e o de validação de 1983-1987. Destaca-se que esses períodos, apesar de distantes temporalmente, são satisfatórios para análise da modelagem por apresentarem hidrogramas com comportamentos semelhantes e valores próximos.

A calibração foi realizada utilizando o software de domínio público *SWAT Calibration and Uncertainty Programs* – SWAT-CUP (Abbaspour et al., 2007) com o auxílio do algoritmo *Sequential Uncertainty Fitting* – SUFI-2, que consiste em um método de autocalibração desenvolvido por Abbaspour et al. (2007). Na calibração, além de se verificar quais os valores dos parâmetros que melhor se ajustam para a realidade da bacia, também é possível identificar quais entre os utilizados são mais sensíveis, ou seja, mais influentes.

Cada execução do programa foi ajustada para realizar 300 iterações, onde a cada iteração o *software* modifica os valores dos parâmetros de modo que seja alcançado um bom ajuste entre o valor simulado e o observado. Ao final, tem-se os valores otimizados dos parâmetros adotados, os valores referentes à melhor simulação, os índices estatísticos de desempenho e o número da iteração que apresentou o melhor ajuste.

O SUFI-2 é um dos cinco algoritmos disponibilizados nesse pacote (SWAT-CUP) cuja finalidade é realizar a análise de sensibilidade, a calibração multi-paramétrica (multi-critério) e a análise de incerteza. Assim, o SUFI-2 é capaz de analisar simultaneamente um grande número de parâmetros que norteiam os processos de simulações do SWAT, buscando-se o melhor resultado final através de inúmeros arranjos dos parâmetros, variando-se dentro do intervalo permitido pelo modelo SWAT, e ainda, combinando todos parâmetros entre si (ROCHA, 2013).

Neste estudo, foram utilizados 19 parâmetros (Tab.7), os quais, segundo Santos (2015) e Dantas (2016), são bem representativos das bacias do Nordeste brasileiro. Estes parâmetros podem ser alterados no banco de dados de três formas: substituição, adição e multiplicação.

Tabela 7 – Parâmetros utilizados na calibração do modelo

Parâmetro	Descrição	Intervalo	Método de alteração
Alpha_Bf	Fator de recessão de escoamento de base (dias)	0 – 1	r
Biomix	Eficiência da mistura biológica do solo (adimensional)	0 – 1	r

Parâmetro	Descrição	Intervalo	Método de alteração
Canmx	Quantidade máxima de água interceptada pela vegetação (mm)	0 – 100	r
Cn2	Valor da curva número para a condição de solo úmido (adimensional)	-1 – 1	v
Ch_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal (mm/h)	-0,01 – 500	r
Ch_N2	Coefficiente de Manning do canal (adimensional)	-0,01 – 0,3	r
Epc0	Coefficiente de compensação da absorção de água pelas plantas (adimensional)	0 – 1	r
Esco	Coefficiente de compensação da evaporação de água no solo (adimensional)	0 – 1	r
Gw_delay	Tempo de recarga do aquífero (dias)	0 – 500	a
Gw_revap	Coefficiente de controle do fluxo da água entre as zonas saturada e não saturada (adimensional)	0,02 – 0,2	r
Gw_qmn	Profundidade da água subterrânea necessária para ocorrer fluxo de retorno (mm)	0 – 5000	r
Rchrg_Dp	Fração de água percolada para o aquífero profundo (fração)	-1 – 1	v
Revapmn	Limite de água no solo para que ocorra ascensão capilar na zona saturada (mm)	0 – 500	r
Slsbbsn	Comprimento da declividade média (m)	-1 – 1	v
Sol_Alb	Albedo do solo (adimensional)	-1 – 1	v
Sol_Awc	Capacidade de armazenamento de água no solo (mm/mm)	-1 – 1	v
Sol_K	Condutividade hidráulica saturada do solo (mm/h)	-1 – 1	v
Sol_Z	Profundidade da camada de solo (mm)	-1 – 1	v
Surlag	Tempo de retardo do escoamento superficial (dias)	0,05 – 24	r

Substituição (r): substitui o valor default do modelo pelo valor otimizado; Adição (a): Adiciona o valor obtido no SWAT-CUP ao valor default do SWAT; Multiplicação (v): Multiplica o valor default do SWAT pelo resultado da soma (1 + valor obtido pelo SWAT-CUP)

Por fim, os parâmetros otimizados pelo SWAT-CUP são inseridos no ArcSWAT, de modo que possa ser realizada a validação da modelagem. Logo, o comportamento dos hidrogramas simulado e observado são analisados e sua semelhança é quantificada estatisticamente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Análise da variabilidade espaço-temporal dos dados de precipitação observados e PERSIANN – CDR entre os anos de 1983 a 2011 na BHRP

Inicialmente, para verificar a viabilidade do uso de dados de precipitação PERSIANN–CDR na modelagem hidrológica, foram estudadas as semelhanças e discordâncias entre as séries de precipitação estimada e observada. Para melhor compreensão, estas foram analisadas em escalas diária, mensal e anual. Ressalta-se que a análise foi de 1983 a 2011, pois estes anos englobam os períodos de calibração (2003-2011) e validação (1983-1987).

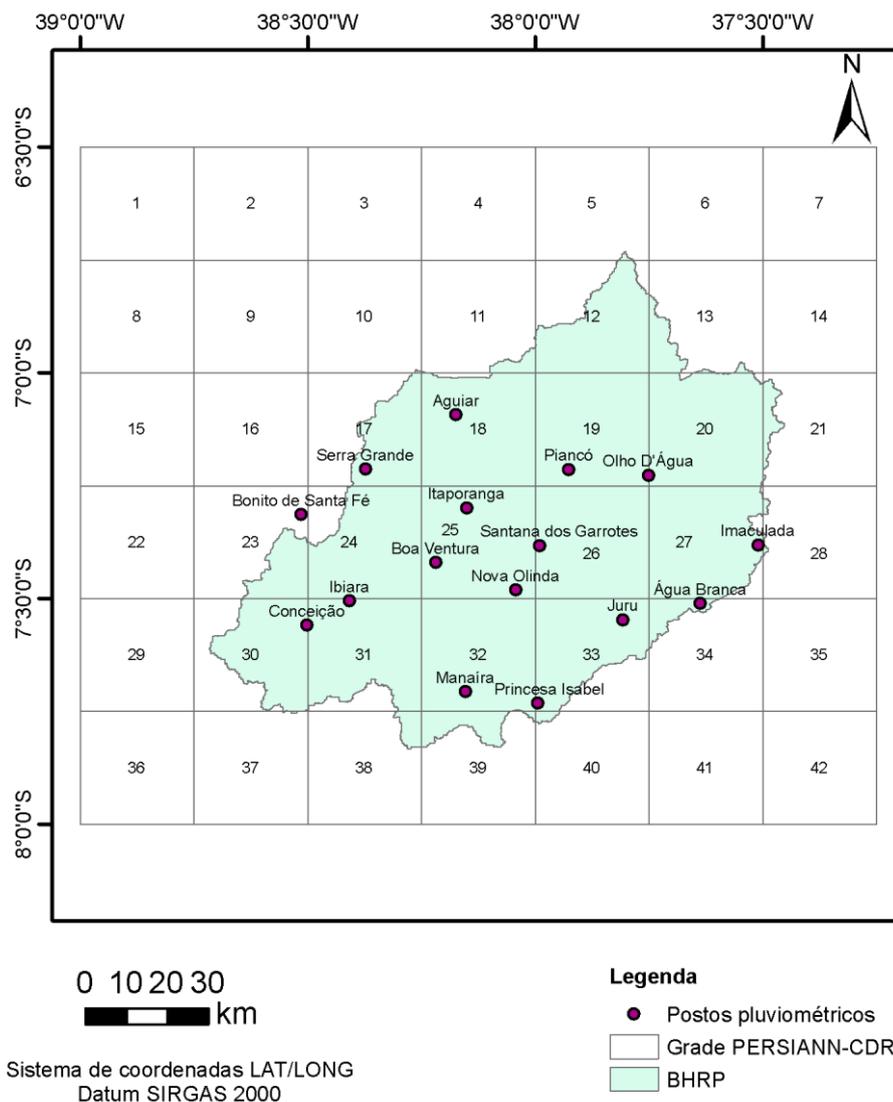
Cada posto pluviométrico teve sua série comparada com o centróide do PERSIANN–CDR mais próximo. Optou-se por realizar a comparação dessa forma por razão da variabilidade espacial da precipitação ser considerável na bacia, não tornando representativa uma comparação dos pluviômetros com uma média dos pontos PERSIANN–CDR.

Tabela 8 – Pontos PERSIANN–CDR utilizados para comparação das séries de precipitação entre 1983–2011

Posto	Ponto PERSIANN–CDR mais próximo
Água Branca	34
Aguiar	18
Boa Ventura	25
Bonito De Santa Fé	23
Conceição	30
Garrotes	26
Ibiara	31
Imaculada	27
Itaporanga	25
Juru	33
Manaira	32
Nova Olinda	25
Olho d'água	19
Piancó	19
Princesa Isabel	33
Serra Grande	17

Na Figura 14, pode-se observar a localização dos postos pluviométricos em relação à grade do PERSIANN-CDR:

Figura 14 – Espacialização dos postos pluviométricos em relação à grade PERSIANN-CDR



Fonte: AESA (2019); ANA (2019); CHRS (2019); SUDENE (2019).

5.1.1. Análise espaço-temporal das séries de precipitação em escala diária

Em relação à análise em escala diária, observou-se o desempenho dos índices estatísticos e como os mesmos encontram-se dispostos na BHRP. Torna-se importante essa

análise, pois os dados que alimentaram o modelo SWAT foram fornecidos em escala diária. O comportamento dos índices pode ser observado na tabela 9.

Tabela 9 – Análise estatística da precipitação observada e PERSIANN–CDR em escala diária entre 1983–2011

Posto	d	R²	BIAS	R	COE	RMSE
Água Branca	0,637	0,176	0,292	0,419	0,011	8,116
Aguiar	0,624	0,184	-0,005	0,429	0,124	9,115
Boa Ventura	0,666	0,232	0,168	0,482	0,191	8,329
Bonito De Santa Fé	0,631	0,207	-0,171	0,455	0,178	8,684
Conceição	0,670	0,241	-0,001	0,491	0,206	7,395
Garrotes	0,702	0,253	0,307	0,503	0,184	7,994
Ibiara	0,649	0,206	0,231	0,454	0,134	7,778
Imaculada	0,644	0,181	0,818	0,426	-0,079	7,724
Itaporanga	0,661	0,248	-0,232	0,498	0,233	8,936
Juru	0,644	0,186	0,453	0,431	0,024	8,052
Manaíra	0,642	0,190	0,373	0,436	0,073	8,071
Nova Olinda	0,663	0,226	0,127	0,475	0,181	8,472
Olho d'água	0,664	0,243	-0,390	0,493	0,223	9,288
Piarcó	0,678	0,234	0,410	0,484	0,158	8,244
Princesa Isabel	0,619	0,169	0,163	0,411	0,058	8,890
Serra Grande	0,599	0,167	0,525	0,409	0,089	9,096

Ao analisar a tabela 9, pode-se observar que os índices estatísticos indicam que os dados estimados e observados não apresentaram comportamentos similares em escala diária, sendo os valores médios de R, R² e COE, respectivamente, 0,46, 0,21 e 0,12. A similaridade entre as duas séries de dados pode ser observada a partir dos índices R e R², os quais apresentaram, respectivamente, valores baixos de 0,41 – 0,50 e 0,17–0,25. Em geral, as séries observadas foram superestimadas pelo PERSIANN–CDR, dos 16 postos analisados, em apenas 5 foram observadas subestimativas, ou seja, valores negativos do índice BIAS. O índice de concordância entre as duas séries obteve um valor médio de 0,65. Segundo Moriasi et al. (2007), todos os postos obtiveram desempenho insatisfatório em relação ao COE. Os valores do RMSE se mantiveram numa faixa de valores muito próximas, entre 7,39 – 9,29 mm, sendo um valor relativamente alto, visto que é uma escala diária e uma região do semiárido

nordestino. Percebe-se que o posto Conceição foi o que obteve os melhores índices estatísticos para a escala diária, com $R = 0,49$, $R^2 = 0,24$ e $RMSE = 7,39$ mm.

5.1.2. Análise espaço-temporal das séries de precipitação em escala mensal

A tabela 10 apresenta as médias mensais e os desvios-padrão das séries de precipitação observada e PERSIANN-CDR. Pode-se perceber que o período de janeiro a abril se configura como o período chuvoso da BHRP, correspondendo a, aproximadamente, 75% do total de precipitação anual para ambas as séries, sendo os demais meses o período seco. As médias mensais das duas séries apresentaram pouca diferença, $-0,77 - 6,41$ mm, sendo mais expressiva apenas nos meses de fevereiro, abril, maio e junho, com diferença nas médias de $10,74 - 23,76$ mm.

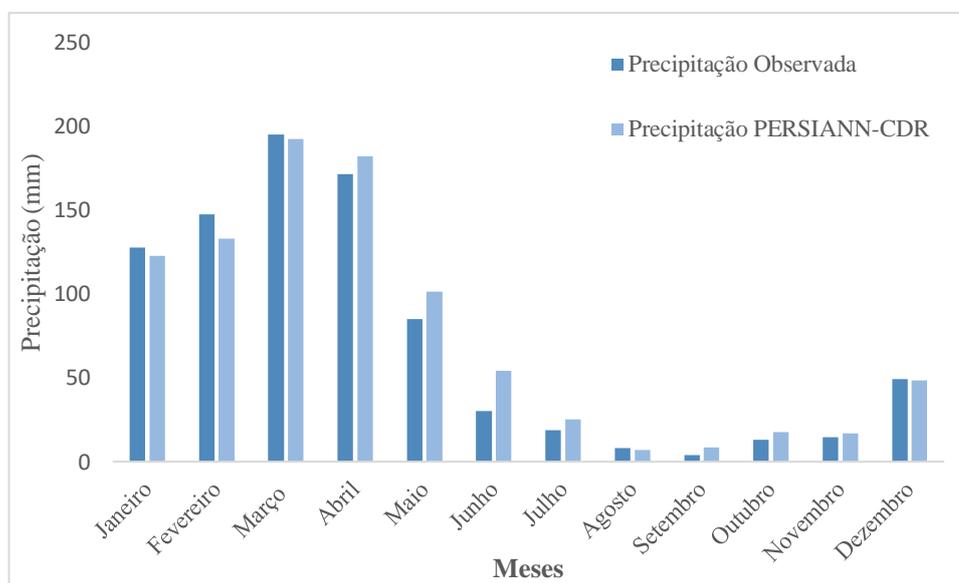
Tabela 10 – Análise da precipitação média mensal observada e PERSIANN-CDR entre os anos de 1983–2011

Mês	Precipitação Observada (mm)		Precipitação PERSIANN-CDR (mm)		Diferença (mm)
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	
Janeiro	127,638	20,533	122,450	6,294	-5,188
Fevereiro	147,354	20,680	133,019	9,987	-14,335
Março	194,984	29,345	192,457	15,056	-2,527
Abril	171,321	36,184	182,062	23,610	10,741
Maio	85,050	19,690	101,281	24,200	16,231
Junho	30,323	12,454	54,087	15,779	23,764
Julho	18,658	8,534	25,071	7,508	6,413
Agosto	8,101	4,918	6,990	3,069	-1,111
Setembro	4,083	2,243	8,315	2,020	4,232
Outubro	13,224	3,791	17,612	3,195	4,388
Novembro	14,485	5,240	16,685	3,475	2,200
Dezembro	49,258	9,648	48,492	5,009	-0,766
Período Chuv. (Jan – Abr)	160,324	36,998	157,497	33,845	-2,827
Período Seco (Mai – Dez)	27,898	27,262	34,817	31,870	6,919

Também buscou-se analisar o comportamento da precipitação no período seco e no chuvoso. Observa-se na tabela 10 que os valores foram bastante próximos entre as duas séries, com diferença nas médias de -2,83 e 6,92 mm, para os períodos chuvoso e seco, respectivamente. Portanto, conclui-se que o PERSIANN-CDR foi capaz de representar satisfatoriamente a sazonalidade da precipitação. Em relação ao desvio-padrão, observa-se que a série observada possui valores mais altos 2,24 – 36,18 mm, enquanto que a faixa de valores da precipitação estimada para o DP foi de 2,02 –24,20 mm. Além disso, observa-se que nas duas séries, o desvio-padrão cresce ao longo do período chuvoso.

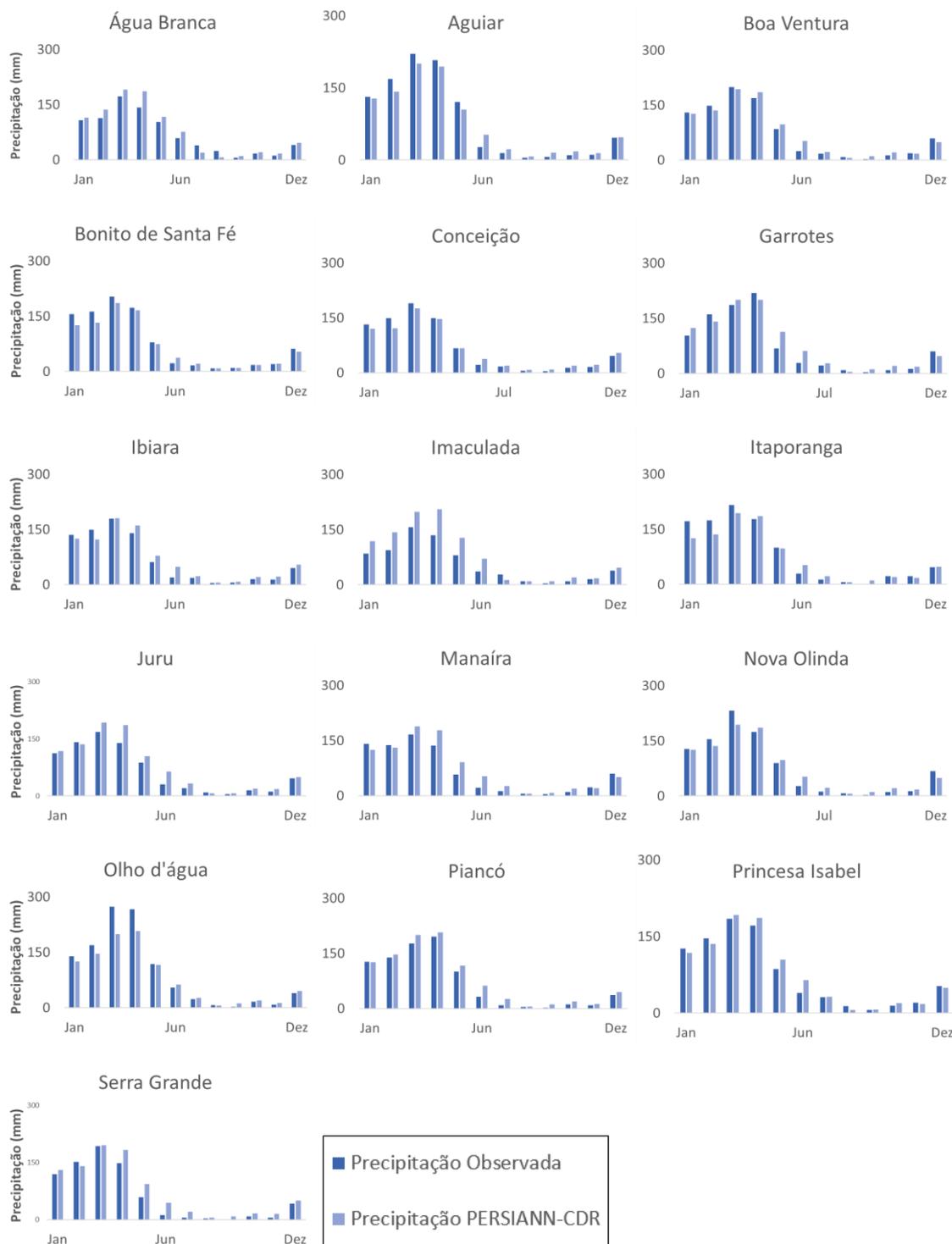
O mês de março é o que possui a maior média mensal em ambas as séries, 194,98 mm e 192,46 mm, para observada e estimada, respectivamente. Enquanto que o mês mais seco não foi correspondente, sendo setembro para a série observada e agosto para PERSIANN-CDR. A partir da Figura 15, pode-se observar que os dados de precipitação média mensal estimada tendem a superestimar na maioria dos meses quando comparados com a série observada, mas sem variações bruscas, em média 3,67 mm por mês, como constatado anteriormente.

Figura 15 – Comportamento da precipitação média mensal observada e PERSIANN-CDR entre os anos de 1983–2011



Também foram comparados graficamente os comportamentos das médias mensais dos postos em relação aos centróides mais próximos (Fig. 16).

Figura 16 – Comportamento entre a precipitação média mensal observada e PERSIANN-CDR entre os anos de 1983–2011 para os postos pluviométricos individualmente



Os postos que apresentam maiores médias mensais foram Aguiar, Itaporanga e Olho d'água com 182,03 mm, 185,07 mm e 211,83 mm, respectivamente. De maneira geral, os valores de precipitação observada são maiores que os estimados apenas no período chuvoso, com maiores

discrepâncias entre janeiro e março, isso confirma o que Casse e Gosset (2015) constataram na bacia do rio Níger, onde o PERSIANN-CDR suavizou os eventos extremos de precipitação e forneceu mais dias com precipitação diferente de zero.

Ao analisar os hietogramas, percebe-se que o comportamento entre as séries é muito semelhante em todos os postos estudados, com exceção dos postos Imaculada e Olho d'água que tiveram suas séries superestimada e subestimada, respectivamente. Na tabela 11 são mostrados os dados estatísticos para a comparação da precipitação em escala mensal.

Tabela 11 – Análise estatística da precipitação observada e PERSIANN-CDR em escala mensal entre 1983–2011

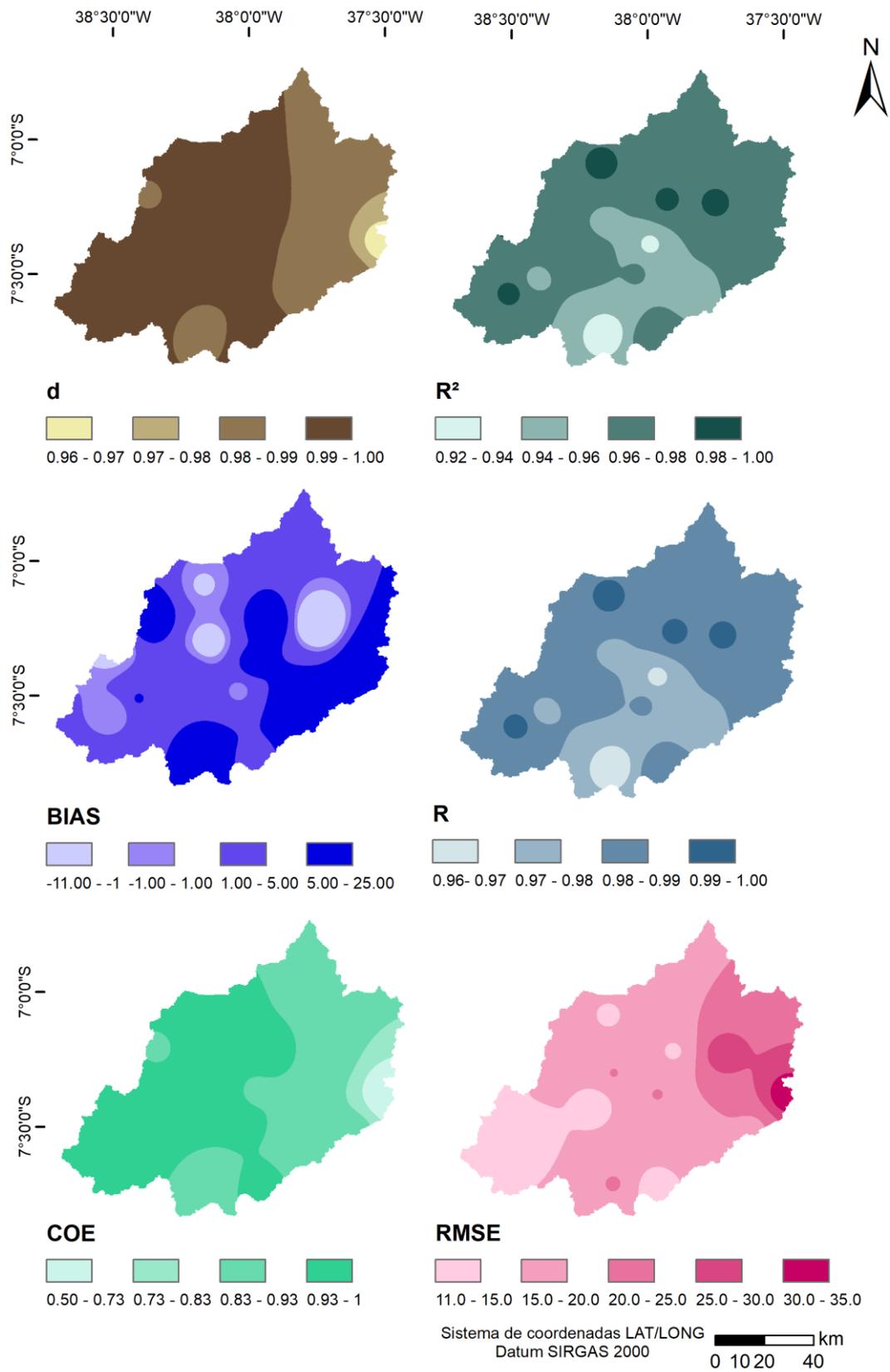
Posto	d	R ²	BIAS	R	COE	RMSE
Água Branca	0,989	0,966	8,954	0,983	0,880	18,585
Aguiar	0,995	0,986	-1,858	0,993	0,968	14,418
Boa Ventura	0,996	0,973	3,414	0,986	0,970	11,913
Bonito De Santa Fé	0,994	0,984	-6,430	0,992	0,959	14,384
Conceição	0,995	0,985	-0,933	0,993	0,969	11,397
Ibiara	0,993	0,955	5,225	0,977	0,946	14,598
Imaculada	0,962	0,961	23,929	0,980	0,515	34,358
Itaporanga	0,990	0,954	-5,560	0,977	0,932	20,183
Juru	0,988	0,954	12,320	0,977	0,889	19,378
Manaíra	0,986	0,921	10,055	0,960	0,883	20,453
Nova Olinda	0,993	0,962	-0,117	0,981	0,952	16,530
Olho d'água	0,985	0,984	-11,527	0,992	0,910	28,554
Piancó	0,995	0,985	11,218	0,993	0,958	14,231
Princesa Isabel	0,996	0,973	3,114	0,986	0,968	11,232
Santana dos Garrotes	0,990	0,933	7,348	0,966	0,923	20,245
Serra Grande	0,989	0,961	13,134	0,980	0,923	18,876

A partir da observação da tabela 11, verifica-se que o PERSIANN-CDR teve um ótimo desempenho quando comparado com os dados de pluviômetros em escala mensal, com valores médios de R, R² e COE iguais a 0,98, 0,96 e 0,91 respectivamente. O índice de concordância se encontra muito próximo do ajuste perfeito, com valor médio de 0,99. Os valores de R e R² variaram entre 0,96 – 0,99 e 0,92 – 0,99, respectivamente, demonstrando que houve uma boa correlação entre as séries estimada e observada. O BIAS não possuiu valores muito altos, -

11,53 – 23,93, o que indica que não houve grande superestimação ou subestimação, porém, em dez postos, os valores foram superestimados pelo PERSIANN–CDR. Com exceção do posto Imaculada, que obteve desempenho apenas satisfatório em relação ao COE, este índice possuiu um desempenho muito bom na escala mensal em todos os postos (MORIASI et al., 2007). Em relação ao RMSE, os valores se mantiveram numa faixa aceitável para valores de precipitação mensal do semiárido nordestino, 11,33 – 34,36 mm.

Os coeficientes estatísticos foram interpolados de acordo com o método *Inverse Distance Weighting* – IDW. Ao analisar a espacialização do desempenho dos índices estatísticos ao longo da BHRP, percebe-se que, novamente, a região leste da bacia é a que apresenta o pior desempenho. Isso ocorre pelo fato de que o posto Imaculada está localizado nessa região e, como mencionado, o mesmo não tem tido um bom desempenho nas escalas diária e mensal. Observa-se também a melhora considerável do desempenho do PERSIANN–CDR quando os dados diários são acumulados para o período mensal, ou seja, as médias mensais e a sazonalidade da precipitação estão sendo bem representadas pelos dados estimados por esse algoritmo. Por fim, percebe-se que as regiões oeste e central da bacia são as que possuem melhor desempenho dos índices estatísticos para a escala mensal, assim como na escala diária, com destaque para os postos Aguiar, Boa Ventura, Conceição e Princesa Isabel.

Figura 17 – Espacialização dos índices estatísticos dos dados mensais de precipitação observados e PERSIANN-CDR entre 1983–2011



Nas figuras abaixo (Fig.18 e Fig.19), pode-se visualizar como se deu a variação espaço-temporal da precipitação média mensal na BHRP para as séries observada e estimada pelo PERSIANN-CDR.

Como mencionado, o período chuvoso se concentra nos primeiros quatro meses do ano, com médias de 127,64 mm a 194,98 mm. Os valores de precipitação mensal decrescem de maio a novembro. Percebe-se que maio e dezembro não são meses tão secos em relação aos demais do período seco, com médias de 85,05 mm e 49,26 mm, respectivamente, isso ocorre pois estes são os meses de transição entre o período chuvoso e o seco. Também é possível perceber que o PERSIANN-CDR registra valores mais elevados para o período seco em relação à série observada.

Figura 18 – Variação espaço-temporal da precipitação média mensal observada entre os anos de 1983–2011

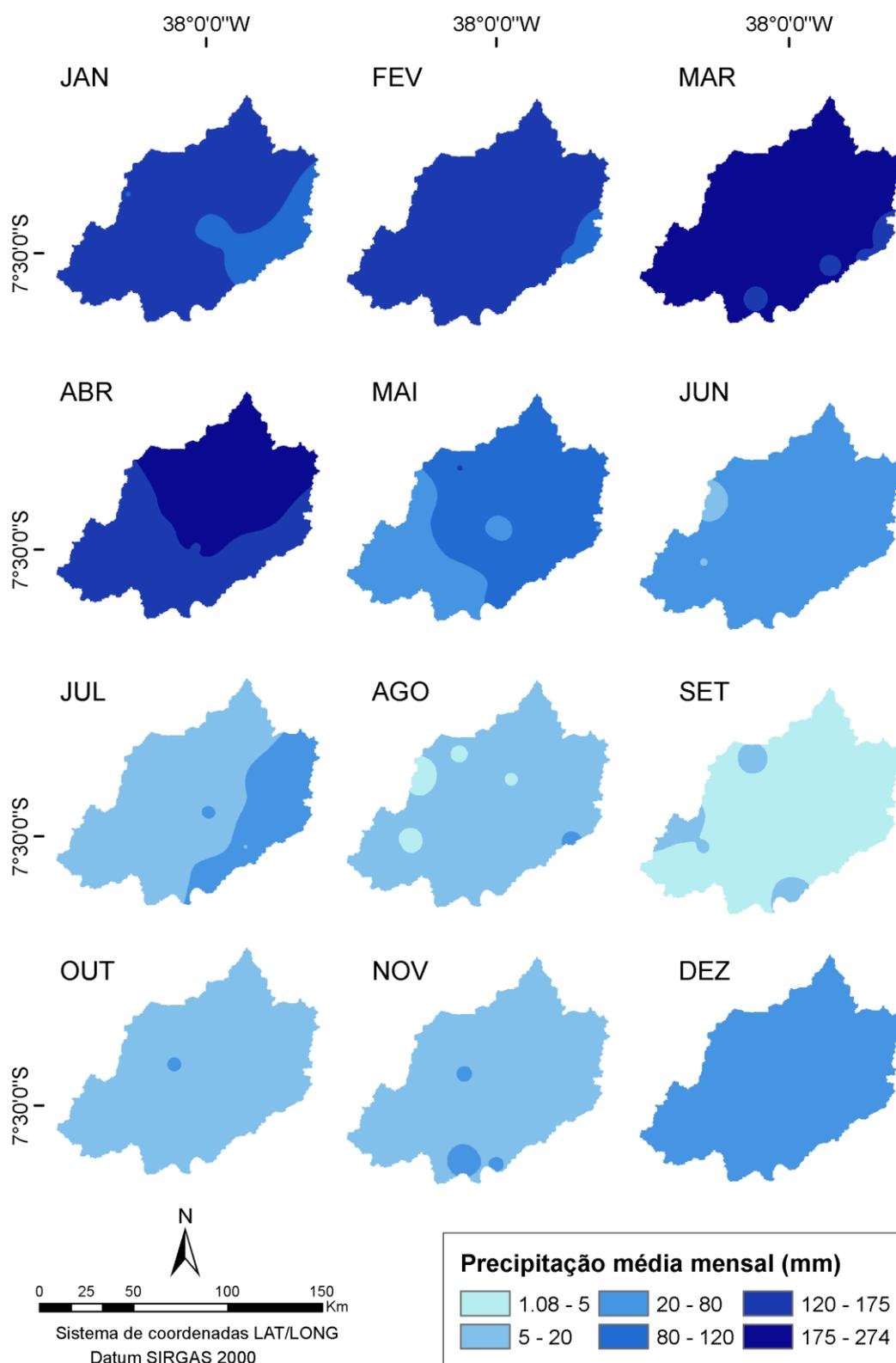
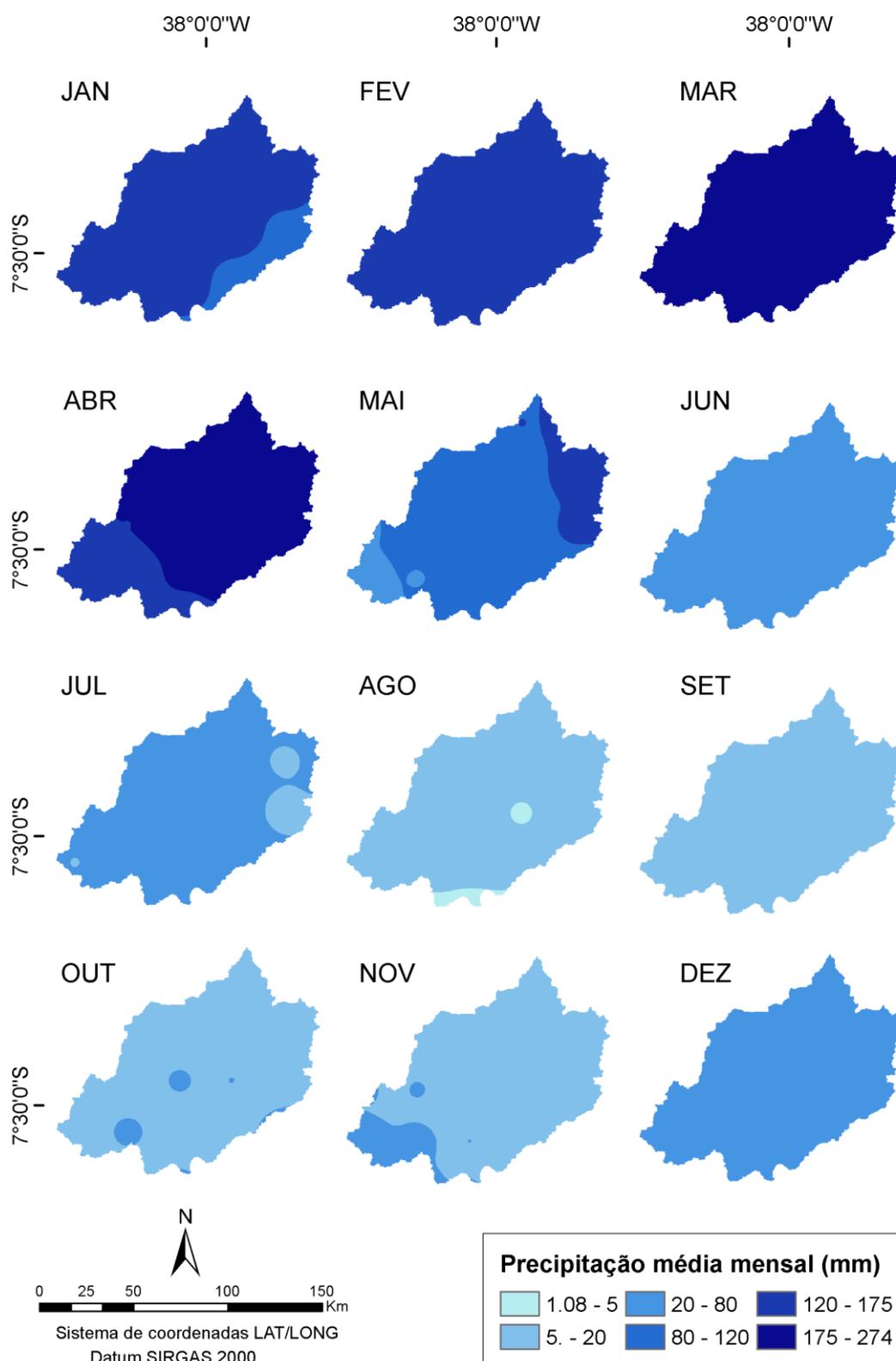


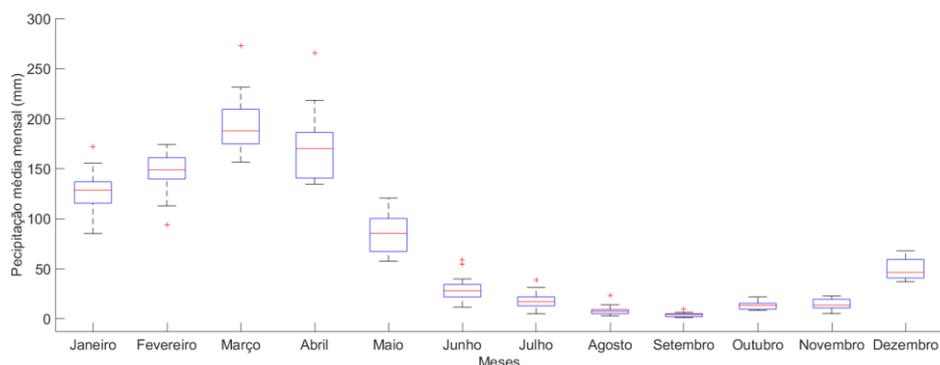
Figura 19 – Variação espaço-temporal da precipitação média mensal PERSIANN-CDR entre os anos de 1983–2011



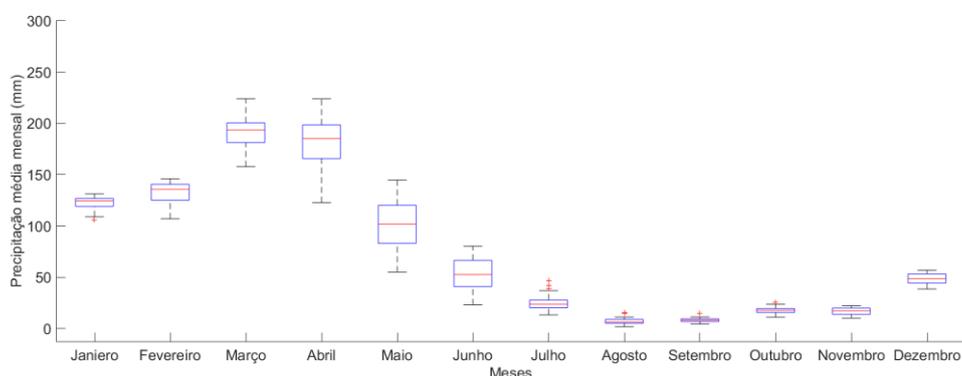
Com auxílio do gráfico *boxplot* (Fig.20), pode-se analisar estatisticamente as variações que ocorreram em ambas as séries de precipitação:

Figura 20 – Variação das precipitações mensais médias: (A) dados observados e (B) dados PERSIANN–CDR para os anos entre 1983 – 2011

(A)



(B)



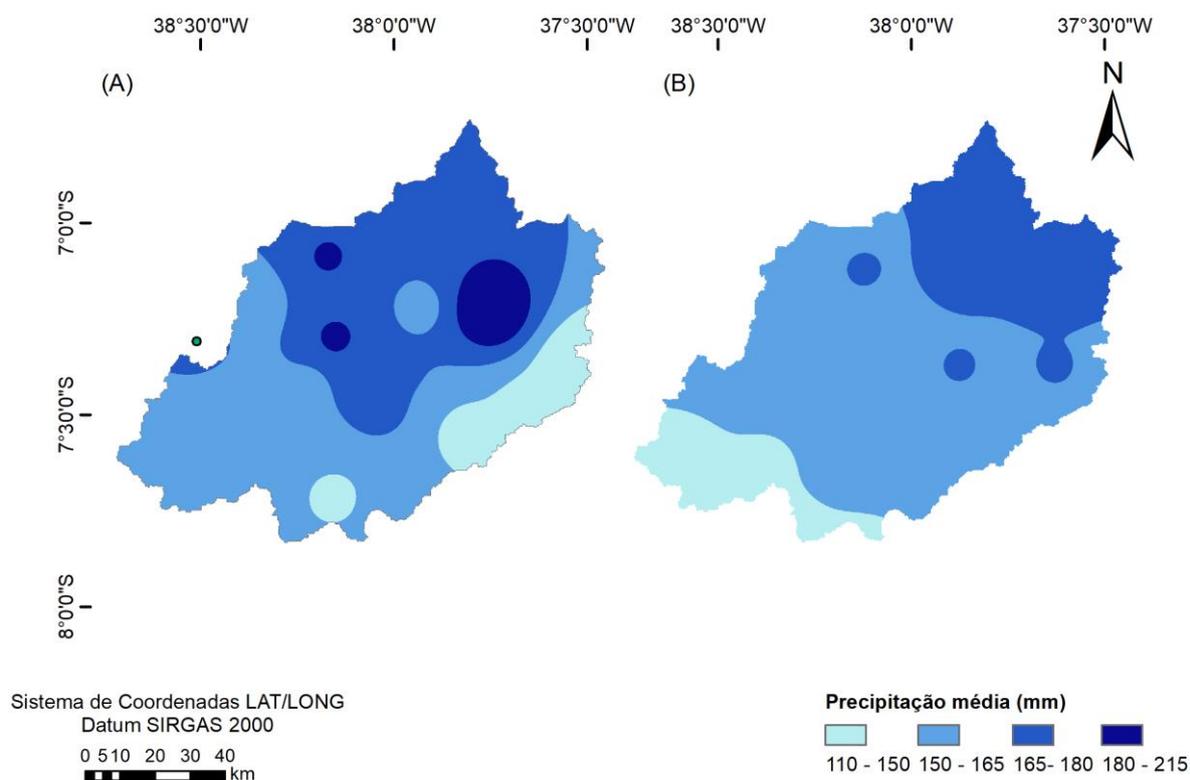
A série de precipitação observada possui uma faixa de variação maior do que a estimada, 1,09 mm a 273,31 mm e 1,84 mm a 224,00 mm respectivamente. Essa diferença é ainda mais acentuada no período chuvoso, 85,14 – 273,81 mm e 105,98 mm – 224,00 mm, para série observada e estimada, respectivamente. Observa-se que o valor máximo de precipitação mensal do período chuvoso ocorre na série observada, 273,31 mm, enquanto que o oposto ocorre no período seco, ou seja, o maior valor de precipitação do período seco ocorre na série estimada, 144,74 mm. Isso confirma o que já havia sido constatado anteriormente, em períodos chuvosos, a série observada é subestimada e o oposto ocorre no período seco. O período seco se comportou de maneira bastante semelhante nas duas séries, como pode ser observado na

figura 20, com exceção dos meses de maio e junho que tiveram maiores variações no PERSIANN-CDR.

A mediana do período chuvoso é maior na observada que na estimada, 155,13 mm e 144,10 mm, respectivamente. Já no período seco, os valores se encontram bastante próximos em ambas as séries, 17,05 mm na série observada e 20,89 mm na série estimada. Pode-se perceber também que os valores extremos não foram bem representados pelo algoritmo. O mês de setembro foi o que possuiu a menor variação nas duas séries, 1,09 – 9,91 mm para a série observada e 4,39 – 14,97 mm para a estimada, já o mês de maior variação foi abril e maio, para observada e PERSIANN-CDR respectivamente.

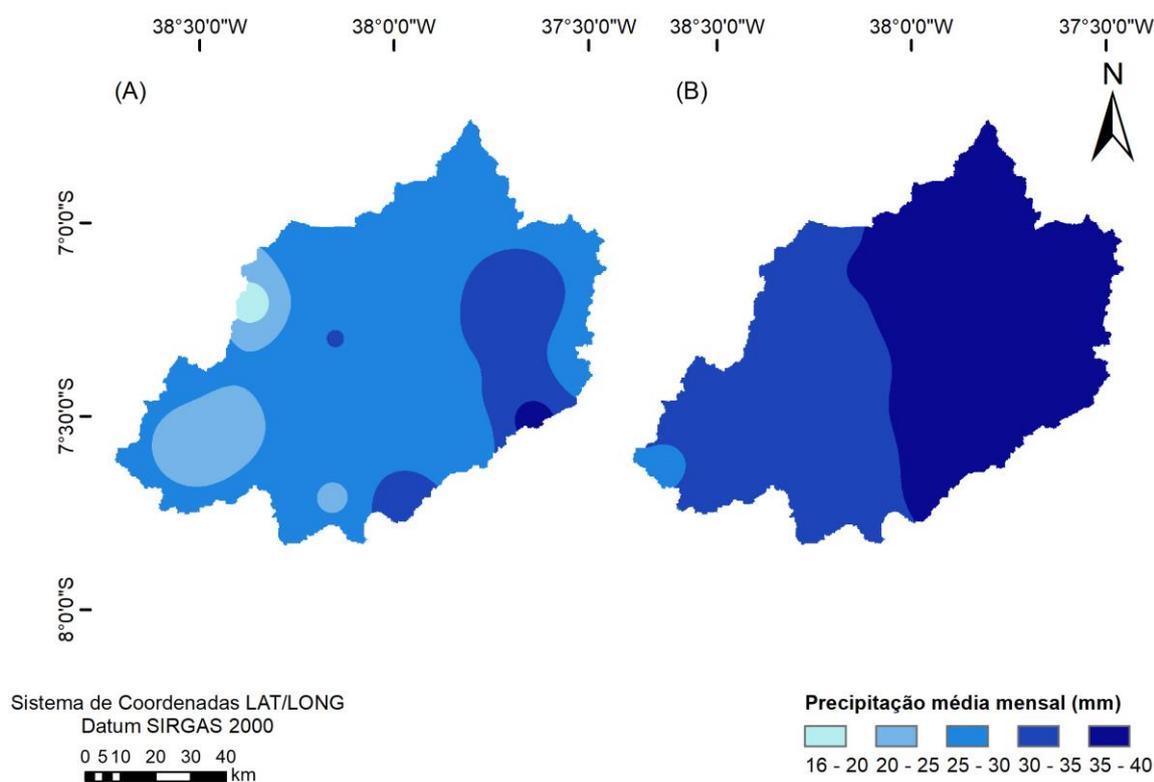
Por fim, em relação à escala mensal, buscou-se analisar espacialmente como são os comportamentos das duas séries de precipitação nos períodos chuvoso e seco.

Figura 21 – Variação espacial das precipitações médias no período chuvoso (Janeiro – Abril) (A) dados observados e (B) dados PERSIANN-CDR para os anos entre 1983 – 2011



A região mais chuvosa da bacia no período chuvoso é a norte. Porém, houve uma divergência entre as duas séries sobre qual seria a região menos chuvosa. Enquanto nos dados observados foi a região leste, nos estimados foi a sul. Além disso, apenas a série observada possuiu regiões com precipitação média maior que 180 mm, isso se deve a, como visto, no período chuvoso, o algoritmo ter subestimado os valores de chuva. Apesar disso, percebe-se que a maior parte da bacia foi representada em concordância para as duas séries. Em ambas há predomínio de precipitação média entre 150 e 165 mm.

Figura 22 – Variação espacial das precipitações médias no período seco (Maio – Dezembro) (A) dados observados e (B) dados PERSIANN-CDR para os anos entre 1983 – 2011



Em relação ao período seco, houve pouca concordância na espacialização dos valores, pois o PERSIANN-CDR superestimou a série observada. Na série observada há um predomínio de áreas com precipitação entre 25–30 mm, enquanto que na série estimada predominam os valores de 35–40 mm. Apesar de não ser uma diferença muito expressiva em termos de valores absolutos, torna-se relevante observar que nesse período as medianas permanecem em torno de 17,04 mm, logo, é uma diferença considerável.

5.1.3. Análise espaço-temporal das séries de precipitação em escala anual

Na tabela 12, pode-se observar as precipitações totais anuais observada e estimada PERSIANN-CDR para o período em estudo.

Tabela 12 – Análise da precipitação total anual observada e PERSIANN-CDR entre 1983 – 2011

Mês	Precipitação Observada (mm)		Precipitação PERSIANN-CDR (mm)		Diferença (mm)
	Total anual	Desvio Padrão	Total anual	Desvio Padrão	
1983	556,547	120,170	407,569	50,040	-148,978
1984	896,857	167,410	899,960	85,439	3,102
1985	1830,860	387,347	1844,238	181,453	13,378
1986	1132,173	232,263	1216,005	130,173	83,831
1987	715,557	171,732	674,607	77,355	-40,950
1988	961,213	273,089	969,264	48,896	8,051
1989	1195,038	407,944	1271,671	134,905	76,633
1990	608,021	143,285	665,464	64,013	57,443
1991	701,155	240,265	714,219	77,945	13,065
1992	681,625	141,535	404,024	159,144	-277,601
1993	400,880	160,701	293,874	70,168	-107,006
1994	1126,282	183,540	1205,605	195,970	79,323
1995	941,509	126,557	1004,019	115,620	62,510
1996	798,691	124,328	1159,588	88,879	360,897
1997	853,182	189,362	864,186	44,404	11,004
1998	374,667	127,713	482,855	59,149	108,188
1999	718,147	142,133	848,362	86,201	130,215
2000	915,853	131,817	1148,321	163,804	232,468
2001	608,180	83,436	671,981	62,491	63,801
2002	885,280	152,215	991,162	140,817	105,882
2003	785,460	151,985	791,057	118,876	5,597
2004	1078,013	155,932	1254,421	82,738	176,408
2005	707,340	104,428	739,852	94,283	32,512
2006	985,700	180,847	872,469	154,062	-113,231
2007	681,693	133,404	683,479	90,001	1,786
2008	1205,371	235,106	1173,312	136,091	-32,060
2009	1079,657	167,666	1201,619	180,719	121,962
2010	707,420	109,023	758,788	55,597	51,368
2011	946,750	123,514	1135,124	173,124	188,374
Média da série (mm)	864,797	–	908,521	–	43,724

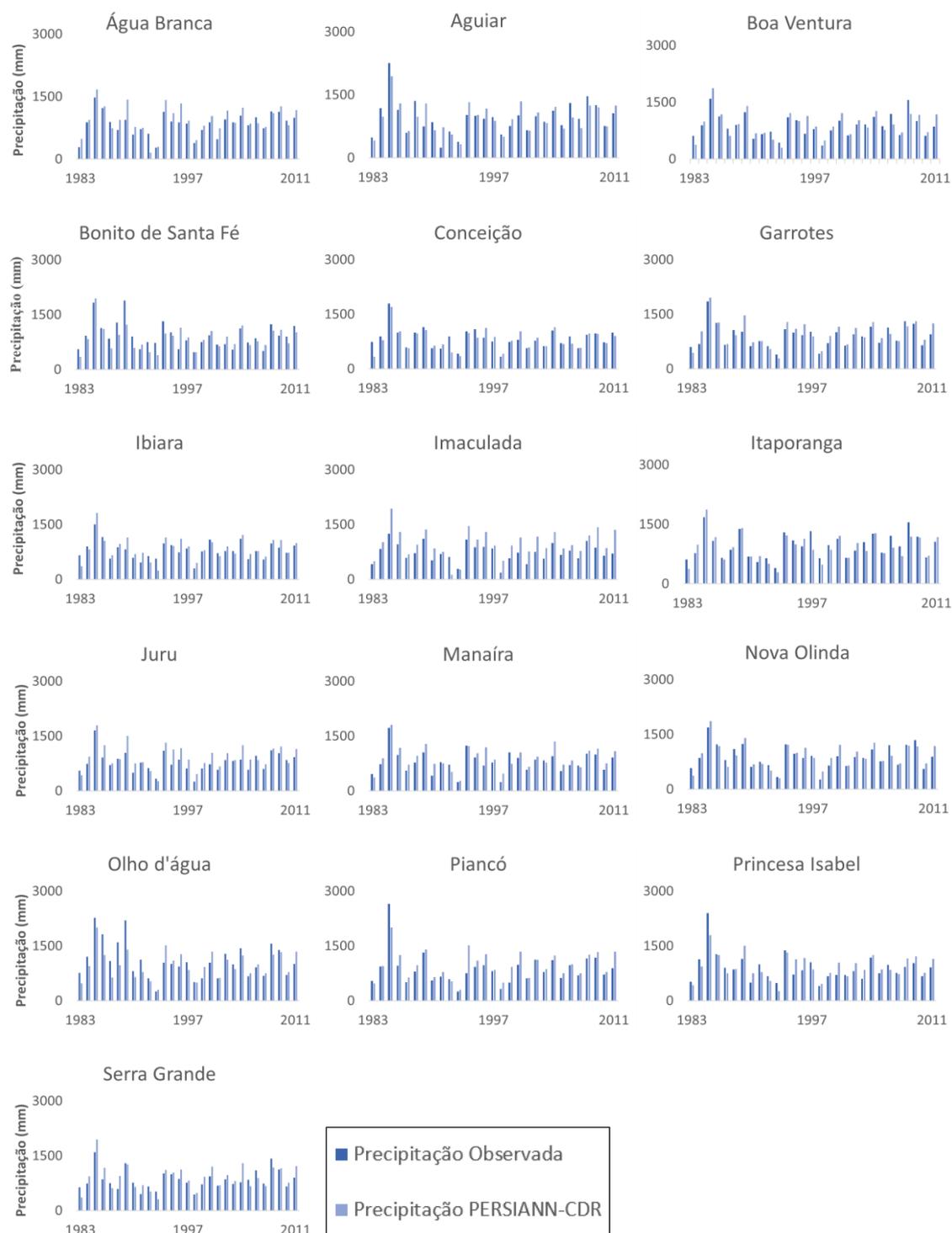
A precipitação total anual na BHRP possui grande variabilidade temporal, como pode ser observado na tabela 12, possuindo anos com total anual de chuva variando entre 374,67 – 1830,86 mm na série observada e entre 293,87 – 1844,24 mm na série estimada no período estudado. O PERSIANN–CDR mostrou-se capaz de representar bem os anos secos e chuvosos, com exceção dos anos de 1992, 1996 e 2000 que obtiveram diferenças mais expressivas, - 277,60 mm, 360,90 mm e 232,47 mm, respectivamente. A diferença entre os totais anuais médios foi de 43,72 mm, sendo a máxima 360,90 mm no ano de 1996, como mencionado, e a mínima de 3,10 mm em 1984.

Os anos mais secos foram os mesmos em ambas as séries: 1983, 1990, 1992, 1993 e 1998. Porém, enquanto que na série observada o ano mais seco foi 1998 com 374,67 mm, na série estimada foi 1993 com 293,87 mm. Em relação aos anos chuvosos, destacam-se 1985, 1986, 1989 e 1994, observa-se que 1985 foi o ano mais chuvoso em ambas as séries, com uma diferença entre os totais anuais de 13,39 mm.

De maneira geral, o desvio-padrão é maior na série observada, semelhantemente ao que ocorreu em escala mensal, variando de 83,44 – 407,94 mm na série observada e 44,40 – 195,97 mm na estimada. Os anos secos se alternam com os chuvosos ao longo de todo o período estudado, não apresentando períodos contínuos de seca.

Também foram analisados os comportamentos dos hietogramas anuais dos pluviômetros individualmente em relação ao ponto do PERSIANN–CDR mais próximo (Fig.23):

Figura 23 – Comportamento da precipitação total anual observada e PERSIANN-CDR entre os anos de 1983 – 2011 para os postos pluviométricos individualmente



Os postos apresentaram um mesmo padrão nos totais anuais, tanto no comportamento, quanto nos valores, apesar de que os postos Aguiar e Itaporanga possuem valores mais altos que os demais, com médias de 937,36 mm e 958,96 mm, respectivamente. Já o posto Imaculada

possui média de 727,31 mm, sendo o que possui a menor média anual. Observa-se que em 26 anos do período estudado houve uma leve superestimação da série observada, o que justifica a diferença causada na média do total anual entre as duas séries, mencionada anteriormente.

Tabela 13 – Análise estatística da precipitação observada e PERSIANN–CDR em escala anual entre 1983 – 2011

Posto	d	R²	BIAS	R	COE	RMSE
Água Branca	0,991	0,795	98,725	0,892	0,642	171,489
Aguiar	0,987	0,652	-4,322	0,807	0,650	237,883
Boa Ventura	0,990	0,701	50,715	0,837	0,590	189,399
Bonito de Santa Fé	0,983	0,564	-61,437	0,751	0,510	245,776
Conceição	0,992	0,722	-20,264	0,850	0,681	155,887
Ibiara	0,990	0,720	59,954	0,849	0,470	175,635
Imaculada	0,965	0,765	294,139	0,875	-0,971	336,767
Itaporanga	0,990	0,632	-81,684	0,795	0,714	193,393
Juru	0,985	0,729	158,782	0,854	0,220	224,763
Manaíra	0,988	0,763	118,267	0,874	0,577	197,125
Nova Olinda	0,993	0,743	45,427	0,862	0,687	167,767
Olho d'água	0,979	0,681	-148,352	0,825	0,589	325,128
Piancó	0,982	0,705	125,393	0,840	0,616	261,688
Princesa Isabel	0,987	0,652	42,404	0,807	0,636	226,644
Santana dos Garrotes	0,990	0,806	83,478	0,898	0,701	211,503
Serra Grande	0,984	0,648	115,075	0,805	0,041	228,137

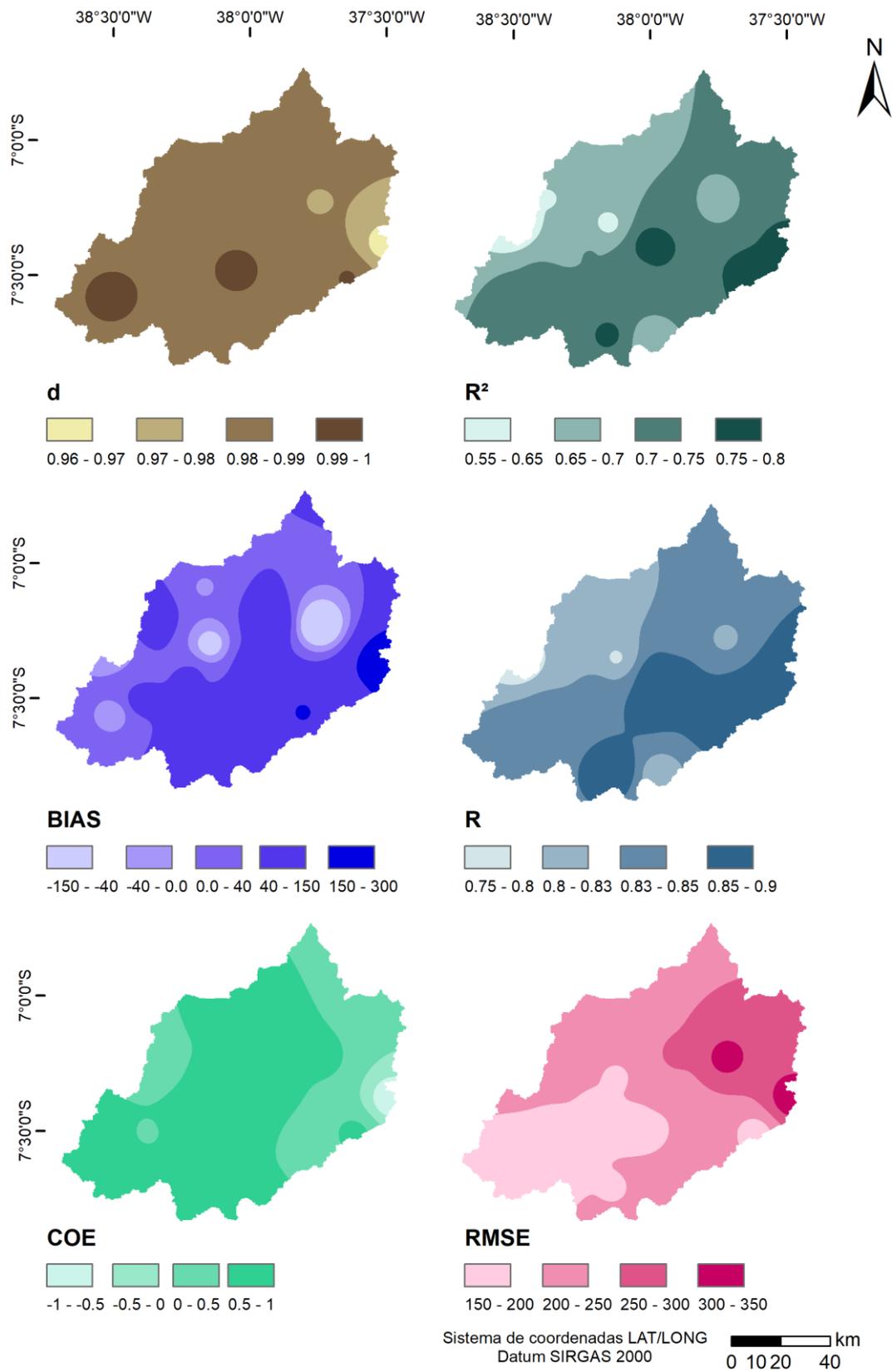
Em relação aos índices estatísticos de desempenho, pode-se observar na tabela 13 que os valo/res para a escala anual foram um pouco menos satisfatórios que os da escala mensal, mas ainda assim se apresentam como bons e melhores que a escala diária, comprovando o fato de que ao se acumular para as escalas mensal e anual o PERSIANN–CDR tem uma melhora bastante significativa do desempenho.

O índice de concordância médio foi 0,99, estando próximo do ajuste perfeito. Em relação à correlação entre as séries, o R e o R² possuíram valores médios de 0,84 e 0,70 respectivamente, sendo o desempenho considerado como satisfatório (MORIASI et al, 2007). Em 11 dos 16 postos houve superestimação da série observada, constatado a partir dos valores positivos do BIAS, esse índice teve variação de -148,35 – 294,14. Em relação ao COE, os postos Ibiara, Imaculada, Juru e Serra Grande obtiveram desempenho insatisfatório (MORIASI

et al., 2007), enquanto que os outros obtiveram desempenho de satisfatório a bom. Observa-se que estes postos que não obtiveram um bom desempenho quanto ao COE, foram justamente os postos que tiveram os menores totais anuais e o PERSIANN-CDR superestimou consideravelmente, com diferenças entre as médias anuais das duas séries variando de 55,31 – 252,26 mm. Em relação ao RMSE, os valores variaram numa faixa de 155,89 – 336,77 mm.

Em relação à espacialização dos índices estatísticos para a escala anual (Fig.24), o R e o R² obtiveram melhor desempenho na região leste da bacia, enquanto que o BIAS, COE e RMSE nas regiões norte e oeste. O índice de concordância teve comportamento homogêneo ao longo de toda a bacia.

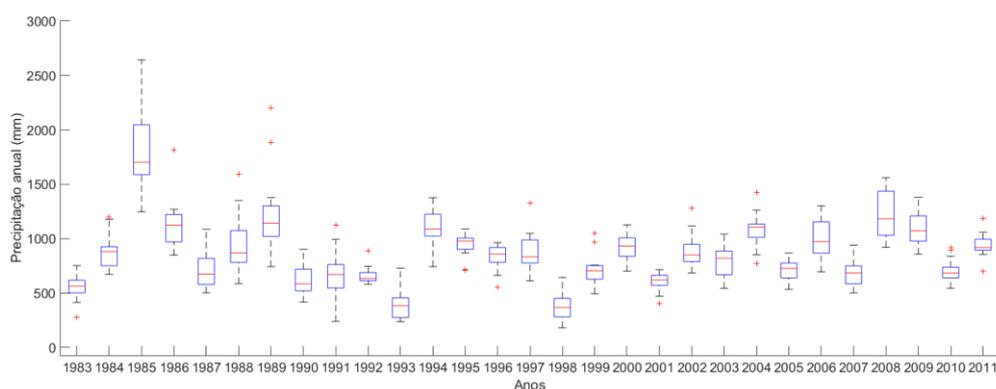
Figura 24 – Espacialização dos índices estatísticos dos dados anuais de precipitação observados e PERSIANN – CDR entre 1983 – 2011



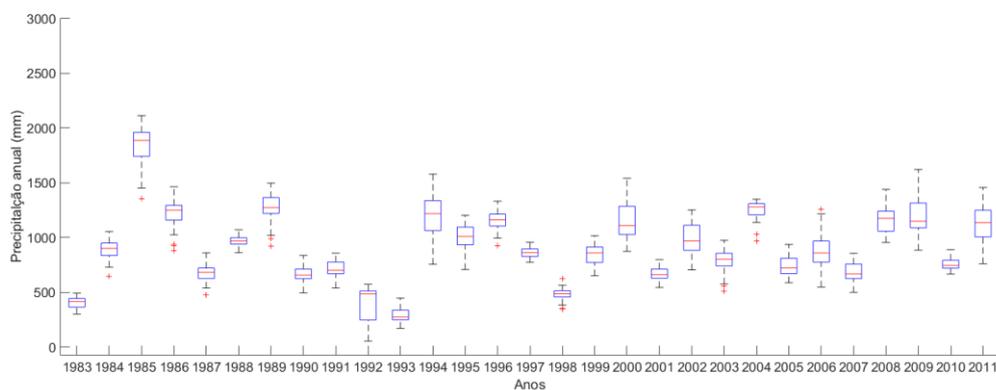
A figura 25 auxilia na compreensão das variações dos dados de precipitação anual das séries estudadas:

Figura 25 – Variação das precipitações totais anuais: (A) dados observados e (B) dados PERSIANN–CDR para os anos entre 1983 – 2011

(A)



(B)

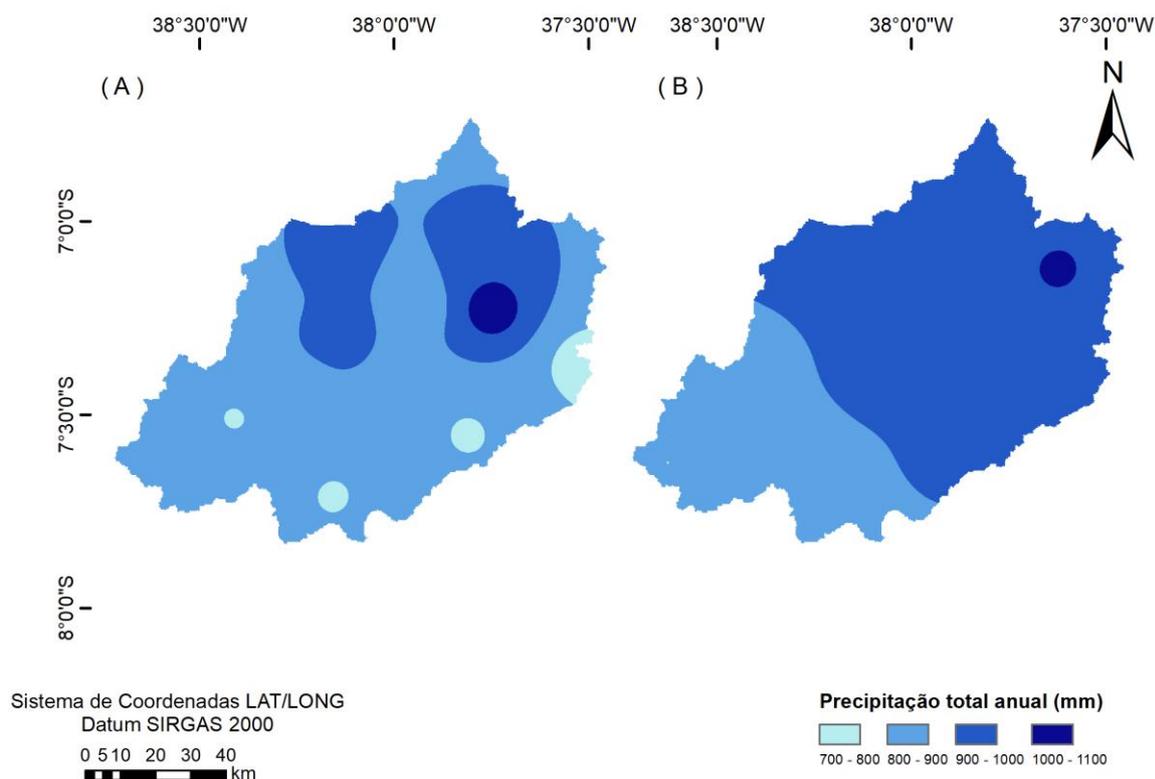


A figura 25 mostra que as variações na escala anual foram maiores na série de precipitação observada. O ano de 1985 que foi o mais chuvoso, 1830,86 mm na série observada e 1844,24 mm na estimada, é também o que apresenta maior variação nos pluviômetros, 1247,10 – 2642,40 mm. Já na série do PERSIANN–CDR, o que mais variou foi o ano de 1992, 55,40 – 574,20 mm, este sendo um dos mais secos desta série, como mencionado. Observa-se que anos que variaram bastante em uma das séries, pouco variaram na outra, como por exemplo: 1985, 1992, 2000, 2008 etc.

Na série observada, foram identificados mais valores fora do comportamento normal da série, na imagem representados por cruzes vermelhas. Os máximos identificados em pluviômetros foram na maioria dos anos mais elevados que os do PERSIANN-CDR. Os anos de 2001, 2004 e 2010 se caracterizam por possuírem pequenas variações em ambas as séries, como pode ser visto na figura 25. Além disso, observa-se que anos que tiveram pequenas variações possuem medianas mais semelhantes entre as séries. Ainda em relação as medianas, foram 842,75 mm e 884,55 mm, para as séries observada e estimada respectivamente.

Por fim, em relação aos dados de precipitação, analisou-se a variação espacial da precipitação total anual, para que fosse verificada em escala anual quais eram as regiões chuvosas e secas da bacia, além de saber a magnitude em que isso ocorre.

Figura 26 – Variação espacial das precipitações totais anuais: (A) dados observados e (B) dados PERSIANN-CDR para os anos entre 1983 – 2011



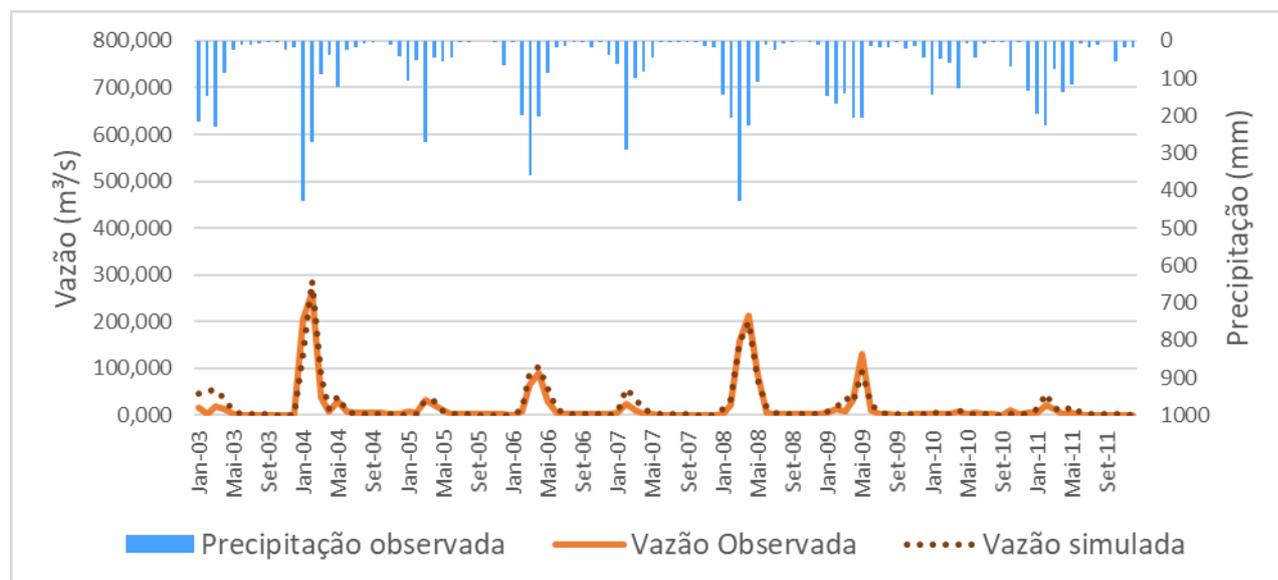
A maior parte da bacia apresenta uma faixa pluviométrica de 800 – 900 mm em relação à série observada, já na estimada, uma faixa de 900 – 1000 mm. Os maiores valores de precipitação estão concentrados na região norte da BHRP em ambas as séries.

5.2. Análise das vazões e desempenho do modelo

Inicialmente, foi realizado um processo de calibração e validação do modelo SWAT utilizando dados de precipitação observada para que a mesma fosse tomada como referência para analisar a viabilidade do uso de precipitação PERSIANN–CDR na modelagem hidrológica na BHRP.

Os resultados da calibração do modelo utilizando a precipitação observada estão apresentados na figura 27. O hidrograma mostra que os comportamentos das vazões observada e simulada foram bastante semelhantes, inclusive nos valores extremos. Estatisticamente, o modelo apresentou um desempenho muito bom, segundo Moriasi et al. (2007), sendo R^2 e COE 0,90 e 0,89 respectivamente. Em relação às médias, tem-se que a média da série observada foi de 16,30 m^3/s , enquanto que a simulada foi de 19,65 m^3/s . O desvio-padrão da série observada foi levemente maior que a simulada, sendo 43,02 m^3/s para aquela e 42,11 m^3/s para esta.

Figura 27 – Resultado do processo de calibração do modelo SWAT para o período de 2003 a 2011 utilizando precipitação observada



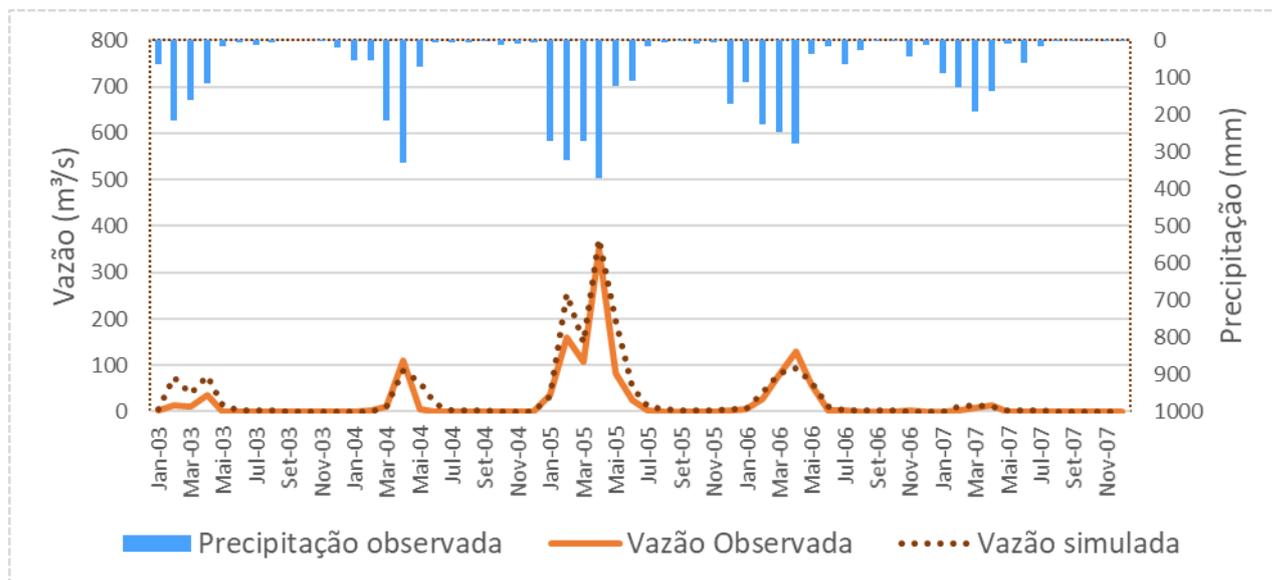
A tabela 14 apresenta os valores resultantes do processo de calibração no SWAT–CUP. Destaca-se que apenas os valores dos parâmetros com operação de substituição são inseridos diretamente no SWAT, os resultados dos demais parâmetros não são valores que o SWAT utiliza, pois, o valor final desses parâmetros depende do valor default do modelo SWAT, conforme mencionado anteriormente no item da metodologia.

Tabela 14 – Valores dos parâmetros otimizados para a modelagem com dados de precipitação observada

Parâmetro	Resultado
Alpha_Bf	0,2417
Biomix	0,4517
Canmx	2,0650
Cn2	-0,0143
Ch_K2	4,0417
Ch_N2	0,1875
Epc0	0,0450
Esco	0,5108
Gw_delay	-8,5500
Gw_revap	0,0371
Gw_qmn	711,6667
Rchrg_Dp	0,0018
Revapmn	3,2500
Ssubbsn	-0,0192
Sol_Alb	-0,,0108
Sol_Awc	0,0942
Sol_K	0,1592
Sol_Z	-0,1908
Surlag	18,0400

Para verificar se a modelagem estava representativa para a BHRP, foi realizada a validação do modelo utilizando o período de 1983–1987. A figura 28 mostra o resultado da validação do modelo SWAT utilizando os dados observados de precipitação.

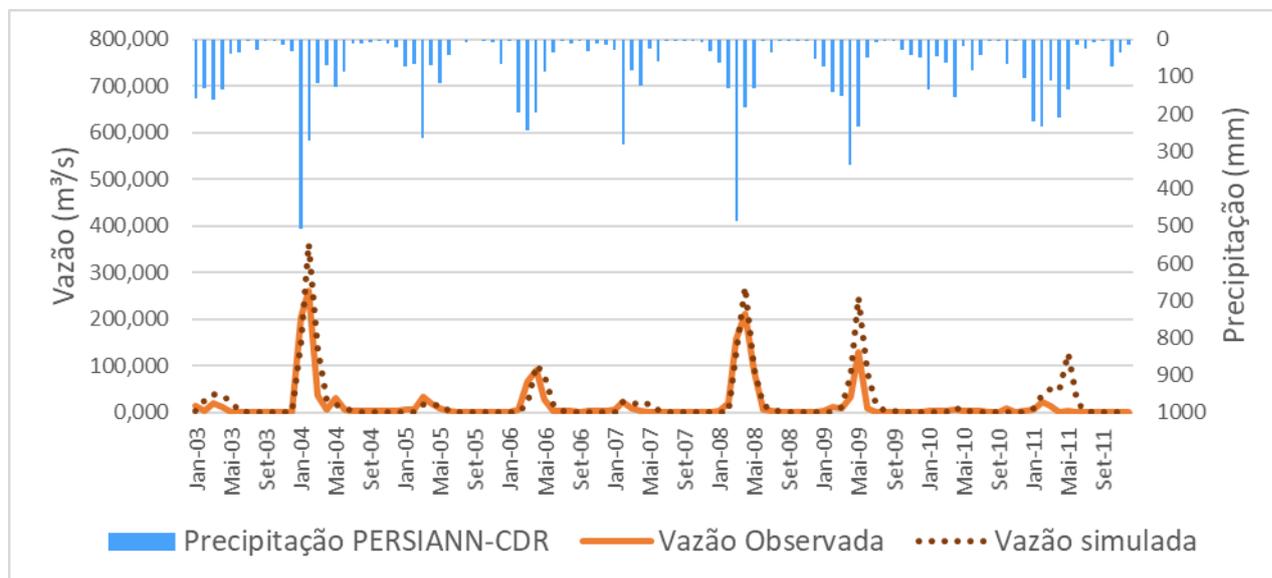
Figura 28 – Validação do modelo SWAT para o período de 1983 a 1987 utilizando precipitação observada



O comportamento da vazão foi bem representado no período de validação, inclusive em relação aos picos. O modelo apresentou um desempenho um pouco inferior que o da calibração, mas ainda assim muito bom, segundo Moriasi et al (2007), sendo R^2 igual a 0,89 e COE 0,80. Logo, percebe-se que o modelo foi capaz de reproduzir com confiança a dinâmica chuva x vazão mesmo em um período distinto do calibrado. A média da série observada foi de 21,56 m³/s, enquanto que a simulada foi de 30,69 m³/s, diferença de 9,13 m³/s. O desvio-padrão foi maior na série de validação, sendo 66,04 m³/s e 55,53 m³/s para simulada e observada, respectivamente.

Para analisar o desempenho da precipitação PERSIANN-CDR em relação à modelagem com dados de precipitação observada, foi realizada uma simulação aplicando a chuva do algoritmo com os parâmetros otimizados previamente com os dados da série observada.

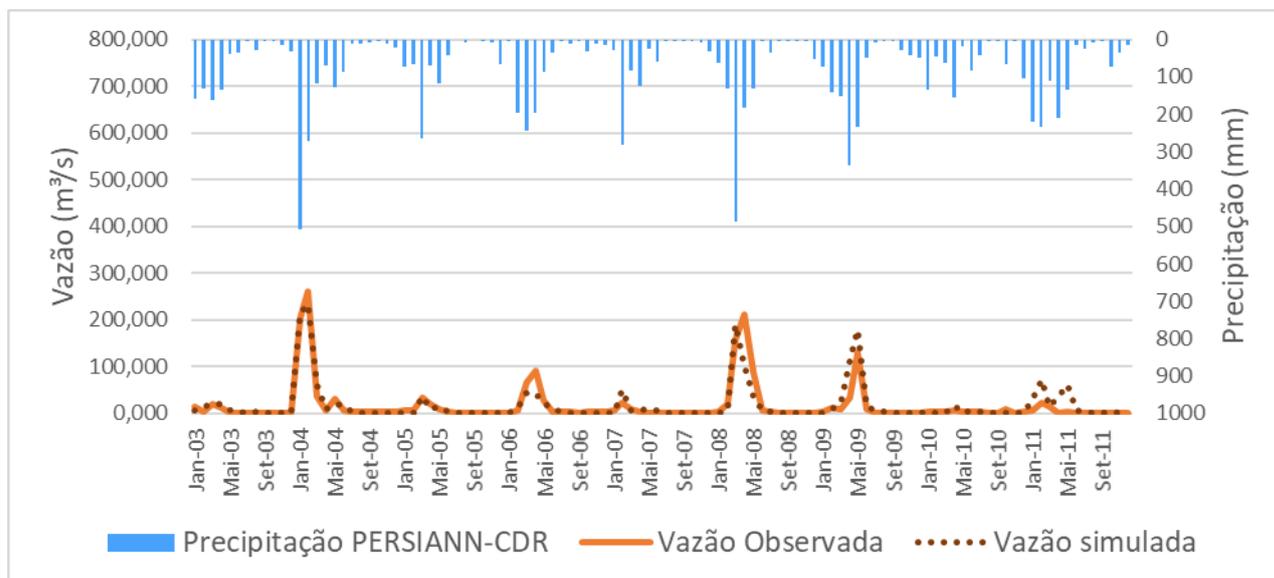
Figura 29 – Resultado da modelagem do SWAT utilizando os parâmetros otimizados com dados de precipitação observada no período de 2003 a 2011 utilizando precipitação do PERSIANN-CDR



Os hidrogramas simulado e observado apresentam pequenas discordâncias em relação à variabilidade da vazão, principalmente no ano de 2011, onde houve uma superestimativa da vazão. Segundo Moriasi et al. (2007), o desempenho do modelo em relação ao R^2 foi considerado bom ($R^2 = 0,79$) e em relação ao COE foi considerado satisfatório ($COE = 0,60$). Percebe-se que ao mudar a precipitação para PERSIANN-CDR o modelo possui uma queda de desempenho, justificável pois, como visto, existe uma certa discordância entre os dados diários de precipitação observada e estimada. A média da série simulada foi de $23,79 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo a diferença de $7,49 \text{ m}^3/\text{s}$ em relação à observada. O desvio-padrão foi de $55,99 \text{ m}^3/\text{s}$.

Devido ao exposto, realizou-se uma modelagem utilizando como dados de precipitação os do PERSIANN-CDR para analisar o desempenho do modelo e se é uma alternativa viável. O resultado da calibração do modelo SWAT utilizando os dados de precipitação estimada são apresentados na figura 30.

Figura 30 – Resultado do processo de calibração do modelo SWAT para o período de 2003 a 2011 utilizando precipitação do PERSIANN-CDR



Ao calibrar o modelo com a precipitação do PERSIANN-CDR, o modelo obteve um ajuste muito bom, sendo $R^2 = 0,81$ e $COE = 0,80$. A média da série observada foi de $17,99 \text{ m}^3/\text{s}$, apenas $1,69 \text{ m}^3/\text{s}$ de diferença da série observada. Percebe-se que a aproximação da média foi melhor que a simulada com precipitação observada. Além disso, o desvio-padrão também foi menor, sendo $41,90 \text{ m}^3/\text{s}$. Logo, nota-se que a calibração do modelo com os dados do PERSIANN-CDR foi tão satisfatória quanto a com precipitação observada.

A tabela 15 apresenta os valores resultantes do processo de calibração no SWAT-CUP utilizando os dados de precipitação estimada.

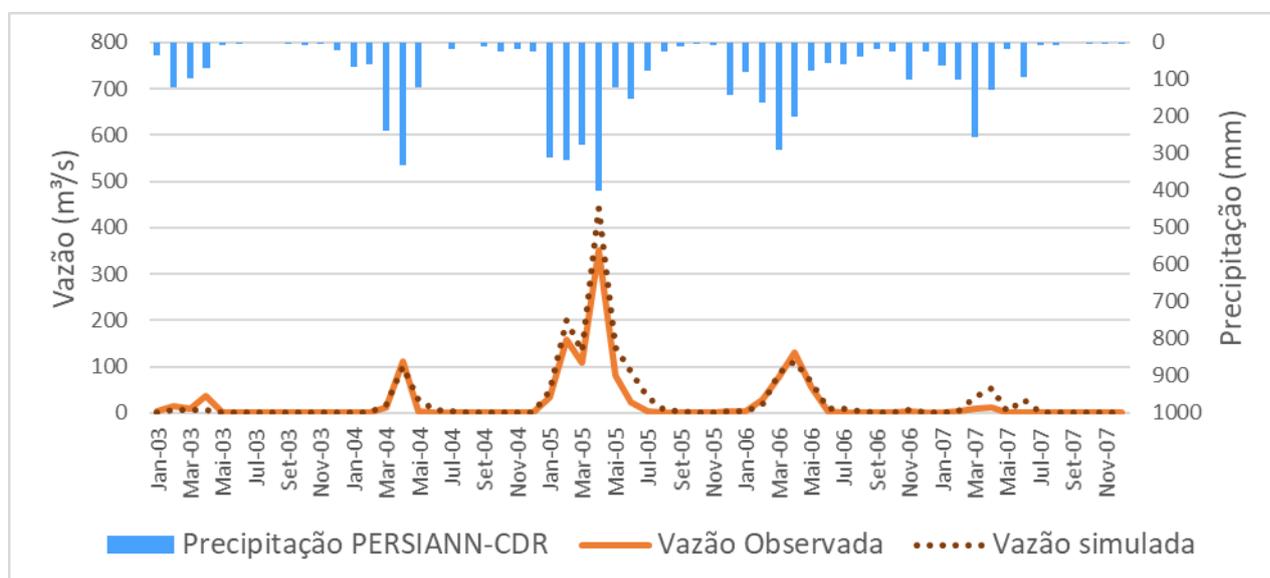
Tabela 15 – Valores dos parâmetros otimizados para a modelagem com dados PERSIANN-CDR

Parâmetro	Resultado
Alpha_Bf	0,9650
Biomix	0,2217
Canmx	4,8050
Cn2	0,0900
Ch_K2	1,8583
Ch_N2	0,1915
Epc0	0,6917

Parâmetro	Resultado
Esco	0,8742
Gw_delay	-26,5500
Gw_revap	0,0725
Gw_qmn	851,6666
Rchrg_Dp	0,4833
Revapmn	0,4833
Ssubbsn	-0,6500
Sol_Alb	0,8433
Sol_Awc	-0,4433
Sol_K	0,2300
Sol_Z	-0,0433
Surlag	13,8000

Para analisar o comportamento do modelo, realizou-se, de maneira análoga à modelagem com precipitação observada, a validação do modelo de 1983-1987 (Fig.31).

Figura 31 – Validação do modelo SWAT para o período de 1983 a 1987 utilizando precipitação PERSIANN-CDR



A validação da modelagem com os dados PERSIANN-CDR obteve $R^2 = 0,95$ e $COE = 0,86$. A média da série simulada foi $29,16 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo a diferença para a observada de $7,6 \text{ m}^3/\text{s}$, esta levemente menor que a diferença apresentada na validação com precipitação observada.

Logo, percebe-se que o desempenho do modelo foi muito bom tanto para o período calibrado, quanto para um período de validação.

Os índices estatísticos foram melhores quando utilizada a precipitação estimada, pois os pontos do algoritmo possuem uma melhor espacialização em relação aos pluviômetros. Liu et al. (2017) também constataram isso em uma bacia do Tibete, pois as simulações de vazão foram melhores com os dados do algoritmo do que com os dados observados.

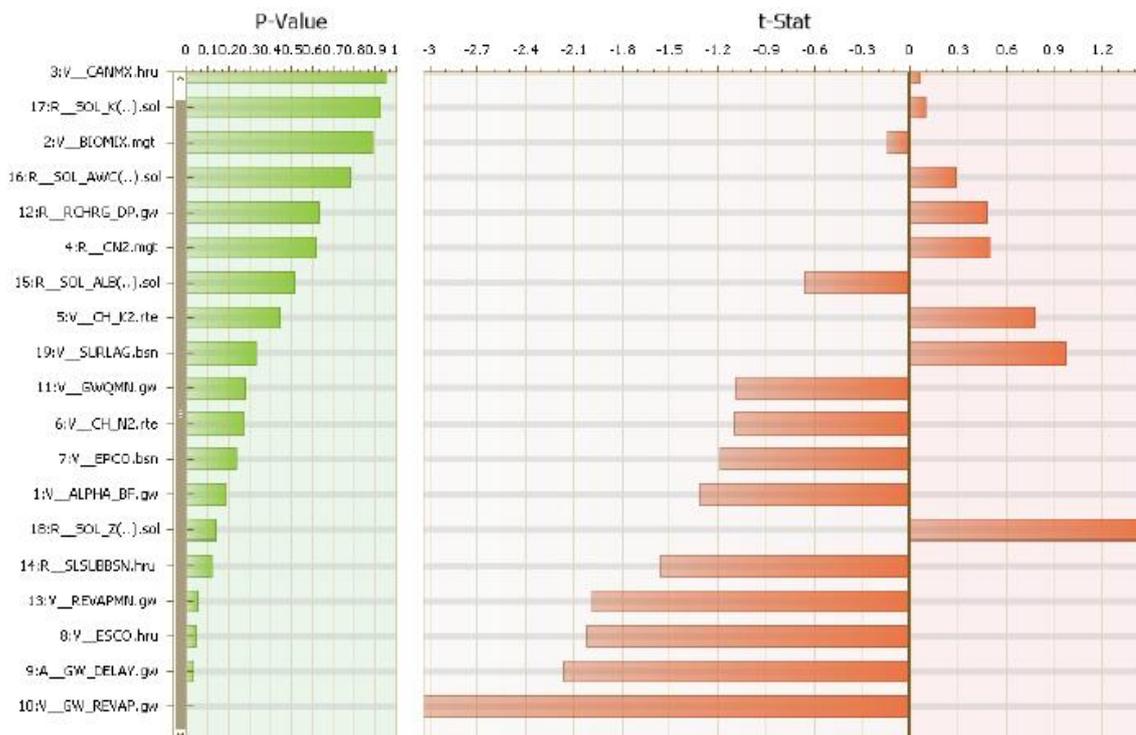
5.3. Análise de sensibilidade da calibração do modelo SWAT utilizando o SWAT-CUP

Para verificar quais os parâmetros são mais sensíveis para o processo de calibração do modelo, foi realizada a análise de sensibilidade dos mesmos, de modo a saber quais eram os mais significativos, mais sensíveis e também a qual fenômeno eles estão associados, seja evapotranspiração, infiltração etc.

O SWAT-CUP dispõe de duas funções para realizar a análise de sensibilidade: *t-stat* e *p-value*. O *t-stat* indica qual parâmetro é o mais sensível, ou seja, quanto maior o valor dessa função, maior a medida de sensibilidade do parâmetro. Já o *p-value* exprime a significância da sensibilidade, quanto mais próximo de 0 for o valor da função, mais significativa para o ajuste do modelo é o parâmetro. A figura 32 mostra o resultado da análise de sensibilidade da calibração do modelo utilizando os dados de precipitação observada.

Os parâmetros mais sensíveis foram Gw_revap, Gw_delay e Revapmn relacionados à presença de água no solo e Esco, referente à perda de água do solo por evaporação. Nota-se que os parâmetros mais sensíveis são também os mais significantes. Enquanto que os menos significantes foram Canmx, que representa a capacidade máxima de acumulo de água nas folhas, e Sol_K, relacionado com a condutividade hidráulica saturada do solo.

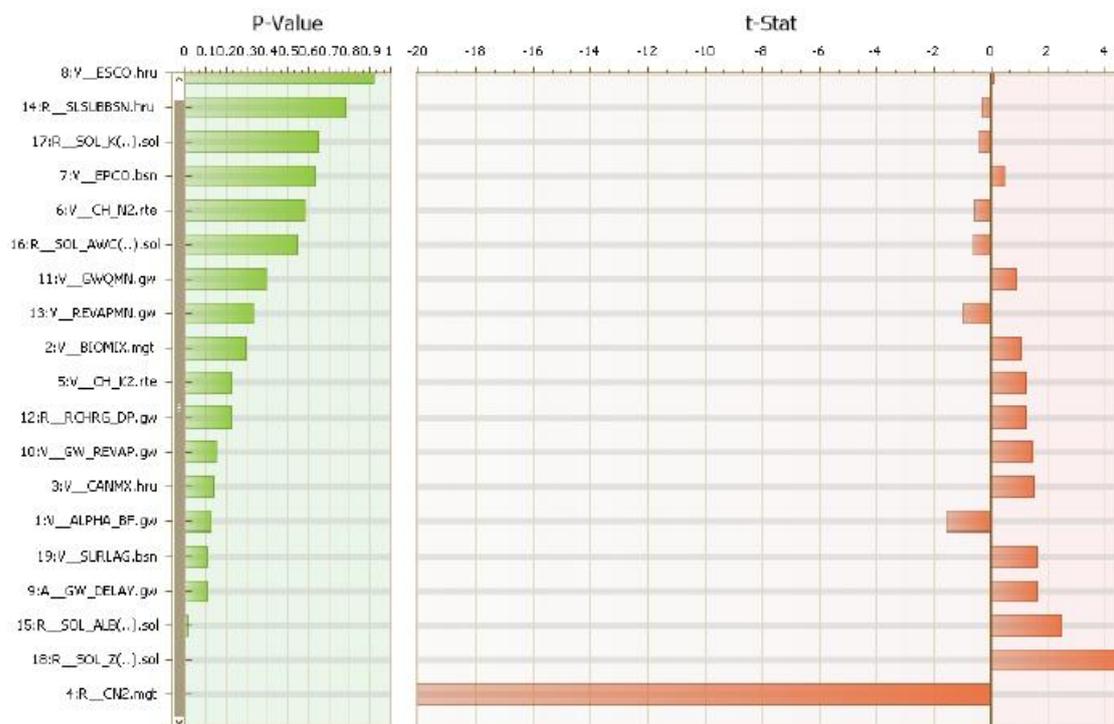
Figura 32 – Análise de sensibilidade do modelo para a modelagem utilizando dados de precipitação observada



Após a calibração do modelo com a precipitação estimada também foi realizada uma nova análise de sensibilidade dos parâmetros, conforme a figura 33.

Ao realizar a modelagem com dados PERSIANN-CDR percebe-se que a sensibilidade dos parâmetros foi alterada. Os mais sensíveis foram o Cn2, relacionado à umidade do solo, o Sol_Z, relacionado às propriedades físicas do solo, e o Sol_Alb, referente à presença de albedo no solo. Nota-se que o parâmetro com menor significância foi o Esco, este que foi um dos mais significantes na modelagem com precipitação observada. O parâmetro Sol_K foi um dos menos significantes nas duas análises de sensibilidade, enquanto que o Canmx, que foi o menos significativo na modelagem com dados observados, teve um aumento de sua significância na modelagem com precipitação estimada. O oposto ocorreu com o parâmetro Slsubbsn, referente às características topográficas do terreno, que teve significância bastante inferior na modelagem com precipitação estimada.

Figura 33 – Análise de sensibilidade do modelo para a modelagem utilizando dados PERSIANN-CDR



6. CONCLUSÃO

Com base no exposto, conclui-se que os dados de precipitação PERSIANN-CDR não apresentaram um desempenho satisfatório quando comparados aos dados observados em escala diária. Segundo Moriasi et al. (2007), a correlação entre as duas séries foi insatisfatória com R variando de 0,41 – 0,50 e R^2 variando de 0,17 – 0,25. Além de que todos os postos obtiveram $COE < 0,5$, ou seja, insatisfatório.

Em relação à escala mensal, tem-se que a bacia possui dois períodos distintos de precipitação, o período chuvoso de janeiro a abril com precipitação média de 160,32 mm e um período seco de maio a dezembro, com média de 27,90 mm. Ao acumular os dados para a escala mensal, o algoritmo conseguiu representar muito bem a sazonalidade da precipitação da BHRP, com valores médios de R, R^2 e COE de, respectivamente, 0,98, 0,96 e 0,91. Com exceção do posto Imaculada, todos os postos obtiveram um desempenho considerado muito bom (MORIASI et al., 2007).

Na escala anual, o algoritmo conseguiu representar com confiança os anos chuvosos e os secos com pequena diferença entre os totais anuais das duas séries, média de 43,72 mm. O desempenho dos índices estatísticos foi um pouco inferior que a análise mensal, porém melhor que a diária. Com exceção de 4 postos mencionados, os demais obtiveram desempenho de satisfatório a bom em relação ao COE. Em relação ao R e ao R², o desempenho variou de satisfatório a muito bom. O índice de concordância médio, tanto na escala mensal quanto na anual, foi de 0,99, ou seja, próximo do ajuste perfeito.

Em relação às estimativas de vazão, observa-se que as vazões simuladas resultantes das calibrações tanto com dados de precipitação observada, quanto com dados de precipitação estimada obtiveram ótimos desempenhos, com valores de R² e COE maiores que 0,80. Isso também ocorreu no período utilizado para validação do modelo. Ashouri et al. (2016) também confirmaram a acurácia do PERSIANN-CDR em modelagem chuva-vazão em bacias experimentais nos Estados Unidos, pois a vazão simulada com dados desse algoritmo teve um bom ajuste em relação à observada em todo o período estudado.

Na modelagem com a precipitação estimada e os parâmetros otimizados a partir da precipitação observada, o desempenho do modelo foi inferior, pois, como visto, a precipitação à nível diário não teve uma boa correlação. Logo, não é uma alternativa adequada utilizar a precipitação do PERSIANN-CDR com parâmetros calibrados para pluviômetros, o ideal é calibrar ambos.

A análise de sensibilidade mostrou que os parâmetros de maior significância mudaram quando alterada a série de precipitação utilizada na modelagem. Na modelagem com dados observados, os parâmetros mais significantes e sensíveis foram os relacionados à presença e à perda de água no solo, enquanto que na modelagem com chuva estimada pelo algoritmo, foram os relacionados às características físicas do solo e a sua umidade. Além disso, nota-se que alguns parâmetros que apresentaram alta significância em uma modelagem, foram insignificantes na outra, como por exemplo: Esco, Canmx e Ssubbsn.

Por fim, conclui-se que o PERSIANN-CDR conseguiu representar os períodos chuvosos e secos, bem como os anos, da BHRP e fornecer médias mensais e totais anuais muito próximos dos observados. Esse algoritmo se mostra como uma opção bastante confiável de dados de precipitação para utilização em modelagem hidrológica, gerando vazões simuladas com comportamentos e valores semelhantes aos observados, sendo, portanto, uma boa fonte alternativa de dados, principalmente em regiões com dados observados escassos.

7. REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K.C. (2012). SWAT-CUP2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – a user manual. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, 103p.

ABBASPOUR, K.C.; JOHNSON, A.; VAN GENUCHTEN, M.Th. (2004). Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, 3(4), 1340-1352.

AESA. Agência Executiva de Gestão de Águas do Estado da Paraíba. (2019). Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/>>. Acesso em: 26 de mar. 2019.

ANA. Agência Nacional de Águas. (2016). Plano de recursos hídricos Piancó-Piranhas-Açu.

ANA. Agência Nacional de Águas. (2018). Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. 2018. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/>>. Acesso em: 10 de dez. 2018.

ARNOLD, J.G. et al. (2012). SWAT: model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, St. Joseph, v.55, n.4, p.1491-1508.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: model development. *JAWRA*, v.34. n.1, p. 73-89.

ASHOURI, H.; HSU, K.; SOROOSHIAN, S.; BRAITHWAITE, D.K.; KNAPP, K.R.; CECIL, L.D.; NELSON, B.R.; PRAT, O.P. (2015). PERSIANN-CDR daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies. *American Meteorological Society*, p. 69 – 83.

ASHOURI, H.; NGUYEN, P.; THORSTENSEN, K.H.; SOROOSHIAN, S.; BRAITHWAITE, D. (2016). Assessing the efficacy of high-resolution satellite-based PERSIANN-CDR precipitation product in simulating streamflow. *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 17, p. 2061 – 2076.

BEASLEY, D. B.; HUGGINS, L. F.; MONKEY, E. J. (1980). ANSWERS: A model for watershed planning, Transactions of the ASABE, St. Joseph, v.23, p.938–944.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. (2005) Conservação do solo. 5ª edição, São Paulo: Ícone, 355 p.

BONUMÁ, N.B.; ROSSI, C.G.; ARNOLD, J.G.; REICHERT, J.M.; MINELLA, J.P.; ALLEN, P.M.; VOLK, M. (2012). Simulating Landscape Sediment Transport Capacity by Using a Modified SWAT Model. Journal of Environmental Quality, special section: applications of the SWAT model: 1-12.

BORAH, Deva K.; KRUG, E. C.; YODER, D. (2007). Watershed Sediment Yield. In: Sedimentation Engineering. American Society of Civil Engineers, 827-858p.

BORDAS, M. P.; SEMMELMANN, F. R. (2014). Elementos de engenharia de sedimentos. In: TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 2. ed. Porto Alegre: Editora Universitária da UFRGS/ABRH, p. 915-943.

BRANCO, A.O.T.C. (2017). Análise da Conectividade da paisagem no baixo curso do Rio Piancó-Pombal-Semiárido Paraibano. UFPB.

BRASILEIRO, R. S. (2009). Alternativas de desenvolvimento sustentável no semiárido nordestino: Da degradação à conservação. Scientia Plena, v.5, p.1-12.

CARVALHO, N. de O (2008). Hidrossedimentologia prática. Interciência. 600p. 2ª Edição. Rio de Janeiro, 2008.

CASSE, C.; GOSSET, M. (2015). Analysis of hydrological changes and flood increase in Niamey based on the PERSIANN-CDR satellite rainfall estimate and hydrological simulations over the 1983 – 2013 period. Proc. IAHS, 370, 117-223.

CHISCI, G.; MORGAN, R.P.C. (1988). Modelling soil erosion by water: why and how. In Morgan, R.P.C. and Rickson, R.J. (eds), Erosion assessment and modelling, pp. 121-146, Commission of the European Communities Report No. EUR 10860 EN.

CHRISTOFOLETTI, A. (1999). Modelagem de sistemas ambientais. 1. ed. São Paulo: Blucher, 1999, 236 p.

CHRS - Center for Hydrometeorology and Remote Sensing. (2018). University of California, Irvine. Disponível em: < <http://chrsdata.eng.uci.edu/> >. Acesso em: 09 de dez. 2018.

CREMONINI, J.; BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N.B.; GRISON, F. (2017). Avaliação do uso de dados de satélite para o cálculo da vazão em uma pequena bacia hidrográfica por meio do modelo SWAT. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH.

DANTAS, J.C. (2016). Processos Hidrossedimentológicos na Bacia do Rio Taperoá. Universidade Federal da Paraíba – UFPB.

DHAR, S.; MAZUMDAR, A. (2009). Hydrological modelling of the Kangsabati river under changed climate scenario: case of study in India. Hydrological Processes, vol 23, 2394 – 2406 pp.

DINGMAN, S. L. (2008). Physical Hydrology. Wavelan Press, 646pp.

DURU, U; ARABI, M.; WOHL, E. (2018) Modeling stream flow and sediment yield using the SWAT model: a case study of Ankara River basin, Turkey, Physical Geography, 39:3, 264-289.

EDUARDO, E. N. (2016). Modelagem hidrossedimentológica na Bacia Hidrográfica do Rio das Mortes, UPGRH-GD02 / Eliete Nazare Eduardo. – Lavras: UFLA.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. (1979). Súmula da X reunião Técnica de Levantamento de Solos. Miscelânea 1, Rio de Janeiro: 1979, 83 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema de Informação de Solos Brasileiros. (2019). Disponível em: < <https://www.bdsolos.cnptia.embrapa.br/> >. Acesso em: 06. de mar.

ESCARIÃO, R.D.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; AZEVEDO, J.R.G.; NETO, A.R. (2012). Influência do modelo hidrológico na avaliação da sensibilidade dos recursos hídricos a cenários de mudanças climáticas em região semiárida. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol.17, n.3, 81-91.

FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS). (1990). Guidelines for soil description. Rome, Italy.

FAOb. (1993). Erosión de suelos en América Latina. Oficina Regional para América Latina y el Caribe. ISBN 92-854-3001-5, 1993. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S00.htm#Contents>

FÉLIX, V.S.; PAZ, A.R. (2016). Representação de processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v.21, n.3, p.556-569.

FERRAZ, F.F.B; MILDE, L.D.E; MORTATI, J. (1999) Modelos hidrológicos acoplados a Sistemas de Informações Geográficas: um estudo de caso. Revista de Ciência & Tecnologia, Piracicaba, v14, PP. 45-56.

FOSTER, G. R. et al. (1981). Estimating erosion and sediment yield on field-sized areas. Transactions of the ASABE, St. Joseph, v.24, p.1253-1263.

FUKUNAGA, D. C. (2012). Estimação de vazão em bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo. 2012. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro.

GADELHA, C.T. (2018). Simulação de cenários hidrológicos utilizando precipitação observada e de reanálise em uma bacia do semiárido com dados escassos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal da Paraíba – UFPB.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. (2007). The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. Transactions of the American Society of Agricultural & Biological Engineers, St. Joseph, v. 50, n. 4, p. 1211-1250.

GRIEBELER, N. P.; PRUSKI, F. F.; JÚNIOR, D. M.; SILVA, D. D. (2001). Avaliação de um modelo para a estimativa da lâmina máxima de escoamento superficial. R. bras. Ci. Solo, Viçosa, v. 25, p. 411-417.

HENRIQUES, I. G. N. (2017). Mudança na cobertura da terra e avaliação dos processos hidrossedimentológicos da bacia representativa de Sumé – PB. Universidade Federal da Paraíba – UFPB.

HILLEL, Daniel (2004). Introduction to Environmental Soil Physics. Elsevier Academic Press, 494 pp.

HONG, Y.; HSU, K. L.; SOROOSHIAN, S.; GAO, X. (2004). Precipitation Estimation from Remotely Sensed Imagery Using an Artificial Neural Network Cloud Classification System. *J. Appl. Meteor.*, v. 43, n. 12, p. 1834-1853.

HORNBERGER, G. M. (1998). Elements of Physical Hydrology. The John Hopkins University Press, 302 pp.

HUDSON, N. (1981). Soil Conservation. Cornell University Press. Ithaca, New York, 324 p.

HUFFMAN, G.J.; ADLER, R.F.; BOLVIN, D.T.; GU, G.; NELKIN, E.J.; BOWMAN, K.P.; HONG, Y.; STOCKER, E.F.; WOLFF, D.B. (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, v. 8, n. 1, p. 38-55.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2001). Mapa de Solos do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2010. (2018). Disponível em: < <http://www.censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 10 dez. 2018.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. (2018). Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. 2018. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep> >. Acesso em: 10 de dez. 2018.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (2019). TOPODATA. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>. Acesso em: 06 de mar. 2019.

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

JOYCE, R.J.; JANOWIAK, J.E.; ARKIN, P.A.; XIE, P. CMORPH. (2004). A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology*, vol.5, p. 487 – 503.

LELIS, T. A. (2011). Modelagem do escoamento superficial e perda de solo na bacia do ribeirão São Bartolomeu, Zona da Mata de Minas Gerais, utilizando o simulador SWAT. Universidade Federal de Viçosa.

LENHART, T.; ECKHARDT, K.; FOHRER, N.; FREDE, H. G. (2002). Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Physics and Chemistry of the Earth*. Vol. 27, pp 645-654.

LIERSCH, S. (2003a). The Programs dew.exe and dew02.exe: user's manual. Berlin.

LIERSCH, S. (2003b). The Program pcpSTAT: user's manual. Berlin.

LIU, J.; DUAN, Z.; JIANG, J. ZHU, A. (2015). Evaluation of Three Satellite Precipitation Products TRMM 3B42, CMORPH, and PERSIANN over a Subtropical Watershed in China. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Meteorology*, v.2015, p.1-13.

LIU, X.; YANG, T.; HSU, K.; LIU, C.; SOROOSHIAN, S. (2017). Evaluating the streamflow simulation capability of PERSIANN-CDR daily rainfall products in two river basins on the Tibetan Plateau. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 169-181.

MACHADO, R. E. (2002). Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. Tese de doutorado. Escola superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. 152 pp.

MELO, H. A.; NÓBREGA, R. L. B.; RUFINO, I. A. A. (2008). Interfaces de integração entre modelos hidrológicos e sistemas de informação geográfica (SIG): avanços e desafios. In: IV Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, 2008, Aracaju. Anais do IV SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO;

MELO NETO, J.O. et al. (2014). Simulação Hidrológica Escalar com o Modelo SWAT. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v.19, n.1, p.177-188, Jan./Mar.

MIAO, C; ASHOURI, H.; HSU, K.; SOROOSHIAN, S.; DUAN, Q. (2015). Evaluation of the PERSIANN-CDR daily rainfall estimates in capturing the behavior of extreme precipitation events over China. *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 16, p. 1387-1396.

MINELLA, J. P. G. (2003). Identificação de fontes de produção de sedimentos em uma pequena bacia rural. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 73 pp.

MONTEIRO, J. A. F. et al. (2015). Accuracy of grid precipitation data for Brazil: application in river discharge modelling of the Tocantins catchment. *Hydrology Process*, v.30, n.9, p.1419-1430. Wiley-Blackwell.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the American Society of Agricultural & Biological Engineers*, St. Joseph, v. 50, n. 3, p. 885-900.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models I: a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, v. 10, n.1, p. 282-290.

NAZARIO, A.A.; MORAES, W.B.; MADALÃO, J.C.; BRAGANÇA, H.N.; GONÇALVES, I.Z.; GARCIA, G.O. (2007). Avaliação da condutividade elétrica de um argissolo irrigado com água salina em diferentes profundidades. XI Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba, p. 2213-2216.

NEARING, M. A. et al. (1989). A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. *Transactions of the ASABE*, St. Joseph, v.32, p.1587-1593.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. (2009). Soil and Water Assessment Tool: Theoretical documentation - version 2009. Temple: Texas A&M University, 2011, 618 p.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J.R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J.R. (2005). Soil and water assessment tool: Theoretical documentation - Version 2005. Temple, TX: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service. 476 pp.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J.R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J.R. (2002). Soil and water assessment user's manual - Version 2000. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service e Blackland Research Center- Texas Agricultural Experiment Station. 412 pp.

NETO, J. G. C. (2011). Simulação hidrossedimentológica da bacia do Riacho dos Namorados com o modelo SWAT. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

NRCS. Natural Resources Conservation Service. (2009). Chapter 7: Hydrologic Soil Groups. In: NRCS. Natural Resources Conservation Service. National Engineering Handbooks Hydrology Chapters (Part 630). Washington, DC: USDA, p. 1-5.

OLIVEIRA, L. F. C.; CORTÊS, F. C.; BARBOSA, F. O. A.; ROMÃO, P. A.; CARVALHO, D. F. (2000). Estimativa das Equações de Chuvas Intensas para Algumas Localidades no Estado de Goiás Pelo Método da Desagregação de Chuvas. Pesquisa Agropecuária Tropical. Vol. 20, pp 23- 27.

PAES, J. L. A.; RUIZ, H. A.; FERNANDES, R. B. A.; FREIRE, M. B. G. S.; BARROS, M. F. C.; ROCHA, G. C. (2013). Dispersão de argilas em solos afetados por sais. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 17, n. 11, p. 1135-1142.

PAZ, A.R. (2004). Hidrologia aplicada. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERS.

PRADO, T. B. G. (2005). Evolução do uso das terras e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Jundiá-Mirim. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico de Campinas. 72 pp.

PULLAR, David; SPRINGER, Darren (2000). Toward integrating GIS and catchment models. Environmental Modelling and Software 15, PP 451-459.

RAUDIKIVI, A. J. (1976). Loose Boundary Hydraulics. Pergamon International. 2ª Edição. 397pp.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; SAXTON, K. E. (1982). Estimation of Soil Water Properties. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, v. 25, n. 5, p. 1316-1328.

RENNÓ, C. D. (2003) Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas. Tese (doutorado). São José dos Campos: INPE, 148p.

ROCHA, E. O. de. (2013). Estudo ambiental integrado de processos hidrossedimentológicos e nutrientes na bacia hidrográfica do rio Piranga utilizando o SWAT. 2013. 78 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ROFFE, T. G. (2012). Dinâmica da produção de sedimentos devido a mudanças no uso da terra: estudo de caso na bacia de Chambas, província Ciego de Ávila, Cuba. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.

SAGHAFIAN, Bahran; LIESHOUT, Arno m. van; RAJAEI, Hossein M. (2000). Distributed catchment simulation using raster GIS. JAG, v2, PP 199-203.

SALTER, P. J.; WILLIAMS, J. B. (1967). The influence of texture on the moisture characteristics of soils. IV: A method of estimating the available-water capacities of profiles in the field. Journal of Soil Science, v. 18, n. 1, p. 174-181.

SALTER, P. J.; WILLIAMS, J. B. (1969). The influence of texture on the moisture characteristics of soils. V: Relationships between particle-size composition and moisture contents at the upper and lower limits of available-water. Journal of Soil Science, v. 20, n. 1, p. 126-131.

SAMPAIO, E. V. S. B. SAMPAIO; Y. VITAL, T. ARAÚJO, M. S. B. SAMPAIO, G. V. (2003). Desertificação no Brasil- Conceitos, núcleos e tecnologias de recuperação e convivência.

SAMPAIO, E. V. S. B.; ARAÚJO, Maria do Socorro B.; SAMPAIO, Yony S.B. (2005). Impactos ambientais da agricultura no processo de desertificação no Nordeste do Brasil. Revista de Geografia. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. 22, nº 1, jan/jun.

SANTOS, J. Y. G. (2015). Análise espaço-temporal de processos hidrossedimentológicos na bacia do Rio Tapacurá (Pernambuco, Brasil). 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE.

SANTOS, J.Y.G.; SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G. (2014). Aplicação do modelo SWAT para a estimativa da produção de sedimentos na bacia do Rio Tapacurá, Pernambuco. XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Conference Paper, dez. 2014.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 70, 2006, p. 1569-1578.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. (2003). *Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas*. 1. ed. São Carlos: RiMa, 140 p.

SILVEIRA, A. L. L. (1993). Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: Tucci, C. E. M. *Hidrologia – Ciência e aplicação/ organizado por Carlos E. M. Tucci*. – Porto Alegre: Ed. da Universidade: abrh: edusp, 1993.943 p.

SOUSA, R.F.; BARBOSA, M.P.; GUIMARÃES, C.L.; CARVALHO, A.P. (2007). Avaliação das classes de cobertura vegetal e mapeamento do uso atual dos solos no município de Itaporanga-PB. *Engenharia Ambiental – Espírito Santo do Pinhal*, v.4, n.1, p.080-088, jan/jun 2007.

SOUZA, W.V. (2016). Universidade Federal de Juiz de Fora – MG. *Aplicações Do Modelo Swat No Brasil: Revisão E Estudo De Caso – Amazônia*, 2016.

SRINIVASAN, R. e ARNOLD, J. G. (1994). Integration of the basin-scale water quality model with GIS. *Water Resources Bulletin*, v.30, n.03, p.453-462.

SRINIVASAN, V. S.; PAIVA, F. M. L. (2009). Regional validity of the parameters of a distributed runoff-erosion model in the semi-arid region of Brazil. *Science in China Series E: Technological Sciences*, v. 52, n. 11, 2009, p. 3348-3356.

SUDENE. (1996). *Pacto Nordeste: ações estratégicas para um salto do desenvolvimento regional*. Recife, 1996. 77p.

SUGUIO, K. (2003). *Geologia sedimentar*. Editora Edgard Blücher, São Paulo, 2003, 400p.

TSVETSINSKAYA, E. A.; SCHAAF, C. B.; GAO, F.; STRAHLER, A. H.; DICKINSON, R. E.; ZENG, X.; LUCHT, W. (2002). Relating MODIS-derived surface albedo to soils and rock types over Northern Africa and the Arabian peninsula. *Geophysical Research Letters*, v. 29, n. 9, p. 67-1-67-4.

TUCCI, C. E. M. (1998). *Modelos Hidrológicos*. Porto Alegre: Ed. Universidade: UFRGS; Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 943 pp.

TUCCI, C. E. M. (2005). *Modelos hidrológicos*. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 678 p.

TUCCI, C. E. M. (2009). Hidrologia: ciência e aplicação. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – ABRH. 4ª Edição. Porto Alegre, 943 p.

UZEIKA, Talita (2009). Aplicabilidade do Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em pequena bacia hidrográfica rural. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 144p.

WIGMOSTA, M.; VAIL, L. W.; LETTENMAIER, D. P. (1994). A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resources Research*, 30:1665-1679.

WILLIAMS, J. R. (1975). Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor, In: *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources*. Washington D.C.: USDA, p. 244–252.

WILLIAMS, J.R. (1975). Sediment routing for agricultural watersheds. *Water Resources Bulletin*, v.11, n.5, p.965-974.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C.M. (1985). Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, v. 90, n. C5, p. 8995- 9005.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. (1978) Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. Washington D.C., USDA, Agriculture Research Service. 58p. (Agriculture Handbook, 735).

ZHANG, Y.; DEGROOTE, J.; WOLTER, C.; SUGURUMARAN, R. (2009). Integration of Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) Into a GIS Framework to Assess Soil Erosion Risk. *Land Degradation and Development*. Vol 20, 84-94 pp.

APÊNDICE A – Banco de dados de solos

SNAM	CAM	ARG	NEO	LUV
NLAYERS	3	6	3	3
HYDGRP	B	B	B	B
SOL_ZMX	1900	1800	400	600
ANION_EXCL	0,398	0,398	0,453	0,464
SOL_CRK	0,5	0,5	0,5	0,5
TEXTURE	FRANCO- ARGILO- ARENOSA	FRANCO- ARENOSA COM CASCALHO	FRANCA CASCALHENTA	FRANCO- ARGILOSA
SOL_Z1	100	170	90	150
SOL_BD1	1,48	1,33	1,46	1,47
SOL_AWC1	1,5	1,82	1,35	1,66
SOL_K1	0,43	2,59	1,32	2,59
SOL_CBN1	11	10	11,8	7,3
CLAY1	24	12	17	14
SILT1	22	16	33	22
SAND1	54	72	50	64
ROCK1	1	14	18	46
SOL_ALB1	0,227	0,196	0,302	0,196
USLE_K1	0,12	0,117	0,132	0,127
SOL_EC1	0,23	3,03	5,65	0,25
SOL_Z2	1400	280	340	450
SOL_BD2	1,48	1,42	1,45	1,29
SOL_AWC2	1,5	1,92	1,35	1,93
SOL_K2	0,43	0,15	1,32	0,06
SOL_CBN2	3,8	6,5	4,5	5,5
CLAY2	32	26	22	59
SILT2	16	14	31	19
SAND2	52	60	47	22
ROCK2	1	9	32	0
SOL_ALB2	0,227	0,196	0,302	0,196
USLE_K2	0,108	0,108	0,128	0,099
SOL_EC2	0,23	3,03	5,65	0,25
SOL_Z3	1900	550	400	600
SOL_BD3	1,47	1,41	1,48	1,44
SOL_AWC3	1,5	1,92	1,35	2,51
SOL_K3	0,43	0,15	2,59	1,32
SOL_CBN3	2,3	4,3	2,3	2,5
CLAY3	29	30	13	25
SILT3	22	18	17	32
SAND3	49	52	70	43
ROCK3	2	8	35	3
SOL_ALB3	0,227	0,196	0,302	0,196
USLE_K3	0,117	0,111	0,121	0,126
SOL_EC3	0,23	3,03	5,65	0,25

SNAM	CAM	ARG	NEO	LUV
SOL_Z4	0	1000	0	0
SOL_BD4	0	1,43	0	0
SOL_AWC4	0	1,92	0	0
SOL_K4	0	0,15	0	0
SOL_CBN4	0	2,3	0	0
CLAY4	0	32	0	0
SILT4	0	17	0	0
SAND4	0	51	0	0
ROCK4	0	12	0	0
SOL_ALB4	0	0,196	0	0
USLE_K4	0	0,109	0	0
SOL_EC4	0	3,03	0	0
SOL_Z5	0	1400	0	0
SOL_BD5	0	1,48	0	0
SOL_AWC5	0	2,51	0	0
SOL_K5	0	0,32	0	0
SOL_CBN5	0	1,5	0	0
CLAY5	0	18	0	0
SILT5	0	30	0	0
SAND5	0	52	0	0
ROCK5	0	14	0	0
SOL_ALB5	0	0,196	0	0
USLE_K5	0	0,14	0	0
SOL_EC5	0	3,03	0	0
SOL_Z6	0	1800	0	0
SOL_BD6	0	1,55	0	0
SOL_AWC6	0	1,9	0	0
SOL_K6	0	0	0	0
SOL_CBN6	0	1	0	0
CLAY6	0	16	0	0
SILT6	0	18	0	0
SAND6	0	66	0	0
ROCK6	0	14	0	0
SOL_ALB6	0	0,196	0	0
USLE_K6	0	0,148	0	0
SOL_EC6	0	3,03	0	0

APÊNDICE B – Gerador climático utilizado (WGEN)

Parâmetro	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
TMPMX	33,44	32,78	32,46	32,16	31,93	31,95	32,32	33,2	33,91	34,44	34,61	33,88
TMPMN	21,73	21,49	21,53	21,46	20,92	20,02	19,83	20,25	20,86	21,33	21,7	21,49
TMPSTDMX	1,209	1,661	1,469	1,433	1,761	1,489	1,711	0,722	1,114	0,568	0,769	0,874
TMPSTDMN	1,333	1,082	1,128	1,228	1,110	1,294	1,471	1,833	1,811	2,445	1,941	1,836
PCPMM	148,8	142,6	193,7	158,8	119,2	59,6	50,6	49,2	50,0	49,9	43,6	84,3
PCPSTD	12,08	11,59	12,91	10,87	11,06	4,63	2,59	1,96	1,67	3,18	2,78	5,60
PCPSKW	5,207	4,894	4,112	4,206	9,401	10,294	4,407	2,965	1,094	10,122	7,499	7,783
PR_W1	0,245	0,327	0,393	0,372	0,239	0,163	0,121	0,073	0,022	0,045	0,048	0,143
PR_W2	0,806	0,784	0,802	0,776	0,806	0,794	0,824	0,893	0,948	0,914	0,902	0,895
PCPD	18,45	18,21	21,97	19,9	18,45	14,55	14,52	15,45	15,86	14,07	12,62	19,45
RAINHHMX	45,00	40,60	38,80	40,73	64,20	30,17	9,03	8,00	6,20	17,87	12,67	24,80
SOLARAV	26,23	26,07	24,96	22,83	20,66	19,69	20,58	22,74	24,95	25,94	26,14	25,97
DEWPT	21,69	21,59	21,82	21,84	21,04	19,65	18,75	18,97	19,62	20,25	20,7	21,24
WNDVAV	1,975	1,781	1,665	1,606	1,743	2,184	2,636	3,033	2,924	2,750	2,556	2,489