



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE  
NÚCLEO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

MARIA ALICE BRITTO FEITOZA

**APLICAÇÃO DE MODELO DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA COM  
REGIONALIZAÇÃO DE PARÂMETROS PARA REGIÕES SEMIÁRIDAS**

Caruaru

2021

MARIA ALICE BRITTO FEITOZA

**APLICAÇÃO DE MODELO DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA COM  
REGIONALIZAÇÃO DE PARÂMETROS PARA REGIÕES SEMIÁRIDAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

**Área de concentração:** Tecnologia Ambiental.

**Orientador:** Prof<sup>o</sup>. Dr. José Almir Cirilo.

Caruaru  
2021

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária – Paula Silva - CRB/4 - 1223

F311a Feitoza, Maria Alice Britto.  
Aplicação de modelo de simulação hidrológica com regionalização de parâmetros para regiões semiáridas. / Maria Alice Britto Feitoza. – 2021.  
144 f.; il.: 30 cm.

Orientador: José Almir Cirilo.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia Civil e Ambiental, 2021.  
Inclui Referências.

1. Regionalismo. 2. Ciclo hidrológico. 3. Modelos de simulação. 4. Hidrologia – Brasil, Nordeste. 5. Clima de regiões áridas – Brasil, Nordeste. I. Cirilo, José Almir (Orientador). II. Título.

CDD 620 (23. ed.) UFPE (CAA 2021-010)

MARIA ALICE BRITTO FEITOZA

**APLICAÇÃO DE MODELO DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA COM  
REGIONALIZAÇÃO DE PARÂMETROS PARA REGIÕES SEMIÁRIDAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Aprovada em: 26/02/2021.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Profº. Dr. José Almir Cirilo (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profº. Dr. Artur Paiva Coutinho (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profº. Dr. Carlos de Oliveira Galvão (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Campina Grande

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador José Almir Cirilo que sempre foi para mim uma referência de profissional e ser humano, não medindo esforços para contribuir com o desenvolvimento da ciência e conhecimento dos seus alunos.

À Prefeitura de Caruaru, por junto à UFPE/FADE proporcionar o desenvolvimento do Projeto Instrumentos para a Gestão Territorial do Município de Caruaru, do qual sou bolsista.

A todos os professores do programa que de alguma forma contribuíram para o meu aprendizado e aprimoramento pessoal.

A todos os meus colegas de classe pelos bons momentos de convívio. Em especial para as minhas amigas Thaise Suanne e Sabrina Corrêa, que tornaram essa jornada mais alegre, e por todo incentivo e companheirismo ao longo desse período.

Agradeço aos alunos de iniciação científica Noemy Xavier e Maurício Macedo por todo auxílio. Vocês foram essenciais para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Agradeço aos meus pais, Maria do Carmo Britto e José Maria Feitoza, por sempre me apoiarem em todas as minhas decisões de vida. Permanecendo calmos e confiantes na minha capacidade. Ao meu irmão, Gabriel Britto, que é minha companhia mais antiga e fiel, amenizando o peso da jornada da vida.

Agradeço à minha avó, que sempre foi suporte para toda a família. Que sempre estende a mão ao próximo. Agradeço por tudo.

A Airton César, pela atenção, ajuda e apoio em todos os momentos.

Por fim, agradeço à todas as pessoas que de alguma forma contribuíram ou participaram dessa etapa da minha vida.

Como as ondas no mar. Todas são água salgada. Causas e condições formam uma determinada onda. Ela pode se considerar separada do oceano? A onda tem começo, meio e fim. Entretanto, conforme tenha se comportado enquanto onda, criará causas e condições para a onda seguinte. Já não é mais a mesma, mas também não está separada da água do mar (COEN, 2015, p. 22).

## RESUMO

A região semiárida é caracterizada pela ocorrência de eventos extremos, principalmente as secas. O seu clima é responsável pela variação dos demais elementos da paisagem, como o solo e vegetação, e apresenta características marcantes como a irregularidade das precipitações, elevadas temperaturas e o déficit hídrico. Buscando suprir a necessidade de um modelo hidrológico específico para esse tipo de região surgiu o Campus Agreste *Watershed Model* Versão IV, que é um modelo conceitual do tipo chuva-vazão de simples utilização e com poucos parâmetros calibráveis, que pode ser utilizado no processo de regionalização associado às suas simulações. Este modelo utiliza técnicas de geoprocessamento para obtenção de parâmetros físicos das bacias: característica que, associada às citadas anteriormente, o tornam potencialmente uma ferramenta para os órgãos responsáveis pelo gerenciamento dos recursos hídricos da região. O objetivo principal desse trabalho é a aplicação do modelo CAWM IV a parte da região semiárida, utilizando o processo de regionalização de parâmetros do modelo para dar suporte à transferência de dados entre as bacias. A área de estudo abrange a região semiárida dos estados do Ceará, Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte, totalizando 45 sub-bacias delimitadas a partir de postos fluviométricos. Foram obtidos os dados hidrológicos e físicos de cada uma das sub-bacias em estudo. Para os dados hidrológicos foram utilizadas rotinas de programação desenvolvidas em linguagem Python para realizar o processamento e tratamento dos mesmos. Já para os dados físicos, foram utilizadas ferramentas de geoprocessamento presentes no *software* QGIS associadas a bancos de dados. Por fim, foram realizadas calibrações, validações e regionalização de parâmetros para verificar a adequação do modelo, que se mostrou eficiente e com resultados satisfatórios, comparando-se com resultados de outro modelo para a mesma região em estudo.

Palavras-chave: Regionalização de parâmetros de modelos hidrológicos. CAWM. Hidrologia de regiões semiáridas.

## ABSTRACT

The semi-arid region is characterized by the occurrence of extreme events, mainly droughts. Its climate is responsible for the variation of the other elements of the landscape, such as soil and vegetation, and it presents remarkable characteristics such as the irregularity of the precipitation, high temperatures and the water deficit. Seeking to supply the need for a specific hydrological model for this type of region, the Campus Agreste Watershed Model Version IV emerged, which is a conceptual model of the rain-flow type of simple use and with few calibrable parameters, which can be used in the regionalization process associated with your simulations. This model uses modern geoprocessing techniques to obtain physical parameters of the basins: this characteristic associated with those mentioned above, make it potentially an important tool for the bodies responsible for managing the region's water resources. The main objective of this work is the application of the CAWM IV model in some states in the semiarid region, using the regionalization process as a way of transferring data between the basins. The study area covers the semiarid region of the states of Ceará, Paraíba, Pernambuco and Rio Grande do Norte, totaling 45 sub-basins delimited from fluvimetric stations. Hydrological and physical data were obtained for each of the sub-basins under study. For hydrological data, programming routines developed in Python were used to process and treat them. For the physical data, geoprocessing tools present in the QGIS software associated with databases were used. Finally, calibrations, validations and regionalization of parameters were carried out to verify the adequacy of the model, which proved to be efficient and with satisfactory results, compared with results from another model for the same region under study.

Keywords: Regionalization of hydrological model parameters. CAWM. Hydrology of semi-arid regions.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Diagrama 1 -	Diagrama do modelo GR4J Model .....	27
Diagrama 2 -	Esquema do modelo MODHAC .....	29
Diagrama 1 -	Esquema do modelo SMAP .....	30
Figura 1 -	Representação do modelo CAWM Versão IV .....	32
Figura 2 -	Ônibus espacial com antena principal situada no compartimento de carga no fim de um mastro de 60 m .....	42
Mapa 1 -	Mapa final de cobertura SRTM .....	43
Mapa 2 -	Áreas onde foram feitos os primeiros levantamentos com LiDAR em Pernambuco .....	44
Mapa 3 -	Mapa de localização da área de estudo .....	50
Mapa 4 -	Relevos da área de estudo .....	51
Mapa 5 -	Mapa altimétrico da área de estudo .....	52
Mapa 6 -	Bacias hidrográficas da área de estudo .....	54
Mapa 7 -	Sub-bacias delimitadas .....	55
Mapa 8 -	Sub-bacias em que a área de estudo está abrangida .....	56
Mapa 9 -	Vegetação da Área de Estudo .....	58
Mapa 10 -	Isoietas de Precipitações Médias Anuais .....	60
Mapa 11 -	Mapa de solos da área de estudo .....	61
Mapa 12 -	Classificação hidrológica de acordo com o uso e ocupação do solo .....	62
Fluxograma 1 -	Modelo CAWM .....	65
Mapa 13 -	Postos pluviométricos da área de estudo .....	68
Mapa 14 -	Polígono de Thiessen e estações pluviométricas da estação Jaguaribe .....	69
Mapa 15 -	Raster com MDE sem depressões .....	76
Mapa 16 -	Raster com direção de drenagem da bacia do Rio Pajeú .....	76
Mapa 17 -	Rede de drenagem da bacia do Rio Pajeú .....	77
Mapa 18 -	Raster com delimitação da sub-bacia de Floresta .....	77
Mapa 19 -	Delimitação da sub-bacia de Floresta e rede de drenagem vetorizados .....	78
Mapa 20 -	Regiões homogêneas .....	79

Gráfico 1 -	Região homogênea 1 .....	80
Gráfico 2 -	Região homogênea 2 .....	81
Gráfico 3 -	Região homogênea 3 .....	82
Gráfico 4 -	Região homogênea 4 .....	83
Gráfico 5 -	Região homogênea 5 .....	84
Gráfico 6 -	Região homogênea 6 .....	85
Gráfico 7 -	Boxplot com coeficientes estatísticos resultantes da calibração do modelo CAWM .....	93
Gráfico 8 -	Boxplot com coeficiente Pbias resultante da calibração do modelo CAWM .....	93
Figura 3 -	Hidrograma da estação Icó .....	97
Figura 4 -	Hidrograma da estação Peixe Gordo para evento de 03/01/1987 a 02/01/1988 .....	99
Figura 5 -	Hidrograma da estação de Mossoró .....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Postos pluviométricos em estudo .....	66
Tabela 2 -	Postos de Evapotranspiração .....	72
Tabela 3 -	Coeficientes da região homogênea 1 .....	81
Tabela 4 -	Coeficientes da região homogênea 2 .....	82
Tabela 5 -	Coeficientes da região homogênea 3 .....	83
Tabela 6 -	Coeficientes da região homogênea 4 .....	83
Tabela 7 -	Coeficientes da região homogênea 5 .....	84
Tabela 8 -	Coeficientes da região homogênea 6 .....	85
Tabela 9 -	Estatísticas de regressão das regiões homogêneas .....	86
Tabela 10 -	Parâmetros do modelo CAWM IV .....	87
Tabela 11 -	Percentuais da quantidade de eventos com índices estatísticos bons ou aceitáveis .....	89
Tabela 12 -	Classificação de performance de indicadores estatísticos para simulações mensais .....	93

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1	PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA .....	14
1.2	OBJETIVOS .....	16
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>16</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>16</b>
1.3	ESTRUTURA DO TEXTO .....	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>18</b>
2.1	MODELOS HIDROLÓGICOS .....	18
<b>2.1.1</b>	<b>Classificação</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão</b> .....	<b>21</b>
2.2	REGIONALIZAÇÃO DE PARÂMETROS HIDROLÓGICOS .....	21
<b>2.2.1</b>	<b>Proximidade espacial</b> .....	<b>24</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Regionalização baseada na similaridade física entre bacias hidrográficas</b> .....	<b>24</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Regionalização baseada na regressão de dados</b> .....	<b>25</b>
2.3	MODELOS HIDROLÓGICOS UTILIZADOS EM REGIÕES SEMIÁRIDAS .....	25
2.4	CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL – CAWM .....	31
<b>2.4.1</b>	<b>CAWM Versão IV</b> .....	<b>32</b>
2.4.1.1	Estrutura do modelo .....	32
2.4.1.2	Parâmetro S .....	37
2.4.1.3	Calibração .....	39
2.5	GEOPROCESSAMENTO E MODELOS HIDROLÓGICOS .....	40
<b>2.5.1</b>	<b>Bases de dados espaciais</b> .....	<b>41</b>
2.5.1.1	Projeto SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) .....	42
2.5.1.2	Projeto Pernambuco Tridimensional .....	43
2.6	INDICADORES ESTATÍSTICOS DE AJUSTE DOS MODELOS .....	45
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>49</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO: REGIÃO SEMIÁRIDA DOS ESTADOS DE PERNAMBUCO, PARAÍBA, CEARÁ E RIO GRANDE DO NORTE ...	49
<b>3.1.1</b>	<b>Localização e generalidades</b> .....	<b>49</b>

<b>3.1.2</b>	<b>Relevo</b> .....	<b>50</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Hidrografia</b> .....	<b>53</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Vegetação</b> .....	<b>57</b>
<b>3.1.5</b>	<b>Clima</b> .....	<b>59</b>
<b>3.1.6</b>	<b>Solos</b> .....	<b>60</b>
<b>3.2</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>63</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Dados hidrológicos</b> .....	<b>65</b>
3.2.1.1	Dados fluviométricos .....	65
3.2.1.2	Dados pluviométricos .....	68
3.2.1.2.1	<i>Chuva Média</i> .....	68
3.2.1.2.2	<i>Método de Clark</i> .....	70
3.2.1.3	Programas de pré-processamento de dados hidrológicos .....	71
3.2.1.4	Dados de Evapotranspiração .....	72
<b>3.3</b>	<b>TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO</b> .....	<b>74</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Tratamento do MDE</b> .....	<b>74</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Subdivisão da bacia</b> .....	<b>74</b>
<b>3.4</b>	<b>DIVISÃO DE REGIÕES HOMOGÊNEAS</b> .....	<b>78</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>80</b>
4.1	REGIÕES HOMOGÊNEAS .....	80
4.2	CALIBRAÇÃO DO MODELO CAWM .....	86
<b>4.2.2</b>	<b>Análise por bacia hidrográfica</b> .....	<b>94</b>
4.2.2.1	Bacia do Rio Acaraú .....	94
4.2.2.2	Bacia Metropolitana .....	96
4.2.2.3	Bacia do Rio Salgado .....	96
4.2.2.4	Bacia dos Sertões de Crateús .....	97
4.2.2.5	Bacia de Serra da Ibiapaba .....	97
4.2.2.6	Bacia do Coreaú .....	98
4.2.2.7	Bacia do Alto Jaguaribe, Médio Jaguaribe e do rio Salgado .....	98
4.2.2.8	Bacia de Banabuiú .....	100
4.2.2.9	Bacia do rio Piranhas .....	100
4.2.2.10	Bacia do rio Paraíba .....	101
4.2.2.11	Bacia do rio Apodi .....	102
4.2.2.12	Bacia do rio Pajeú .....	103

4.2.2.13	Bacia do rio Una .....	103
4.2.2.14	Bacia do rio Moxotó .....	103
4.2.2.15	Bacia do rio Capibaribe .....	104
4.2.2.16	Bacia do rio Ipojuca .....	104
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>105</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>108</b>
	<b>APÊNDICE A – QUANTIDADE DE POSTOS PLUVIOMÉTRICOS USADOS EM CADA SUB-BACIA .....</b>	<b>120</b>
	<b>APÊNDICE B – CURVAS DE PERMANÊNCIA .....</b>	<b>122</b>
	<b>ANEXO A – ALGORITMO MATRIZ_ACCESS_INPUT.PY .....</b>	<b>130</b>
	<b>ANEXO B – ALGORITMO MATRIZ_ACCESS_VAZOES.PY .....</b>	<b>134</b>
	<b>ANEXO C – ALGORITMO CALCULA_INTERVALO_DADOS.PY ...</b>	<b>138</b>
	<b>ANEXO D – ALGORITMO UNIFORMIZAR_SERIE.PY .....</b>	<b>140</b>
	<b>ANEXO E- CHUVA_MEDIA.PY .....</b>	<b>142</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA

A água é essencial à vida e necessária ao desenvolvimento econômico e social. É utilizada para diversas finalidades, como abastecimento humano, de indústrias, dessedentação de animais, irrigação, pesca, geração de energia em hidroelétricas, lazer, dentre outras. Apesar de todos os benefícios, pode trazer prejuízos quando ocorrem eventos extremos, como inundações e secas, causando inúmeras perdas econômicas e as vidas de animais e seres humanos.

A região semiárida brasileira é composta por 1262 municípios, pertencentes aos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Piauí, Maranhão, Bahia e Minas Gerais (SUDENE, 2020). Para Araújo (2011) o fator mais marcante dessa região é o clima, que é responsável pela variação dos demais elementos como o solo, caracterizado por ser pouco desenvolvido. A média pluviométrica anual é de 800mm, com maioria de rios intermitentes e chuvas irregulares. As principais características dessa região são: o déficit hídrico; precipitações irregulares, com períodos de escassez e de elevada pluviosidade; temperaturas elevadas.

A frequência de ocorrência de eventos extremos de seca na região e a crescente demanda pelos usos múltiplos da água sobrecarregam os corpos hídricos existentes e impõem um desafio aos órgãos responsáveis pela gestão dos recursos hídricos.

Para evitar ou amenizar essas situações, é necessário que o gerenciamento dos recursos hídricos seja feito da maneira adequada com a maior exatidão e eficiência possível. Para isso, existem ferramentas que auxiliam a quantificação dos fenômenos do ciclo hidrológico, fornecendo informações necessárias como, por exemplo, os modelos hidrológicos (SILVA, 2002).

Os modelos hidrológicos representam, através de equações matemáticas, os fenômenos que ocorrem no ciclo hidrológico. Esses fenômenos são precipitação, evapotranspiração, interceptação pela cobertura vegetal e reservatórios superficiais, escoamento superficial, escoamento subterrâneo e infiltração. Os mesmos são

classificados em quatro categorias, que são: conceituais e empíricos, concentrados e distribuídos, estocásticos e determinísticos, contínuos e discretos (TUCCI, 2005).

São utilizados para compreender melhor os fenômenos hidrológicos que ocorrem no exutório, preencher falhas existentes em dados hidrológicos, calcular e prever vazões, realizar previsões sobre determinado cenário em estudo e realizar estudos sobre o impacto das modificações do uso do solo (LOU, 2010).

Há uma grande diversidade de modelos hidrológicos, dentre eles, o tipo chuva-vazão. Esse tipo de modelo calcula o fluxo superficial que ocorre na calha dos rios a partir dos dados pluviométricos da bacia hidrográfica em estudo, descrevendo a parte do ciclo hidrológico que ocorre entre esses dois fenômenos (TUCCI, 2005). Alguns exemplos de modelos hidrológicos desse tipo são o HBV Model - *Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning* (BERGSTRÖM, 1976); SMAP - *Soil Moisture Accounting Procedure* (LOPES; BRAGA; CONEJO, 1981); TOPMODEL (BEVEN; KIRKBY, 1979); TOPMO (PERRIN; MICHEL; ANDRÉASSIAN, 2003); Modelo Rio Grande, adaptado de Zhao (1984); GR4J (PERRIN; MICHEL; ANDRÉASSIAN, 2003); MODHAC – Modelo Hidrológico Auto-calibrável (LANNA, 1997); CAWM - *Campus Agreste Watershed Model* (CIRILO *et al.*, 2020).

Diversos autores destacam que a performance dos modelos hidrológicos tende a cair conforme se aumenta a aridez da região, o que gera uma necessidade de investigar melhores representações para essas regiões (CIRILO *et al.*, 2020; PONCELET *et al.*, 2017; PARAJKA *et al.*, 2013; Huang *et al.*, 2016). O CAWM – *Campus Agreste Watershed Model* é um modelo hidrológico conceitual e concentrado desenvolvido na UFPE, buscando suprir a necessidade de modelos hidrológicos específicos para regiões semiáridas, levando em consideração que a maioria dos modelos são desenvolvidos para aplicação geral e adaptados a essas regiões.

As versões IV e V são as usadas atualmente, com a versão V voltada para regiões úmidas e a versão IV para regiões semiáridas. O modelo busca simplificar sua utilização através de poucos parâmetros calibráveis, reduzindo assim, a quantidade de dados necessários para a calibração e simulação, além de objetivar o processo de regionalização de dados entre bacias hidrográficas distintas. Sendo assim, esse modelo pretende suprir a necessidade de modelos hidrológicos de simples utilização e específicos para regiões semiáridas, garantindo também a possibilidade de regionalização de dados, que é útil no caso de dados hidrológicos escassos. A regionalização de dados ou de parâmetros de modelos é importante para o

planejamento de obras hídricas e o gerenciamento dos recursos existentes, suprimindo as lacunas para assegurar mais qualidade aos estudos e projetos em regiões de dados escassos.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral aplicar o modelo hidrológico CAWM IV em bacias hidrográficas presentes na região semiárida brasileira, pertencentes aos estados do Ceará, Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte, realizando a regionalização de parâmetros entre bacias distintas.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Melhorar o conhecimento sobre as bacias hidrográficas a partir da caracterização fisiográfica das regiões estudadas;
- Compreender as semelhanças dos processos hidrológicos entre as bacias;
- Comparar a performance do modelo CAWM IV na regionalização de parâmetros com os de outros modelos.

## 1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

Este trabalho foi organizado em cinco capítulos, além da introdução.

- O segundo capítulo contém o embasamento teórico utilizado no estudo. Discorre sobre modelos hidrológicos, abrangendo sua classificação e modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão; regionalização de parâmetros hidrológicos; modelos hidrológicos utilizados em regiões semiáridas; CAWM, modelo hidrológico utilizado no estudo, descrevendo a versão IV, forma de calibração e obtenção de seus parâmetros; associação entre geoprocessamento e modelos hidrológicos, com explicações sobre as bases de dados espaciais e os projetos SRTM e Pernambuco Tridimensional.

- O capítulo 3 contém os materiais e métodos. Discorre-se sobre a área de estudo, incluindo características como solo, relevo, clima; vegetação, hidrografia e localização; também sobre a metodologia, que abrange a obtenção dos dados hidrológicos, programas de pré-processamento utilizados, as técnicas de geoprocessamento aplicadas aos dados de entrada e à regionalização.
- O capítulo 4 apresenta os resultados em dois tópicos, o de regiões homogêneas e da calibração do modelo;
- O capítulo 5 apresenta as conclusões sobre o trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo são apresentados aspectos gerais dos modelos hidrológicos, sua classificação, modelos do tipo chuva-vazão, regionalização de parâmetros hidrológicos e modelos hidrológicos em regiões semiáridas. São descritos os conceitos de alguns modelos utilizados no Brasil, com maior ênfase sobre o modelo CAWM versão IV utilizado nesta pesquisa. Discute-se ainda a associação entre geoprocessamento e modelos hidrológicos, bases de dados espaciais e indicadores estatísticos utilizados para verificar a adequação de modelos hidrológicos.

### 2.1 MODELOS HIDROLÓGICOS

O ciclo hidrológico é composto por fenômenos responsáveis pela circulação da água entre atmosfera e a superfície terrestre. Ele pode ser descrito da seguinte maneira: a precipitação (sob forma de chuva, neve, orvalho, geada ou granizo) atinge a superfície terrestre, sofrendo interceptação da cobertura vegetal ou reservatórios superficiais, e evaporação, em seguida, sobre infiltração no solo, com a taxa sendo diminuída até que se atinja a saturação. Uma parcela da água vai sofrer escoamento subterrâneo e outra escoamento superficial. As plantas realizam a transpiração, que junto com a evaporação, formam a parcela conhecida como evapotranspiração (TUCCI, 2001).

Os modelos hidrológicos representam os fenômenos presentes no ciclo hidrológico de forma simplificada. A unidade de aplicação desses modelos são as bacias hidrográficas. Segundo Tucci (2001), as bacias hidrográficas são áreas onde há uma delimitação natural, onde as águas que caem sobre elas convergem para um ponto comum, conhecido como exutório. São assim, consideradas sistemas físicos, que tem o volume precipitado como entrada e o volume escoado como saída.

Esses modelos são utilizados para compreender melhor os fenômenos hidrológicos que ocorrem no exutório e no ciclo hidrológico como um todo, preencher falhas existentes em dados hidrológicos, calcular e prever inundações e secas, realizar previsões sobre determinado cenário em estudo e realizar estudos sobre o impacto das modificações do uso do solo (LOU, 2010; BECK *et al.*, 2017). Além do fluxo superficial, modelos mais aprimorados podem também simular o transporte de

sedimentos, nutrientes, poluentes e prever inundações e mudanças climáticas (BAO *et al.*, 2012).

Todos os modelos hidrológicos possuem simplificações. Isso ocorre devido ao custo computacional envolvido (quanto maior a quantidade de dados de entrada, maior a quantidade de cálculos, tempo de processamento e máquinas mais eficientes), grande variabilidade de dados dentro da mesma bacia e ausência de todos os dados necessários para realizar os cálculos com fidelidade aos processos reais. Essas simplificações geram incertezas nas estimativas adotadas (KAISER, 2006; BECK *et al.*, 2017).

Os modelos hidrológicos precisam de vários dados de entrada, como dados pluviométricos, vazões, informações sobre uso do solo, evapotranspiração, dentre outros. Algumas bacias não possuem essas informações, por não serem monitoradas ou por alguma deficiência nos dados existentes. Quando isso acontece é relevante realizar o processo de regionalização que direta ou indiretamente venha a assegurar a transferência de dados.

Para que um modelo seja aplicável deve-se proceder a calibração dos seus parâmetros, que consiste na busca por valores que venham a ajustar os dados calculados com os medidos em campo (geralmente as vazões). A validação do modelo à região em estudo consiste em aplicar os valores calibrados dos parâmetros à simulação para outros períodos da série histórica, não usados durante a calibração. Para realizar essas medidas, são utilizados indicadores estatísticos para indicar o grau de correlação entre as informações calculadas e observadas.

Deve-se observar que os parâmetros ótimos não necessariamente refletem o melhor comportamento do modelo a longo prazo. Mudanças nas características das bacias no tempo podem se refletir sobre as vazões.

Quando os parâmetros têm significado físico seus valores podem ser associados às características da bacia e daí se estabelecer um processo de regionalização dos seus valores.

Tanto a calibração quanto a regionalização são processos importantes, por permitir medidas mais precisas de vazões (BECK *et al.*, 2017; WAGENER; MCINTYRE, 2005).

### 2.1.1 Classificação

Os modelos hidrológicos podem ser classificados de acordo com suas características gerais. Essa classificação é feita em quatro categorias, que são: modelos concentrados e distribuídos; estocásticos e determinísticos; conceituais e empíricos; contínuos e discretos (TUCCI, 2005).

- Modelos concentrados e distribuídos: essa classificação é relacionada à existência de relações espaciais. Os modelos concentrados possuem dados de entrada médios representativos para toda a área da bacia. Por outro lado, os modelos distribuídos levam em consideração a variabilidade espacial das informações hidrológicas das bacias hidrográficas. Nesses, as bacias são divididas em unidades de área menor, onde os cálculos são realizados (SILANS *et al.*, 2000).  
Os modelos concentrados precisam de uma menor quantidade de dados de entrada e possuem uma utilização mais fácil, o que faz com que sejam a preferência da maior parte dos pesquisadores para simulação de fluxo em locais com poucos dados disponíveis (PERRIN *et al.*, 2001; HANSEN *et al.*, 2007; DE VOS *et al.*, 2010; LI *et al.*, 2013; MENDEZ E CALVO-VALVERDE, 2016).
- Modelos estocásticos e determinísticos: essa classificação é relacionada aos tipos de variáveis. Nos modelos estocásticos, os dados de entrada agregam componente aleatória que busca condições diferentes daquelas registradas no período observado, possibilitando uma variação nos dados de saída. Já os modelos determinísticos são baseados nos dados anteriores observados (ALMEIDA; SERRA, 2017).
- Modelos conceituais e empíricos: classificação relacionada com as variáveis dos modelos. Nos modelos empíricos, as equações que os regem não possuem correspondência explícita com o comportamento físico dos fenômenos hidrológicos da bacia hidrográfica. Já os modelos conceituais utilizam equações clássicas da literatura e a maior parte dos parâmetros que descrevem os fenômenos físicos ocorridos (LOU, 2010).
- Modelos contínuos e discretos: essa classificação está relacionada aos intervalos de simulação. Os modelos discretos simulam eventos (uma

ocorrência de cheia com passo de tempo diário ou intradiário, um ano hidrológico com dados diários, por exemplo). Já os modelos contínuos buscam reproduzir o comportamento do sistema físico a cada passo de tempo (normalmente diário ou mensal). A escolha do tipo de modelo e do intervalo de tempo influencia o número de cálculos necessários e consequentemente o custo computacional (TUCCI, 2005).

### 2.1.2 Modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão

Os modelos do tipo chuva-vazão representam a parcela do ciclo hidrológico entre a precipitação/evaporação, considerando retenções, perdas, infiltração, armazenamento no solo e o escoamento superficial, que é a saída que interessa no sistema simulados. Esses modelos são classificados em sua maioria como conceituais ou empíricos e determinísticos, podendo ser dos tipos concentrado ou distribuído (ALMEIDA; SERRA, 2017).

A literatura registra grande variedade de modelos chuva-vazão com diferentes complexidades, alguns deles analisados por Nasonova (2011). Os modelos classificados como distribuídos precisam de uma elevada quantidade de dados de entrada, o que é problemático, pois, além de ser exaustivo, em regiões onde esses dados são inexistentes essas grandezas devem ser estimadas ou regionalizadas (KAISER, 2006). A escolha entre um modelo mais simples ou mais complexo depende do objetivo desejado e da disponibilidade de dados.

Alguns exemplos de modelos chuva-vazão são o HBV Model - *Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning* (BERGSTRÖM, 1976); SMAP - *Soil Moisture Accounting Procedure* (LOPES; BRAGA; CONEJO, 1981); TOPMODEL (BEVEN; KIRKBY, 1979); TOPMO (PERRIN; MICHEL; ANDRÉASSIAN, 2003); Modelo Rio Grande, adaptado de Zhao (1984); GR4J (PERRIN; MICHEL; ANDRÉASSIAN, 2003); SWAT - *Soil and Water Assessment Tool* (Neitsch *et al.* (2011).; MODHAC – Modelo Hidrológico Auto-calibrável (LANNA, 1997).

## 2.2 REGIONALIZAÇÃO DE PARÂMETROS HIDROLÓGICOS

Os modelos hidrológicos são alimentados com dados de entrada. Se esses dados possuem muitas falhas ou não existem, dão espaço a um processo conhecido

como regionalização, que é basicamente a transferência de dados ou parâmetros entre bacias hidrográficas distintas e hidrológicamente similares (OUDIN *et al.*, 2010). Para Diniz (2008), os métodos de regionalização são considerados complexos e se utilizados de maneira adequada, são ferramentas importantes nos estudos hidrológicos.

A regionalização pode ser utilizada com funções estatísticas de variáveis hidrológicas (curvas de probabilidade de vazões máximas e mínimas, curva de probabilidade de precipitação máxima, dentre outras), funções específicas que relacionam variáveis (curvas de infiltração, permanência e regularização) e parâmetros de modelos hidrológicos (parâmetros de outros modelos hidrológicos e hidrogramas unitários) (TUCCI, 2001).

Apesar da utilização desse processo ser uma boa solução quanto aos problemas com os dados de entrada, existem dificuldades presentes na transferência, como o fato de que os parâmetros são por si só incertos. Os parâmetros ótimos dependem dos modelos hidrológicos e das funções-objetivo utilizadas na calibração, entre outros aspectos, não existindo apenas um conjunto de parâmetros possível para um mesmo resultado: vários conjuntos podem levar a valores similares nos resultados da simulação (BÁRDOSSY, 2007).

No processo de agrupamento a partir de grandezas físicas, uma variável pode ser considerada significativa, enquanto outra não. Por isso, se houver na escolha de variáveis a exclusão de uma variável importante ou inclusão de uma indiferente, a regionalização vai gerar resultados distorcidos. Além disso, os dados também podem apresentar variações, tanto na transcrição de valores com o tempo, quanto na modificação do cenário de coleta dessas informações (HOSKING; WALLIS, 1997; DINIZ, 2008).

Segundo Riggs (1990), a confiabilidade de uma relação regional envolve questões como a qualidade de dados, homogeneidade da bacia hidrográfica e adequação das informações das mesmas. Para ele, os itens que comprometem a regionalização são:

- Amostra pequena de série de dados ou pouco representativa, que não gera confiabilidade na sua utilização;
- Número de estações pluviométricas e fluviométricas insuficiente para representar as variabilidades espaciais da bacia;
- Interrupções e alterações nas estações de medições;

- Irregularidade na distribuição da pluviosidade, principalmente pela existência de regiões montanhosas, onde a precipitação não é medida em todas as altitudes;
- Corpos hídricos que atravessam regiões com características climáticas diferentes;
- Em regiões semiáridas, uma parte das bacias hidrográficas não contribui com o fluxo de água, e essa parcela é estimada, não sendo assim, uma medida confiável;
- Diferenças na geologia da bacia, que influencia o fluxo de água subterrâneo e a evapotranspiração;
- Dificuldade na escolha de variáveis.

Os tipos de regionalização presentes nos modelos hidrológicos são baseados na proximidade espacial, na similaridade física entre bacias hidrográficas e na regressão de dados. Para Samuel, Coulibaly e Metcalfe (2011), a forma mais comum de se escolher o tipo de regionalização a se adotar em alguma região é através do teste dos tipos existentes e verificação de qual é mais adequado. Beck *et al.* (2016) citam que, em geral, as abordagens que realizam a regionalização de dados baseadas na similaridade física e climática têm tido um melhor resultado que os demais. Outros autores, por outro lado, relatam muitas análises em que a transferência dos valores dos parâmetros baseada apenas na proximidade física das bacias hidrográficas levou a bons resultados no processo de regionalização. Patil e Stieglitz (2014) discutem critérios de regionalização baseados na similaridade físico-climática e proximidade entre as bacias, registrando que em muitas aplicações não há evidências claras de vantagem para um critério ou outro. Oudin *et al.* (2008), Zhang *et al.* (2015), para bacias hidrográficas da Áustria, França e Austrália, relataram melhores resultados na transferência dos parâmetros dos modelos hidrológicos quando a proximidade entre as bacias foi levada em consideração. Petheram *et al.* (2012) chegaram à mesma conclusão em estudo sobre a regionalização do fluxo para bacias hidrográficas com baixa densidade de monitoramento hidrológico no norte da Austrália.

### 2.2.1 Proximidade espacial

Esse tipo de regionalização leva em consideração as distâncias entre as estações nas bacias hidrográficas e considera que a proximidade entre elas seja suficiente para que sejam hidrológicamente similares. Os parâmetros desse método são estimados com base em técnicas de interpolações espaciais, como nos métodos de Kriging e IDW (*Inverse Distance Weighted*).

A desvantagem desse tipo de regionalização é que as características das bacias não são levadas em consideração no momento da transferência de dados. Tem como premissa a ideia de que, pelo fato de as bacias estarem próximas umas das outras, suas características já são homogêneas e hidrológicamente similares, o que pode não ser completamente verdadeiro e gerar erros nas transmissões de valores (SAMUEL; COULIBALY; METCALFE, 2011).

### 2.2.2 Regionalização baseada na similaridade física entre bacias hidrográficas

Esse tipo de regionalização leva em consideração as similaridades físicas entre as bacias hidrográficas. Sua dificuldade é descobrir quais parâmetros influem na resposta hidrológica da bacia, determinar quais correspondem à similaridade entre elas, e quais serão de fato regionalizados (OUDIN *et al.*, 2010). Sua vantagem é que, quando comparado à regressão de dados, o método não assume a suposição de linearidade (SAMUEL; COULIBALY; METCALFE, 2011).

As técnicas de regionalização visam assim transferir dados hidrológicos ou um conjunto de parâmetros da bacia com dados para outras sem dados, desde que sejam similares o suficiente (WAGENER; MCINTYRE, 2005). No caso de parâmetros de modelos hidrológicos, essas técnicas levam em consideração duas suposições (OUDIN *et al.*, 2010):

- I. A similaridade entre os parâmetros calibrados das duas bacias deve corresponder à similaridade de comportamento de ambas na transformação chuva-vazão;
- II. A similaridade física entre ambas gera similaridade hidrológica.

Essas considerações trazem alguns problemas, como o fato de que pode haver compensação entre valores dos parâmetros, principalmente em modelos com muitos parâmetros calibráveis. Ou seja, um determinado parâmetro pode suprir o outro,

levando a um falso resultado positivo. Isso faz com que a confiança da existência de uma similaridade leve a resultados errados. Além disso, há a dificuldade na escolha dos parâmetros corretos, que realmente representem à similaridade hidrológica (OUDIN *et al.*, 2010).

### 2.2.3 Regionalização baseada na regressão de dados

Esse é o tipo de regionalização mais usual. Em um primeiro momento a técnica é utilizada para criação de regiões homogêneas. Em sequência podem ser desenvolvidas relações entre parâmetros dos modelos com dados e características das bacias, tanto físicas como climáticas (OUDIN *et al.*, 2008). A principal etapa desse segundo processo é determinar relações entre os parâmetros calibrados e as características das bacias (como solo, vegetação, topografia, dentre outros) através de equações de regressão (FREITAS, 2003; BAO *et al.*, 2012).

Há uma dificuldade em conseguir correlacionar esses elementos através de relações de regressões simples, devido à complexidade das relações entre as características das bacias. Esse tipo de situação pode induzir o resultado final ao erro, e, por isso, sofre críticas (BAO *et al.*, 2012; WAGENER, 2007). Além disso, é necessário que se disponha de uma grande quantidade de dados observados para fazer esse tipo de estudo (BÁRDOSSY, 2007). A interdependência entre os parâmetros é outro fator que pode prejudicar o estabelecimento dessas relações.

## 2.3 MODELOS HIDROLÓGICOS UTILIZADOS EM REGIÕES SEMIÁRIDAS

Alguns modelos hidrológicos são usados em regiões semiáridas, mesmo que não sejam desenvolvidos com esse objetivo. Isso ocorre porque há poucos modelos desenvolvidos especificamente para essas regiões. Alguns exemplos de modelos de aspecto geral que foram aplicados a regiões semiáridas são o MODHAC, GR4J Model, MGB-IPH, HEC-HMS e SMAP, detalhados a seguir.

O GR4J Model (*modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier*) é um modelo hidrológico do tipo chuva-vazão, simples e com apenas 4 parâmetros calibráveis, é a última versão do GR3J Model (EDIJATNO, 1989).

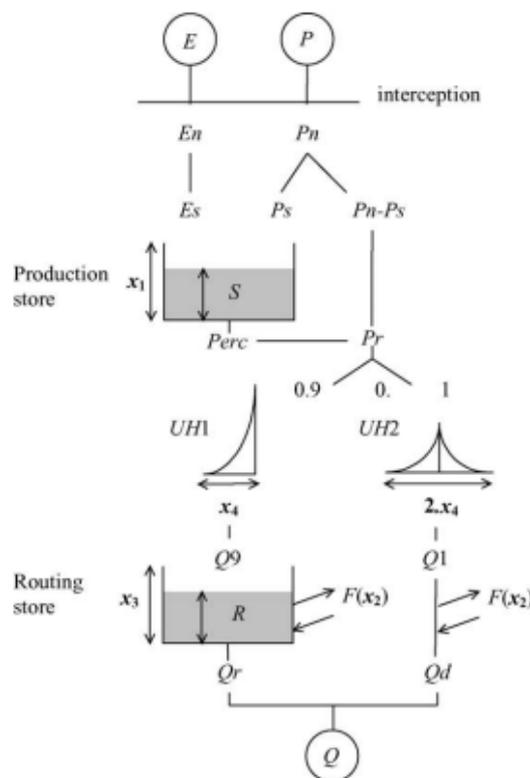
O modelo (Diagrama 1) possui como dados de entrada a precipitação (P) e a evapotranspiração (E). A precipitação é calculada por algum método de interpolação,

com dados de entrada diários, e a evapotranspiração, representada por médias mensais de longo prazo (normais climatológicas).

Esse modelo possui dois reservatórios. O primeiro é o reservatório de produção, que possui o valor determinado em função do nível S. O segundo é o reservatório de propagação, com nível R. Os parâmetros calibráveis são:  $X_1$  – capacidade máxima do reservatório de produção;  $X_2$  – coeficiente de escoamento subterrâneo, que diz respeito as trocas de água que ocorrem no solo;  $X_3$  – capacidade máxima do reservatório de propagação;  $X_4$  – tempo de base do hidrograma unitário UH1 (PERRIN; MICHEL; ANDRÉASSIAN, 2003).

Esse modelo já foi usado em diversos trabalhos, como os de Perrin, Michel e Andréassian (2003), Oudin *et al.* (2010), Zhang *et al.* (2018) e Zeng *et al.* (2019). Boumenni, Bachnou e Alaa (2017) utilizaram esse modelo na bacia hidrográfica de Ourika, que é uma sub-bacia da Atlas Tensift na região de Marrakech, Marrocos. Essa região é considerada como uma zona sub-úmida semiárida, resultando, segundo os autores, em bons resultados quando se leva em consideração a heterogeneidade da bacia. Traore *et al.* (2014) realizou um estudo no afluente do rio Gambia, o Koulountou, localizado na região de Guiné-Conacri, África. Oudin *et al.* (2010) citam aplicações a bacias hidrográficas no Brasil. Cirilo *et al.* (2020) analisaram o comportamento do modelo face ao CAWM, desenvolvido especificamente para o semiárido, destacando adequação entre razoável a satisfatória dos resultados obtidos.

Diagrama 1 - Diagrama do modelo GR4J Model



Fonte: Perrin, Michel e Andréassian (2003).

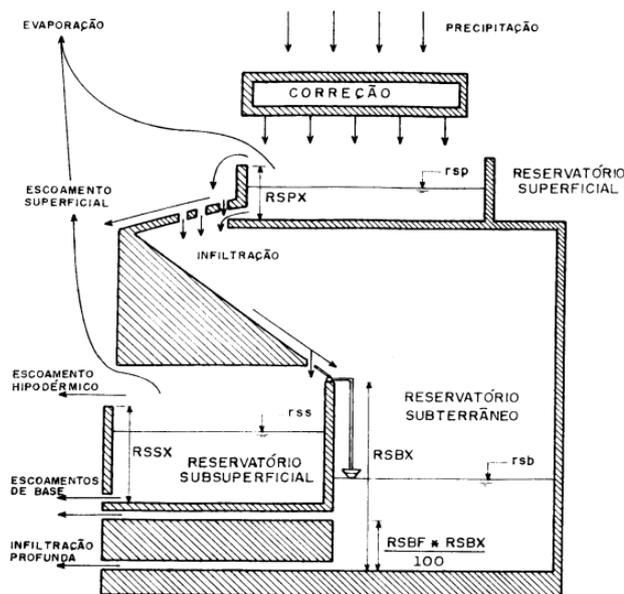
O MODHAC - Modelo Hidrológico Autocalibrável, foi desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH). É um modelo do tipo chuva-vazão concentrado, que foi feito para ser utilizado na região sul do país, onde o clima é temperado úmido, porém com diversas aplicações a estudos e projetos sobre bacias hidrográficas da região Nordeste, que possui clima semiárido (LANNA, 1997, VIRÃES, 2018, VIRÃES et al, 2019).

O esquema do modelo está presente no Diagrama 2. Ele possui três reservatórios (superficial, subterrâneo e subsuperficial) e 14 parâmetros calibráveis, sendo que alguns deles são desconsiderados nos cálculos em função das características das bacias, e outros são considerados constantes. Os parâmetros são: RSPX - Capacidade máxima do reservatório superficial (mm); RSSX - Capacidade máxima do reservatório subsuperficial (mm); RSBX - Capacidade máxima do reservatório subterrâneo (mm); RSBY - Armazenamento mínimo para ocorrer contribuição do reservatório subterrâneo ao escoamento de base (mm); IMAX - Permeabilidade do solo (mm); IMIN - Infiltração mínima (mm); IDEC - Coeficiente

empírico de infiltração (Varia de 0 a 1, adimensional); ASP - Expoente da lei de esvaziamento do reservatório superficial (adimensional); ASS -Expoente da lei de esvaziamento do reservatório subsuperficial (adimensional); ASBX - Expoente da lei de esvaziamento do reservatório subterrâneo (adimensional); ASBY - Ajuste da curva de recessão do hidrograma (adimensional); PRED - Correção da precipitação (adimensional); CEVA - Evapotranspiração do solo (adimensional); CHET - Fração da ETP suprida diretamente da chuva (adimensional) (VIRÃES, 2018).

Esse modelo foi utilizado por Virões et al (2019) na área semiárida do nordeste brasileiro, incluindo os estados da Paraíba, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Ceará, mesma área de estudo do presente projeto, abrangendo diversas bacias hidrográficas. Os resultados foram considerados medianamente satisfatórios pelos autores.

Diagrama 2 - Esquema do modelo MODHAC



Fonte: Lanna (1997).

O Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH) é um modelo hidrológico semi-distribuído, voltado para bacias hidrográficas de grande escala. Esse modelo é composto pelos módulos evapotranspiração, balanço de água no solo, escoamento superficial, escoamento subsuperficial, escoamento subterrâneo e escoamento na rede de drenagem (COLLISCHONN, 2001). Inicialmente, a divisão de área da bacia hidrográfica era feita em unidades menores, chamadas células, sendo agora dividida em sub-bacias, chamadas mini-bacias (UFRGS, 2020).

Foi desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), da UFRGS. Utiliza dados de entrada como precipitações, vazões, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, insolação e pressão atmosférica. Há interfaces desse modelo nos programas de geoprocessamento QGIS e MapWindow GIS, ambos softwares livres (UFRGS, 2020).

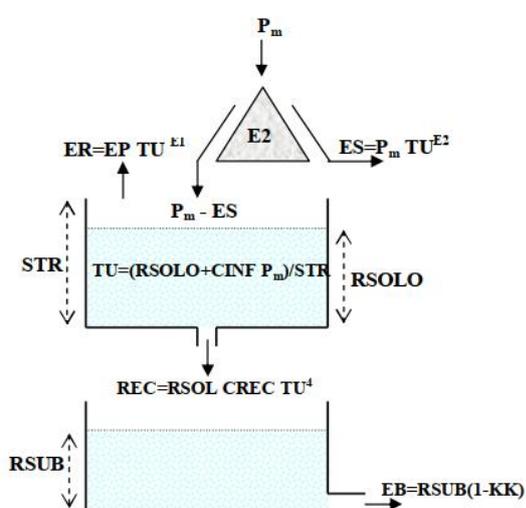
O MGB já foi aplicado em regiões com rios intermíntentes. Felix e Paz (2016) utilizaram o modelo para a bacia do Rio Piancó, que é uma sub-bacia do Rio Piranhas-Açu, na região semiárida do estado da Paraíba. Segundo os autores, o modelo se adequa razoavelmente bem à simulação, porém com dificuldades na representação dos picos das cheias e da intermitência do rio.

O modelo SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) é um modelo hidrológico conceitual do tipo chuva-vazão (Diagrama 3). Foi desenvolvido em 1981 e desde

então bastante aplicado no Brasil. Possui dois reservatórios, RSOLO, que representa o solo, e RSUB, que representa o aquífero, e seis parâmetros calibráveis: SRT - nível máximo do reservatório superficial; E2- Controlador de escoamento superficial; E1 - Controlador das taxas de evapotranspiração na bacia; CINF – Parcela da precipitação que não alimenta o reservatório superficial; CREC – Parâmetro que governa as transferências para o reservatório subterrâneo; KK – parâmetro de recessão (DINIZ, 2008).

Diniz (2008) utilizou esse modelo no estado da Paraíba, pertencente à região semiárida do nordeste brasileiro. Relatou que o modelo se destacou por ser amplamente utilizado na região, com parâmetros que correspondem a características físicas da bacia hidrográfica. Lopes e Montenegro (2017) utilizaram o SMAP na região rural da cidade de Pesqueira, no estado de Pernambuco, também pertencente à região semiárida brasileira.

Diagrama 3 - Esquema do modelo SMAP



Fonte: Diniz (2008).

O HEC-HMS (*Hydrology Engineering Center - Hydrologic Modeling Systems*) é um modelo de simulação hidrológica distribuído, desenvolvido pelo US Army Corps of Engineers. Esse modelo permite, através de ferramentas computacionais, sua integração com sistemas de informação geográfica (SIG), e possibilita simular o escoamento superficial, precipitação e evaporação (SANTOS, 2017). Cabral, Sakuragi e Silveira (2017) aplicaram esse modelo para a bacia do rio São Miguel,

situada na Zona da Mata e Agreste alagoano, apresentando resultados satisfatórios apesar de subestimar as vazões de pico.

Diversos outros modelos foram utilizados em regiões semiáridas, além dos citados. É o caso do WASA (*Model of Water Availability in Semi-Arid environments*), aplicado por Pilz *et al.* (2019) para a bacia do rio Jaguaribe, no Ceará e o Kineross 2 aplicado por Al-Qurashi *et al.* (2008) para uma bacia hidrográfica árida em Oman, obtendo resultados consistentes considerando experiências anteriores nessas regiões.

#### 2.4 CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL – CAWM

A carência de modelos hidrológicos destinados especificamente para a região semiárida foi o que motivou o desenvolvimento do Campus Agreste Watershed Model (CAWM). Esse modelo foi criado na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), no Campus Acadêmico do Agreste. O CAWM é um modelo hidrológico conceitual, concentrado, do tipo chuva-vazão, cujo principal objetivo é a regionalização de dados e visa alcançar simplicidade na sua utilização.

Foram desenvolvidas cinco versões do CAWM, sendo as três primeiras embrionárias. A versão IV diz respeito a rios intermitentes e regiões semiáridas, que é a utilizada no presente trabalho. A versão V é utilizada em simulações de rios perenes e regiões úmidas. Os cálculos nesses modelos priorizam a quantificação do fluxo superficial em detrimento do detalhamento dos fenômenos físicos que ocorrem na camada de solo e no armazenamento subterrâneo.

Os produtos e as técnicas de geoprocessamento são importantes aliados na obtenção de dados de entradas necessários para o modelo. O Modelo Digital de Elevação (MDE) é um importante produto de projetos como o *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)* e mais recentemente o programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), ambos utilizados pelo CAWM na obtenção de parâmetros físicos da bacia e outros dados georreferenciados.

Os dados de entrada incluem informações físicas e hidrológicas. As informações hidrológicas são dados históricos de postos fluviométricos e pluviométricos e dados de evapotranspiração. As informações físicas são obtidas através do Modelo Digital de Elevação e do terreno (MDE e MDT), imagens aéreas do PE3D e imagens de satélite, bem como mapeamentos de uso e ocupação e de tipologia dos solos. São

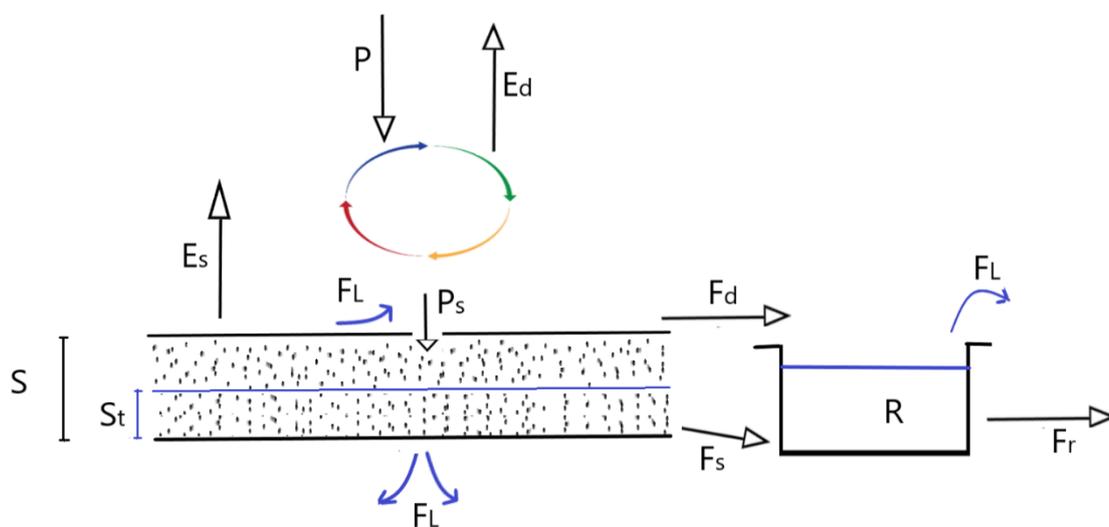
calculadas a área da bacia em estudo, a declividade do rio principal, o comprimento da rede de drenagem e a retenção máxima da água no solo (S).

### 2.4.1 CAWM Versão IV

#### 2.4.1.1 Estrutura do modelo

Por ser concebida para o clima da região em estudo, a versão IV do CAWM é a utilizada no presente trabalho, já tendo sido aplicada em outros trabalhos (CIRILO *et al.*, 2020; GOMES, 2019; SILVA, 2019). Essa versão, cuja estrutura conceitual é apresentada na Figura 1 possui dois reservatórios: o primeiro representa o armazenamento de água no solo ( $S_t$ ). O valor limite de acumulação nesse reservatório é a retenção máxima de água no solo (S) e o segundo é o reservatório que representa a calha do rio (R). Os parâmetros calibráveis são  $K_L$  - coeficiente de perdas e  $K_s$  - parâmetro relacionado à permeabilidade do solo, conforme as equações apresentadas a seguir. Portanto, são apenas dois parâmetros a calibrar na versão CAWM IV. Alguns outros parâmetros descritos a seguir são estimados em função das características físicas e climáticas.

Figura 1 - Representação do modelo CAWM Versão IV



Fonte: Cirilo et al. (2020).

A evapotranspiração (E) é descontada automaticamente da precipitação (P), se o valor de P for suficiente. Nesse caso, a diferença entre precipitação e evapotranspiração é chamada de precipitação efetiva ( $P_n$ ) (Equação 1); se não, têm-se uma evapotranspiração direta  $E_d$  e a parcela da evapotranspiração potencial não atendida ( $E_n$ ). As equações são apresentadas a seguir.

- Caso  $P \geq E$ :

$$P_n = P - E \quad (1)$$

Onde:

$P_n$  – Precipitação efetiva (mm)

$P$  – Precipitação (mm)

$E$  – Evapotranspiração potencial (mm)

- Caso  $P < E$ :

$$E_d = P \quad (2)$$

$$E_n = E - E_d \quad (3)$$

Onde:

$P_n$  – Precipitação efetiva (mm)

$P$  – Precipitação (mm)

$E_n$  – Evapotranspiração potencial não atendida (mm)

$E$  – Evapotranspiração potencial (mm)

$E_d$  – Evapotranspiração direta (mm).

A precipitação efetiva é dividida entre três componentes. A primeira se refere à recarga do solo ( $P_s$ ), baseada no conceito apresentado por Edijatno and Michel (1989), conforme a Equação 3:

$$P_s = \frac{S \cdot \left(1 - \left(\frac{S_t}{S}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{S}\right)}{1 + \frac{S_t}{S} \tanh\left(\frac{P_n}{S}\right)} \quad (4)$$

Onde  $S_t$  é a quantidade de água acumulada no solo a cada tempo e  $S$  sua capacidade máxima de retenção. O conceito de  $P_s$  é usado na formulação do modelo concentrado GR4J (PERRIN et al, 2003; NASONOVA, 2011; TRAORE et al., 2014).

Outra componente é a evapotranspiração suplementar ( $E_s$ ), limitada à evapotranspiração não atendida  $E_n$ , desde que haja água suficiente. Sua magnitude depende de um valor atribuído a um parâmetro  $\alpha$  como indicado na Equação 5. Este parâmetro foi introduzido devido às incertezas presentes na estimativa da evapotranspiração, inclusive pelo fato de que as condições de solo, cobertura vegetal e clima são variáveis no território da bacia.

$$E_s = \left(1 - e^{-\frac{\alpha \cdot S_t}{S}}\right) \cdot E_n \quad (5)$$

A componente que resta, desde que positiva, representa o escoamento direto na superfície do terreno ( $F_d$ ) segundo a Equação 6:

$$F_d = P_n - P_s - E_s \quad (6)$$

Do reservatório de água no solo ocorre o fluxo sub-superficial  $F_s$  que percola até aumentar o volume de água na calha fluvial ( $R$ ), de acordo com a Equação 7:

$$F_s = K_s \cdot S_t \quad (7)$$

Onde  $K_s$  é um parâmetro a ser calibrado e representa a permeabilidade do solo.  $F_s$  indica a percolação no sentido da calha fluvial.

O volume de água retido na calha fluvial é incrementado pelos fluxos  $F_s$  e  $F_d$ . O escoamento na calha fluvial  $F_r$  é admitido como uma função não-linear do volume armazenado  $R$ , de acordo com a Equação 8, sendo  $b$  uma constante determinada a seguir e  $K$  um parâmetro que depende de características da bacia.

$$F_r = K \cdot R^b \quad (8)$$

Considerando que o volume do reservatório da calha fluvial  $V_{sup}$  pode ser representado pela capacidade do conjunto de rios que compõem a bacia com extensão total  $L_T$  e área de seção equivalente  $A_e$ , tem-se:

$$V_{sup} = A_e \cdot L_T \quad (9)$$

Como nos modelos hidrológicos os volumes são representados em milímetros por unidade de área da bacia hidrográfica em  $\text{Km}^2$ , a acumulação  $R$  é dada por:

$$R = \frac{V_{sup}}{c \cdot A_b} = \frac{A_e \cdot L_T}{c \cdot A_b} \quad (10)$$

Sendo a constante  $c = 1000$  utilizada para compatibilizar as unidades utilizadas.

Considerando o escoamento na calha equacionado pela Fórmula de Manning com as simplificações de seção retangular de largura equivalente  $B_e$ , trecho de extensão  $L_T$  e declividade  $S_0$ , assim como raio hidráulico aproximadamente igual à lâmina escoada:

$$A_e = B_e \cdot y \quad R_h \cong y$$

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A_e \cdot R_h^{2/3} \cdot S_0^{1/2} \cong \frac{1}{n} \cdot \frac{A_e^{5/3}}{B_e^{2/3}} S_0^{1/2} \quad (11)$$

Considerando  $V = A_e \cdot L_T$  o volume de água acumulado na calha fluvial em um trecho de extensão  $L_T$  e área equivalente  $A_e$ , tem-se, substituindo na Equação 11:

$$Q = \frac{S_0^{1/2}}{n \cdot L_T^{5/3} \cdot B_e^{2/3}} V^{5/3} = K^* \cdot V^{5/3} \quad (12)$$

Por similaridade, a Equação 12 sugere  $b = 5/3$  quando se compara com a Equação 8. A relação entre a vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) e a lâmina escoada (mm) é dada por:

$$Q = \frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} \quad (13)$$

Onde  $\Delta t$  é o passo de tempo em segundos. Combinando a Equação (13) com o último termo da Equação (11), tem-se:

$$\frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} = \frac{1}{n} \cdot \frac{A_e^{5/3}}{B_e^{2/3}} S_0^{1/2} \quad (14)$$

Explicitando a área equivalente da Equação 10 e substituindo na Equação 14, chega-se a:

$$A_e = \frac{c \cdot A_b \cdot R}{L_T} \quad (15)$$

$$\frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} = \frac{1}{n} \cdot \left( \frac{c \cdot A_b \cdot R}{L_T} \right)^{5/3} \frac{S_0^{1/2}}{B_e^{2/3}} \quad (16)$$

Como  $F_r = K \cdot R^b$  Sendo  $b = 5/3$

$$\text{Tem-se } K = \frac{\Delta t}{n} \cdot \left( \frac{c^2 \cdot A_b^2}{B_e^2 \cdot L_T^5} \right)^{1/3} S_0^{1/2} \quad (17)$$

A relação não linear  $Fr = K \cdot R^b$  indicada na Eq. (8) é utilizada no CAWM para representar o escoamento na calha fluvial, diferente da concepção usual de reservatório linear. A dedução desenvolvida sinaliza para expressão que pode permitir o cálculo do parâmetro K e considerar  $b = 5/3$ , embora sejam muitas as simplificações realizadas no desenvolvimento matemático. O valor  $b = 5/3$  tem se ajustado bem à simulação para dezenas de bacias hidrográficas. Os resultados de cálculo do parâmetro K têm sido avaliados para diferentes bacias, com simulações em passo de tempo diário, conforme discutido adiante.

As perdas de água no sistema podem ser devidas a diversas causas: volumes de retenção nas depressões do solo e pela vegetação, gradativamente evaporados;

volumes de extravasamento que não retornam à calha fluvial, igualmente evaporados; infiltração nas fendas do embasamento cristalino. Essa perda é extraída do escoamento superficial direto. Utiliza-se para cálculo das perdas a expressão:

$$F_L = K_L \cdot R^p \quad (18)$$

O expoente  $p$  tem sido testado nas diversas simulações desenvolvidas variando de 1 a 1,2. Na maior parte dos casos o valor 1 mostra-se mais adequado, sendo o “default” do modelo: somente em áreas de grandes extravasamentos valor maior tem-se mostrado mais adequado.  $K_L$  é um parâmetro a calibrar do modelo.

Os parâmetros a calibrar do modelo CAWM IV são portanto  $K_s$  e  $K_L$ . O parâmetro  $K$  tem-se mostrado adequado para variação entre 0,01 e 0,06, com valor de referência de 0,025. No caso de rios com declividades acentuadas o valor calculado a partir da Equação 17 geralmente é mais elevado. Caso isso aconteça, recomenda-se excluir os trechos mais abruptos do curso do rio no cálculo da declividade. No outro extremo, em bacias muito grandes o comprimento total da rede de rios  $L_T$  pode levar a valores de  $K$  abaixo da faixa de valores que leva a melhores resultados. O valor de  $L_T$  é influenciado também pela resolução do MDT/MDE utilizado. No caso de uso da base de dados SRTM recomenda-se adotar limiar entre 300 e 500 para definição da quantidade de células na formação da rede de escoamento. Utilizando-se o PE3D, de resolução muito maior, esse limiar deve ser elevado à ordem de 5000 para se evitar a geração de pseudo cursos d’água com extensões insignificantes. Nas situações em que o valor do parâmetro sai da faixa de valores recomendados tem-se utilizado  $K = 0,025$ . No caso das bacias de grandes áreas, superiores a 100.000km<sup>2</sup> por exemplo, o valor de  $K$  inferior à faixa definida deve ser tentado no ajuste.

As recomendações descritas fazem parte do tutorial de uso do modelo CAWM e derivam da experiência da equipe GEOLAB – Laboratório de Geoprocessamento do Campus Agreste da UFPE.

#### 2.4.1.2 Parâmetro S

O parâmetro  $S$  representa a retenção da água no solo. É calculado a partir do valor do *curve number* (CN). Para Savvidou *et al.* (2018) o CN é um importante indicador representativo do comportamento da bacia hidrográfica.

Esse parâmetro foi desenvolvido pela NRCS (*Natural Resources Conservation Service*) para ser utilizado no método de estimativa de vazões, na tentativa de obter e representar as características fisiográficas de uma bacia hidrológica que interferem no escoamento superficial da mesma. Seu valor varia de 1 a 100, e quanto maior, maior é a taxa de escoamento (SAVVIDOU *et al.*, 2018).

O CN é um valor tabelado, que corresponde às informações do tipo de solo, uso e cobertura de solo e umidade da bacia. Como esse valor muda no espaço, é necessário fazer uma média ponderada dos valores do CN com os fatores de área de cada bacia, como demonstrado na Equação 12 (SOARES *et al.*, 2014).

$$CN = \frac{\sum_{i=1}^n cn_i a_i}{A} \quad (19)$$

Onde:

a: área de cada unidade com mesmo CN;

A: Área total da bacia;

CN: curve number;

cn: curve number de cada unidade de área.

O valor de S é calculado a partir dessa média ponderada com o valor dos CN de cada unidade de área da bacia:

$$S = \frac{24500}{CN} - 254 \quad (20)$$

É importante registrar que esse parâmetro é usado exclusivamente para realização do balanço de água no solo e não no cálculo direto da vazão, como ocorre nos modelos baseados na formulação do Soil Conservation Service - SCS. Esse cálculo no CAWM, conforme o equacionamento do modelo, é feito por meio das Equações 8 e 17 já apresentadas.

Para cálculo de CN têm sido utilizados mapeamentos de solos da EMBRAPA e imagens de satélite classificadas do uso e ocupação do solo nas bacias. Um “plugin” foi desenvolvido para isso, incorporado ao software QGIS.

Na ausência das informações necessárias sobre relevo e solos, K e S podem ser calibrados. Isso tem sido evitado, de modo a incorporar ao modelo mais informações mensuráveis das características das áreas em estudo.

### 2.4.1.3 Calibração

A calibração do modelo é feita por meio do software Microsoft Office Excel. A ferramenta Solver é utilizada, com o algoritmo GRG Não Linear (*Generalized Reduced Gradient*). Esse algoritmo é utilizado em problemas de otimização não-linear.

Para Sacoman (2012) foram necessárias décadas para que o algoritmo GRG Não Linear fosse disponibilizado para a comunidade em geral, sendo anteriormente adquirido em produtos caros e de difícil aquisição, utilizado por empresas como Bell Aerosystems, Boeing e NASA.

Esse método ainda hoje é considerado como um dos melhores para solucionar problemas de otimização não linear, servindo para as mais variadas áreas do conhecimento (SACOMAN, 2012). Para o modelo hidrológico CAWM o algoritmo funciona adequadamente, alcançando o valor ótimo em até 20 iterações (CIRILO *et al.*, 2020). No Solver também está presente a ferramenta Evolutionary, baseada em algoritmos genéticos. No entanto, a mesma não tem se mostrado sensível no problema em tela.

Para que a otimização seja possível, são inseridos no Solver:

- Função objetivo: Função que se deseja maximizar, minimizar, ou determinar um valor fixo;
- Células variáveis: Valores que serão modificados para satisfazer a função objetivo (variáveis de decisão);
- Restrições: Valores de restrição que as células variáveis devem atender.

A função objetivo (Equação 21) utilizada no modelo visa maximizar o valor de Nash e minimizar o somatório das diferenças entre vazão observada e vazão calculada:

$$F = \frac{NSE \cdot 10^6}{\sum abs(Q_{obs} - Q_{calc})} \quad (21)$$

As células variáveis são os dois parâmetros calibráveis  $K_L$  e  $K_S$ . As restrições são que esses valores devem ser maiores ou iguais a zero e menores ou iguais a um.

## 2.5 GEOPROCESSAMENTO E MODELOS HIDROLÓGICOS

O geoprocessamento consiste num conjunto de ferramentas matemáticas e computacionais que visam coletar e tratar informações georreferenciadas. Os sistemas de informações aplicados ao geoprocessamento são chamados de GIS ou SIG -Sistemas de Informações Geográficas (INPE, 2020).

Para que o SIG seja utilizado é necessário que exista um banco de dados georreferenciados associado a um sistema de coordenadas conhecido, esse banco de dados sendo composto por diferentes camadas associadas. A estrutura dos dados utilizados pode ser dividida em dados espaciais (dados em estrutura vetorial e em estrutura matricial) e dados alfanuméricos (FITZ, 2008).

Os SIGs e as ferramentas de geoprocessamento em geral representam avanços consideráveis para os estudos envolvendo recursos hídricos, através do desenvolvimento de funções voltadas para essa ciência. Elas têm a capacidade de manipular dados distribuídos no espaço, em vez de dados pontuais. Um exemplo dessas funções é a manipulação do MDE (Modelo digital de elevação), que alimenta a obtenção de informações fisiográficas e de fluxo (ÁVILA *et al.*, 2007; MENDES, 1996; MENDES e CIRILO, 2013). Atualmente existem diversos *softwares* de geoprocessamento em grande utilização, como o Idrisi (Clark University), ArcGis (Esri), Spring (INPE) e QGIS (*Open Source Geospatial Foundation*).

A partir do MDE ou MDT quando disponível é possível obter informações que alimentam as análises hidrológicas, como a área de contribuição de uma sub-bacia, direção de escoamento, canais de acumulação, dados topográficos, altitudes, declividade e comprimento do talvegue (POMPERMAYER, 2013).

O sensoriamento remoto é uma técnica de aquisição de captação utilizada para obter imagens e dados da superfície terrestre, através de sensores, onde não há contato entre os sensores e os objetos (distância remota do objeto). É realizado através da detecção do fluxo da radiação eletromagnética refletida pela superfície. Exemplos disso, são as imagens de satélites e fotografias aéreas. Quando feito por aeronaves, entre elas os Veículos Aéreos Não Tripulados - VANTs, há restrições quanto à área de obtenção de dados e dificuldade de realizar a obtenção sistemática dos mesmos (MENESES; ALMEIDA, 2012). Para os estudos hidrológicos, além de serem uma forma de obtenção do MDE, também trazem a possibilidade de obtenção de informações como o uso e ocupação do solo.

O SIG e o sensoriamento remoto vêm sendo amplamente utilizados por pesquisadores para estimar as respostas hidrológicas das bacias hidrográficas. Como os modelos hidrológicos precisam de uma grande quantidade de dados de entrada, as técnicas de geoprocessamento têm sido importantes aliadas desses modelos, por possibilitar a obtenção de um grande volume de dados georreferenciados, de forma rápida e confiável, reduzindo ainda a possibilidade de erros resultantes das obtenções e cálculos manuais (POMPERMAYER, 2013).

Para Mendes (1996) a integração entre geoprocessamento e modelos hidrológicos se dá por cinco fases, que são: obtenção de dados; análise e processamento dos dados; operações com o SIG; simulação hidrológica; visualização dos resultados. A única que representa os modelos hidrológicos é a simulação hidrológica, enquanto as demais podem ser realizadas por programas de geoprocessamento.

Essa integração garante a qualidade dos dados de entrada dos modelos hidrológicos, fazendo com que os produtos sejam mais confiáveis, além de possibilitar uma plataforma onde é possível manipular e analisar os dados, o que facilita a calibração do modelo hidrológico e a visualização dos parâmetros e resultados. Alguns avanços alcançados com essa integração foram a difusão da utilização desse tipo de tecnologia, o que possibilita também uma democratização da ciência, a possibilidade de se adicionar novas funcionalidades aos SIG e a dinamização das simulações (BURROUGH; MCDONNELL, 1998; MELO, 2010).

### **2.5.1 Bases de dados espaciais**

As bases de dados espaciais são necessárias para operações nos sistemas de informações geográficas, pois nelas os dados são armazenados e manipulados pelo usuário dos softwares de geoprocessamento. São redes confiáveis, de fácil acesso e que contribuem amplamente para o desenvolvimento da ciência.

Alguns produtos utilizados na simulação hidrológica, como o MDE, podem ser obtidos através de diversas técnicas, como interferometria de radar (SRTM), imagens estéreo ópticas (ASTER MDE), interpolação de contorno (GTOPO30) e LIDAR (SHARMA; TIWARI, 2014). Os produtos do Projeto Pernambuco Tridimensional – PE3D e o Projeto SRTM são descritos a seguir.

### 2.5.1.1 Projeto SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*)

O projeto SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) é fruto de cooperação entre a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e a NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), uma agência do Departamento de Defesa dos Estados Unidos (FARR; KOBRICK, 2000). Segundo Cirilo *et al.* (2014), essa iniciativa surgiu da necessidade de uma base altimétrica global confiável.

O SRTM foi uma missão realizada pelo ônibus espacial chamado Endeavour, que durou 11 dias, entre 11 e 22 de fevereiro de 2000. Por dia, o satélite orbitou a terra 16 vezes, totalizando 176 órbitas. Gerou o MDE (Modelo digital de elevação) da superfície da terra entre as latitudes 60° Norte e 56° Sul, totalizando cerca de 80% da área global (CIRILO *et al.*, 2014).

O método utilizado na obtenção do MDE é chamado de interferometria radar de única passagem. Segundo USGS (2020a), essa técnica consiste em obter duas imagens de localizadas ligeiramente diferentes, sendo que essa diferença é o que possibilitou o cálculo da elevação da superfície. Para que isso fosse possível foi necessária uma antena pendurada sobre um mastro do compartimento de carga, a cerca de 60m de distância da nave (Figura 2).

Figura 2 - Ônibus espacial com antena principal situada no compartimento de carga no fim de um mastro de 60 m



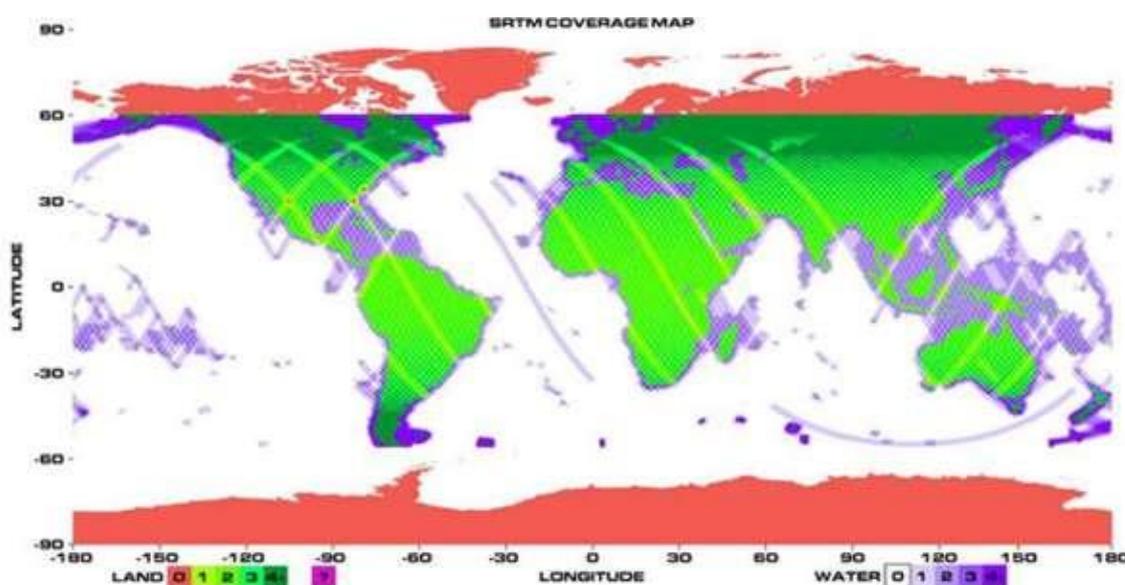
Fonte: Farr e Kobrick (2000).

O Mapa 1 fornece a cobertura SRTM, facilitando a visibilidade do levantamento. O pixel desse MDE é de 30 metros, com 15 metros de precisão vertical. Para Sharma e Tiwari (2014) a vantagem desse produto é a homogeneidade na qualidade e a disponibilização gratuita. Esse produto está disponível ao público, podendo ser obtido

no site da USGS (*United States Geological Survey*), com resolução espacial de 30 metros (CIRILO *et al.*, 2014; FARR; KOBRICK, 2000; USGS, 2020b).

Qualquer projeto que exija conhecimento topográfico sobre determinada região é beneficiado com esse produto, podendo ser utilizado com finalidades científicas, militares e civis, como projetos de controle de cheias, monitoramento de áreas desmatadas e movimentação de geleiras, por exemplo.

Mapa 1 - Mapa final de cobertura SRTM

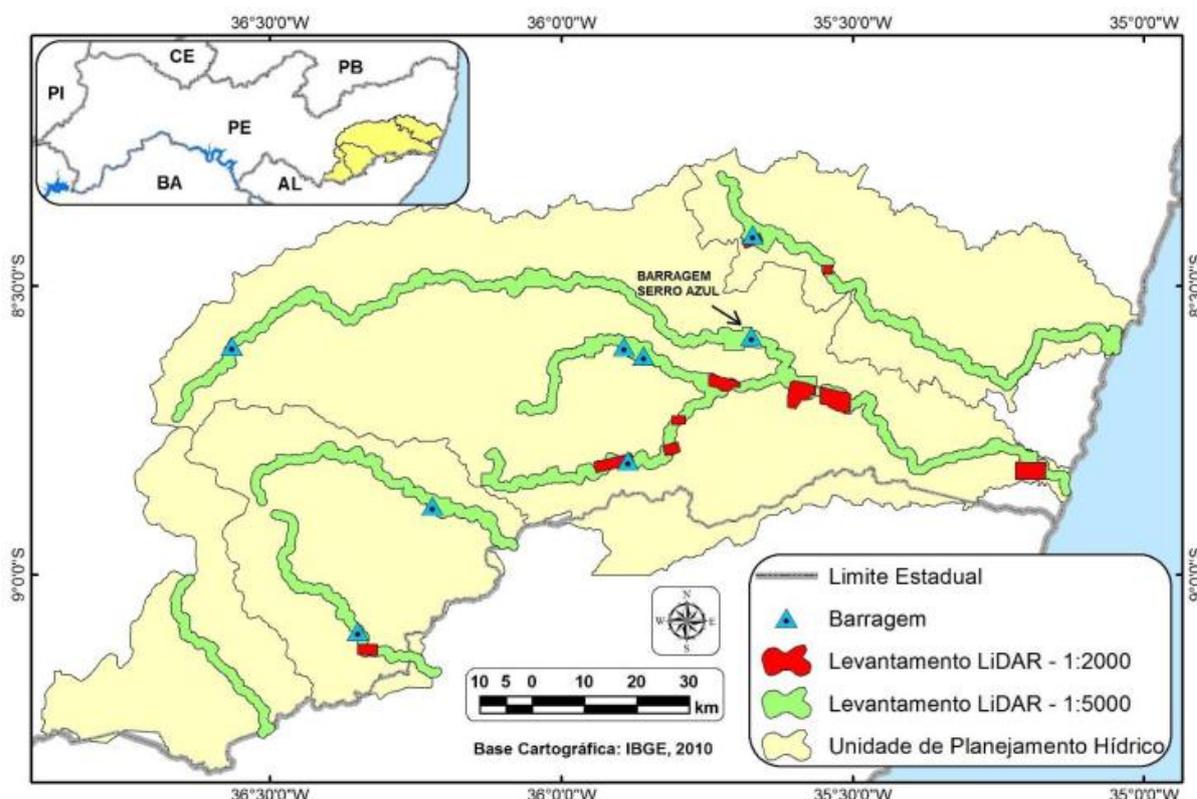


Fonte: USGS (2020).

#### 2.5.1.2 Projeto Pernambuco Tridimensional

O projeto Pernambuco Tridimensional foi realizado no estado de Pernambuco, entre os anos de 2014 e 2015. A iniciativa foi da Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE) e surgiu após as graves inundações que ocorreram entre 2010 e 2011, na região da mata sul e agreste meridional do estado. Inicialmente foi realizado o mapeamento, apenas nas regiões atingidas (áreas alagáveis, cidades atingidas e estirões dos rios) pertencentes às bacias hidrográficas dos rios Mundaú, Una e Sirinhaém (Mapa 2). Nos centros urbanos, a escala do levantamento foi de 1:2000 e das áreas alagáveis 1:5000. Depois, foi estendido, em escalas diferentes, para todo o estado (CIRILO *et al.*, 2014)

Mapa 2 - Áreas onde foram feitos os primeiros levantamentos com LiDAR em Pernambuco



Fonte: Cirilo *et al.* (2014).

A tecnologia utilizada para realizar o levantamento foi a LiDAR (*Light Detection And Ranging*). Os serviços descritos de perfilamento a laser e recobrimento aerofotogramétrico foram ampliados entre 2013 e 2016 para todo o território continental de Pernambuco. Essa base possui aproximadamente um ponto cotado a cada 1,3 m<sup>2</sup>, além de imagens aéreas e outros produtos catalogados em 13.125 cartas-índices (CIRILO *et al.*, 2014; PERNAMBUCO, 2016). Atualmente a gestão do PE3D é feita pela APAC.

A escala dos serviços realizados nas áreas das principais sedes municipais (41 municípios) foi de 1:1000, com precisão altimétrica de 10cm. Já para o restante do território foi utilizada a escala 1:5000, com precisão altimétrica de 25 cm. Foram gerados modelos digitais do terreno (MDT), modelos digitais de elevação (MDE), ortoimagens e imagens hipsométricas (PERNAMBUCO, 2016).

As resoluções desses produtos para a escala 1:5000 são:

- Ortofoto – Espacial de 50 cm e radiométrica de 8 bits;
- MDE - Espacial de 1 m e radiométrica de 32 bits;

- MDT - Espacial de 1 m e radiométrica de 32 bits;
- Imagens hipsométricas – Espacial 1 m e radiométrica de 8 bits.

As resoluções desses produtos para a escala 1:1000 são:

- Ortofoto – Espacial de 12 cm e radiométrica de 8 bits;
- MDE - Espacial de 50 cm e radiométrica de 32 bits;
- MDT - Espacial de 50 cm e radiométrica de 32 bits;
- Imagens hipsométricas – Espacial de 50 cm e radiométrica de 8 bits.

Os produtos desse projeto foram utilizados no projeto de oito barragens para contenção de cheias (Mapa 2), sendo Serro Azul a de maior porte, concluída em 2016. Além disso, foram utilizados em outras ações do gerenciamento dos recursos hídricos do estado, como o reordenamento da ocupação das margens, ampliação da calha fluvial e retirada de singularidades do rio Una (CIRILO *et al.*, 2014).

Esses produtos beneficiam diversas áreas além dos recursos hídricos e estão disponíveis para a população em geral, democratizando as pesquisas que utilizam dados físicos do estado, o setor empresarial (auxiliando a atração de novos empreendimentos para a região), planejamento urbano, setor ambiental e demais intervenções que precisem de informações detalhadas do terreno da região.

## 2.6 INDICADORES ESTATÍSTICOS DE AJUSTE DOS MODELOS

Após realizar a calibração de um modelo hidrológico pode-se observar o comportamento das vazões observadas e calculadas, e a partir daí, ter-se uma ideia se essa calibração foi ou não satisfatória. Além da análise visual dos gráficos e hidrogramas produzidos na calibração, são utilizados indicadores estatísticos para determinar o grau de adequabilidade da calibração.

Para Jain e Sudheer (2008) os indicadores estatísticos mais frequentemente adotados em Hidrologia são Nash-Sutcliffe (NS), RMSE, coeficiente de correlação, coeficiente de determinação e o erro médio absoluto. O último não indica a direção do erro, e, por isso, não é considerado um bom coeficiente. Segundo Cirilo *et al.* (2020) para os modelos hidrológicos são mais utilizados os indicadores de performance de Nash-Sutcliffe,  $R^2$  (coeficiente de determinação), RMSE (raiz quadrada do erro médio), Pbias (porcentagem da tendência média), RSR (razão entre RMSE e o desvio padrão).

O coeficiente de Nash-Sutcliffe é um dos indicadores mais utilizados pelos modelos hidrológicos e sua fórmula está indicada na Equação 22. Os valores desse coeficientes podem variar de  $-\infty$  a 1. Os valores mais próximos de 1 indicam um bom ajuste do modelo: acima de 0,75 indicam bons ajustes, entre 0,75 e 0,36 (para dados diários; 0,5 para dados mensais), ajustes satisfatórios e abaixo de 0,36 (ou 0,5), inaceitáveis (GOTTSCHALK; MOTOVILOV, 2000 apud COLLISCHONN, 2001; SCHAEFLI; GUPTA, 2007).

Esse indicador, porém, apesar de serem amplamente utilizados não devem ser considerados isoladamente porque em algumas ocasiões podem gerar valores dos coeficientes elevados, mesmo que os modelos não tenham se adequados bem. Isso pode indicar que um indicador isoladamente não extrai todas as informações necessárias dos dados de entrada (JAIN; SUDHEER, 2008).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - Q_{i,calc})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (22)$$

Onde:

$Q_{i,obs}$  é a vazão observada

$Q_{i,calc}$  é a vazão calculada

Há algumas variações dessa fórmula, presentes nas Equações 23 e 24. Valores de  $NSE_{sqrtQ}$  mais próximos da unidade representam bem todo o espectro das variáveis comparadas. Já  $NSE_{logQ}$  representa melhor a qualidade dos ajustes quando as vazões são baixas.

$$NSE_{logQ} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log Q_{i,obs} - \log Q_{i,calc})^2}{\sum_{i=1}^n (\log Q_{i,obs} - \log \bar{Q}_{obs})^2} \quad (23)$$

$$NSE_{sqrtQ} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{i,obs}} - \sqrt{Q_{i,calc}})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{i,obs}} - \sqrt{\bar{Q}_{obs}})^2} \quad (24)$$

O coeficiente de determinação  $R^2$  (Equação 25) varia de 0 a 1 e está relacionado à variância dos dados medidos. Os valores mais altos indicam uma menor variação de erro, e melhor correlação. É um indicador amplamente utilizado nas

análises estatísticas, sendo os valores superiores a 0,5 considerados aceitáveis. (GOLMOHAMMADI *et al.*, 2014).

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - \overline{Q_{obs}})(Q_{i,calc} - \overline{Q_{calc}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{i,calc} - \overline{Q_{calc}})^2}} \right] \quad (25)$$

Já o coeficiente RMSE (Equação 26) é um indicador estatístico utilizado para medir o desempenho de estudos meteorológicos, da qualidade do ar, pesquisas sobre o clima e performances de modelagens. Esse coeficiente trás a suposição que os erros são imparciais e seguem a distribuição normal: quando esse valor é 0, todos os dados estão na linha de regressão, inexistindo erros (CHAI; DRAXLER, 2014).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{i,calc} - Q_{i,obs})^2} \quad (26)$$

O indicador Pbias (Equação 27) é utilizado para avaliar a tendência dos valores calculados em relação aos observados. Quando esse valor é positivo indica que o modelo é subestimado, quando é negativo superestimado e zero é o valor ideal. O ajuste de dados é satisfatório quando o Pbias possui valores entre -25% e 25% (BRIGHENTI; BONUMÁ; CHAFFE, 2016; MORIASI *et al.*, 2012).

$$Pbias = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - Q_{i,calc})}{\sum_{i=1}^n Q_{i,obs}} \times 100 \quad (27)$$

O coeficiente RSR (Equação 28) é o valor do raio entre o RMSE e o desvio padrão dos dados. Varia de 0, que é o valor ideal, até um valor positivo grande. Quanto menor, menor também o RMSE e melhor o desempenho do modelo (GOLMOHAMMADI *et al.*, 2014).

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - Q_{i,calc})^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - \overline{Q}_{obs})^2}} \right] \quad (28)$$

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo são apresentadas informações sobre a área de estudo, localização, hidrografia, relevo, clima, solo e vegetação. Assim como a metodologia, com informações sobre a obtenção dos dados hidrológicos obtidos no estudo, técnicas de geoprocessamento utilizadas e divisão das regiões homogêneas.

#### **3.1 ÁREA DE ESTUDO: REGIÃO SEMIÁRIDA DOS ESTADOS DE PERNAMBUCO, PARAÍBA, CEARÁ E RIO GRANDE DO NORTE**

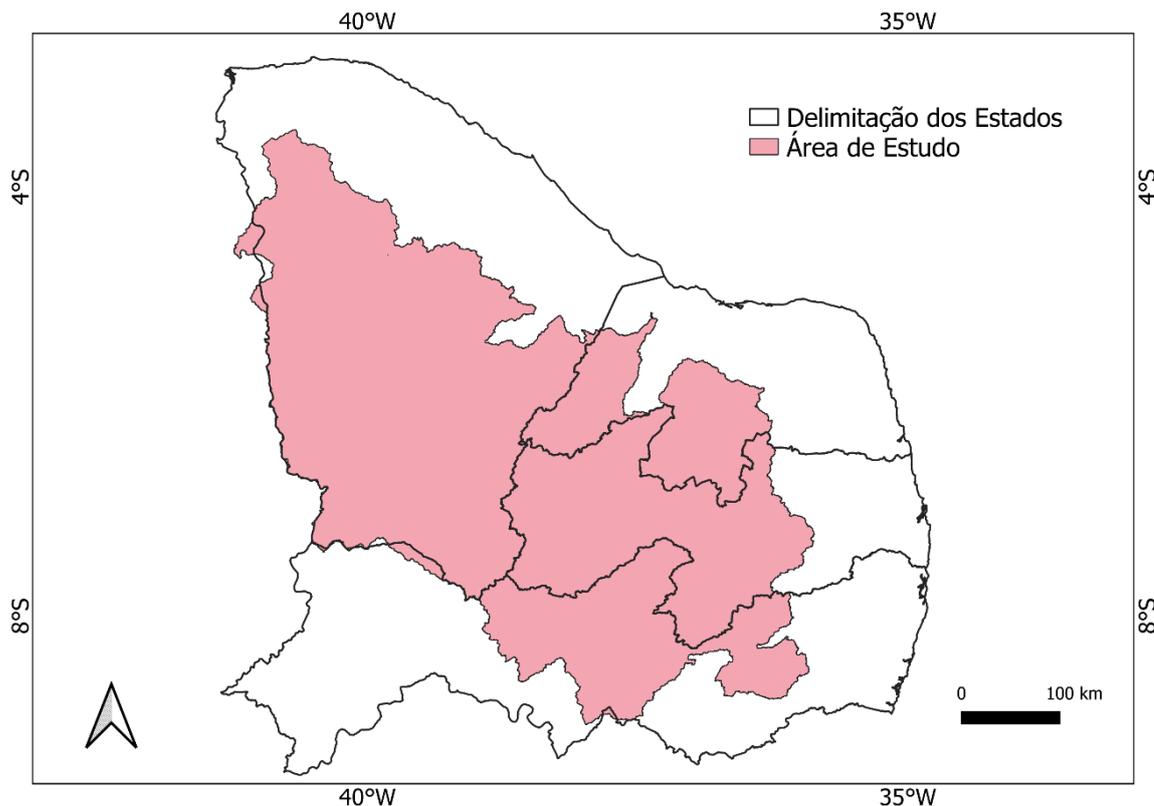
##### **3.1.1 Localização e generalidades**

A área de estudo é localizada na região semiárida dos estados de Pernambuco, Paraíba, Ceará e Rio Grande do Norte. Essa área é o somatório das áreas de 45 sub-bacias delimitadas, entre as zonas UTM 24 e 25 sul. Se situa entre as latitudes 02°47' e 09°00' S e longitudes 41°25' e 35°27' W.

De acordo com a divisão hidrográfica nacional instituída pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos, a área de estudo pertence às regiões hidrográficas do Atlântico Nordeste Oriental, Paraíba e São Francisco. Está abrangida nas bacias do Atlântico no trecho Norte/Nordeste e do Rio São Francisco e nas sub-bacias 34, 35, 36, 37, 38, 39, 48, 49. A delimitação das bacias e sub-bacias foi proposta pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), em fevereiro de 1972 (ANA, 2020).

A área de estudo (Mapa 3) possui aproximadamente 183.114 km<sup>2</sup>, sendo 20.582 km<sup>2</sup> referentes ao estado do Rio Grande do Norte (11,2%), 30.360 km<sup>2</sup> a Pernambuco (16,6%), 39.692 km<sup>2</sup> à Paraíba (21,7%) e 92.480 km<sup>2</sup> ao Ceará (50,5%).

Mapa 3 - Mapa de localização da área de estudo



Fonte: A Autora (2021).

### 3.1.2 Relevo

A região semiárida possui uma grande variabilidade de relevos, o que faz com existam diversas paisagens. Possui relevo plano e ondulado com vales abertos, com a maior parte da região pertencente à Depressão Sertaneja (CORREIA *et al.*, 2011).

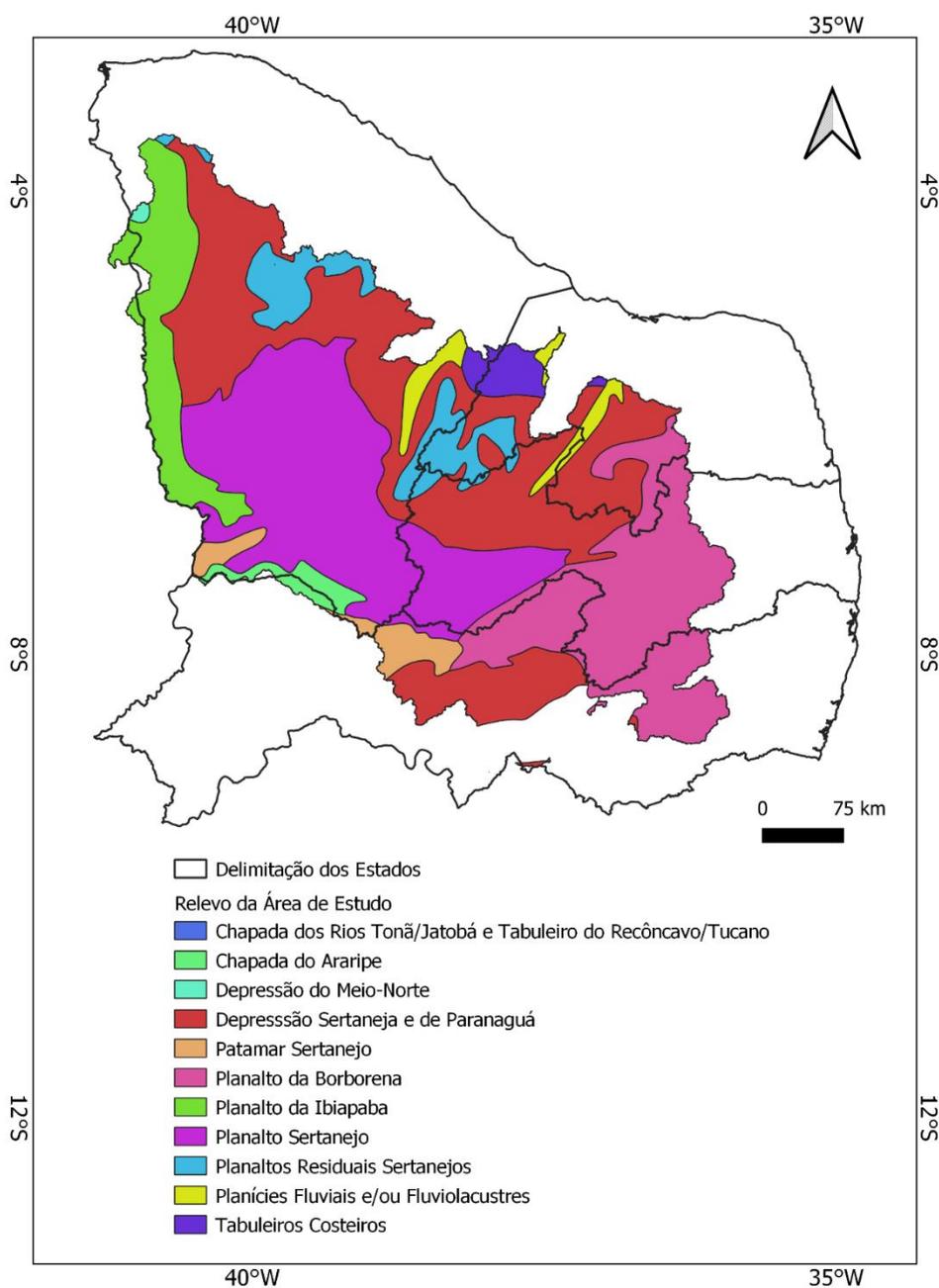
A classificação do relevo da região foi feita de acordo com INSA (2014) e está indicada no Mapa 4. Foram observados 11 tipos de relevos diferentes presentes na área de estudo, que são: Chapadas dos rio Tonã/ Jatobá e Tabuleiro do Recôncavo/Tucano; Chapada do Araripe; Depressão do Meio-Norte; Depressão Sertaneja e de Paranaguá; Patamar Sertanejo; Planalto da Borborema; Planalto do Ibiapaba; Planalto Sertanejo; Planaltos Residuais Sertanejos; Planícies Fluviais e/ou Fluvialacustres; Tabuleiros Costeiros.

No estado de Pernambuco, para a área de estudo delimitada, os relevos predominantes são o Planalto da Borborema e Depressão Sertaneja. No estado da Paraíba, Planalto da Borborema, Depressão Sertaneja e Planalto Sertanejo. No

estado do Rio Grande do Norte, a Depressão Sertaneja. No Ceará, Planalto Sertanejo, Depressão Sertaneja e o Planalto do Ibiapaba.

As altitudes da área de estudo estão indicadas no Mapa 5. As altitudes variam entre 0 e 1200m, com as maiores altitudes na Chapada do Araripe, Serra do Ibiapaba, Planaltos Residuais Sertanejos e Planalto da Borborema.

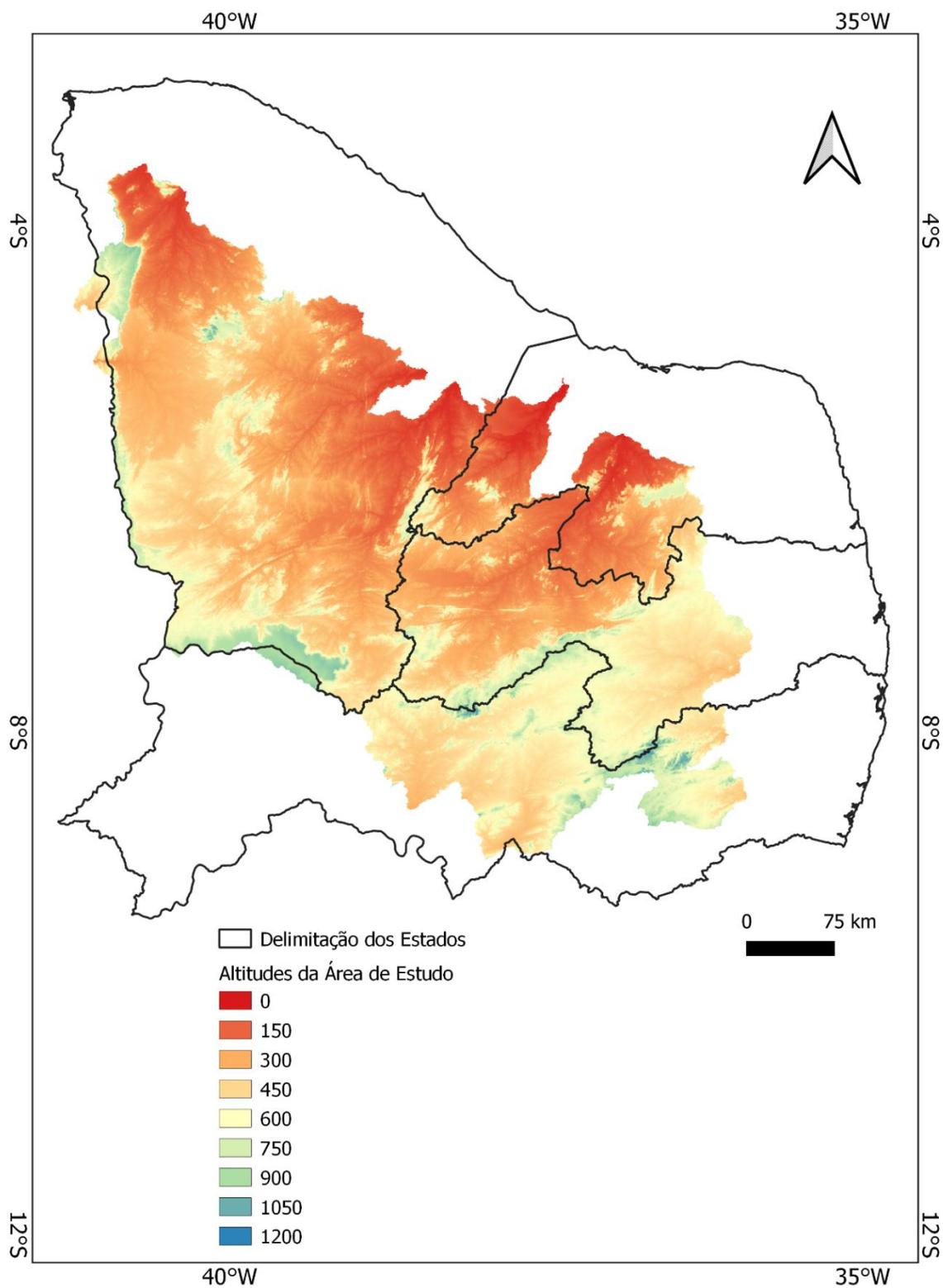
Mapa 4 - Relevos da área de estudo



Fonte: A Autora (2020).

Nota: Adaptado de INSA (2014).

Mapa 5 – Mapa altimétrico da área de estudo



Fonte: A Autora (2021).

Nota: Adaptado de Virães (2018).

### 3.1.3 Hidrografia

A área de estudo abrange 23 bacias dos estados de Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará, localizados na região nordeste do Brasil. As bacias pertencentes a cada estado (Mapa 6) são detalhadas a seguir. São 45 sub-bacias delimitadas a partir de postos fluviométricos (Mapa 7).

Pernambuco:

- Capibaribe;
- Pajeú;
- Moxotó;
- Ipojuca;
- Una.

Paraíba:

- Paraíba;
- Piranhas.

Rio Grande do Norte:

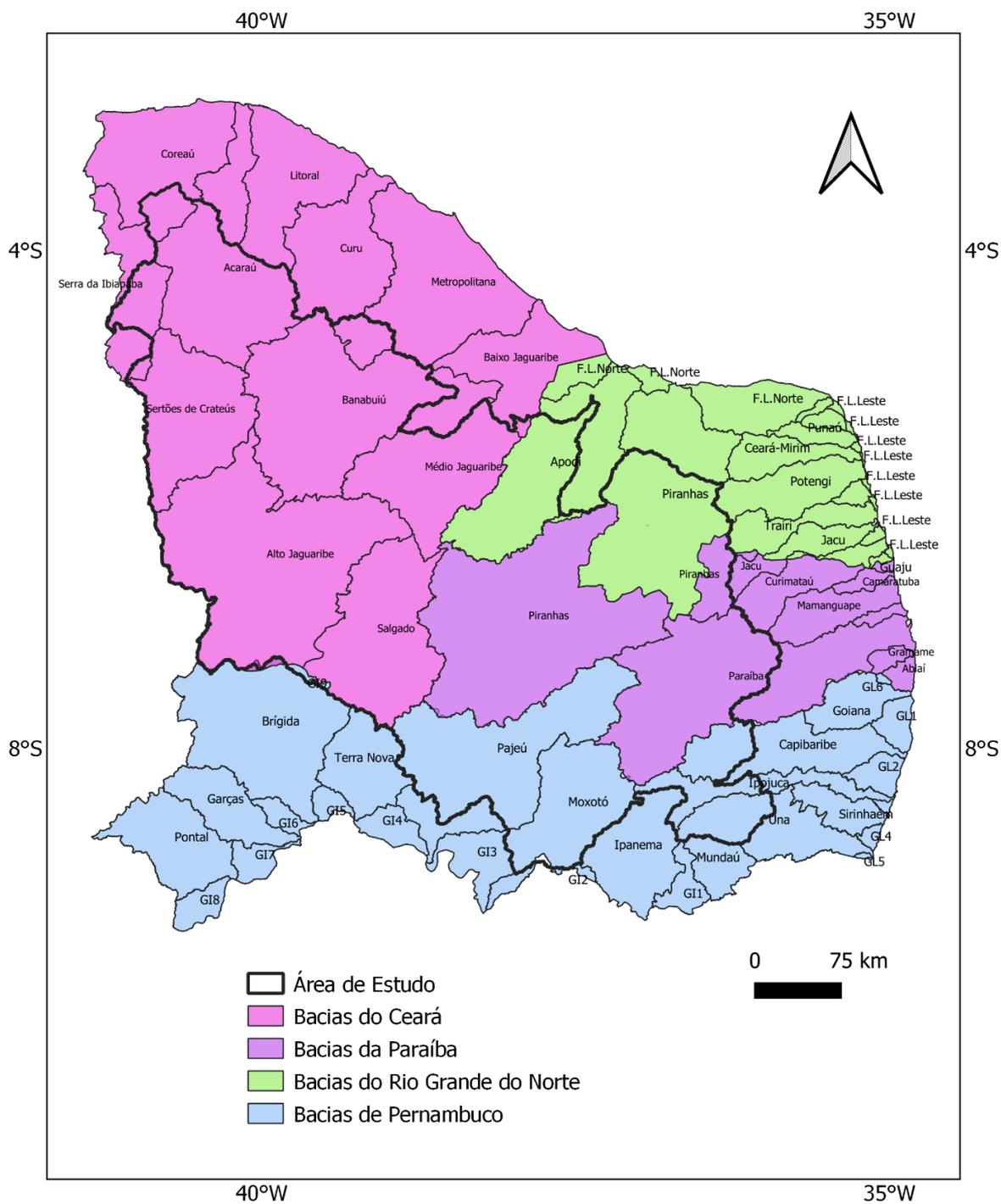
- Apodi;
- Piranhas.

Para o estado do Ceará:

- Acaraú;
- Salgado;
- Metropolitana;
- Sertões do Crateús;
- Serra da Ibiapaba;
- Coreaú;
- Alto Jaguaribe;
- Médio Jaguaribe;
- Banabuiú.

A área de estudo está contida nas sub-bacias 34, 35, 36, 37, 38, 39, 48 e 49, de acordo com a classificação da ANA (Mapa 8). Um estudo aprofundado sobre cada uma está presente no trabalho de Virões (2018).

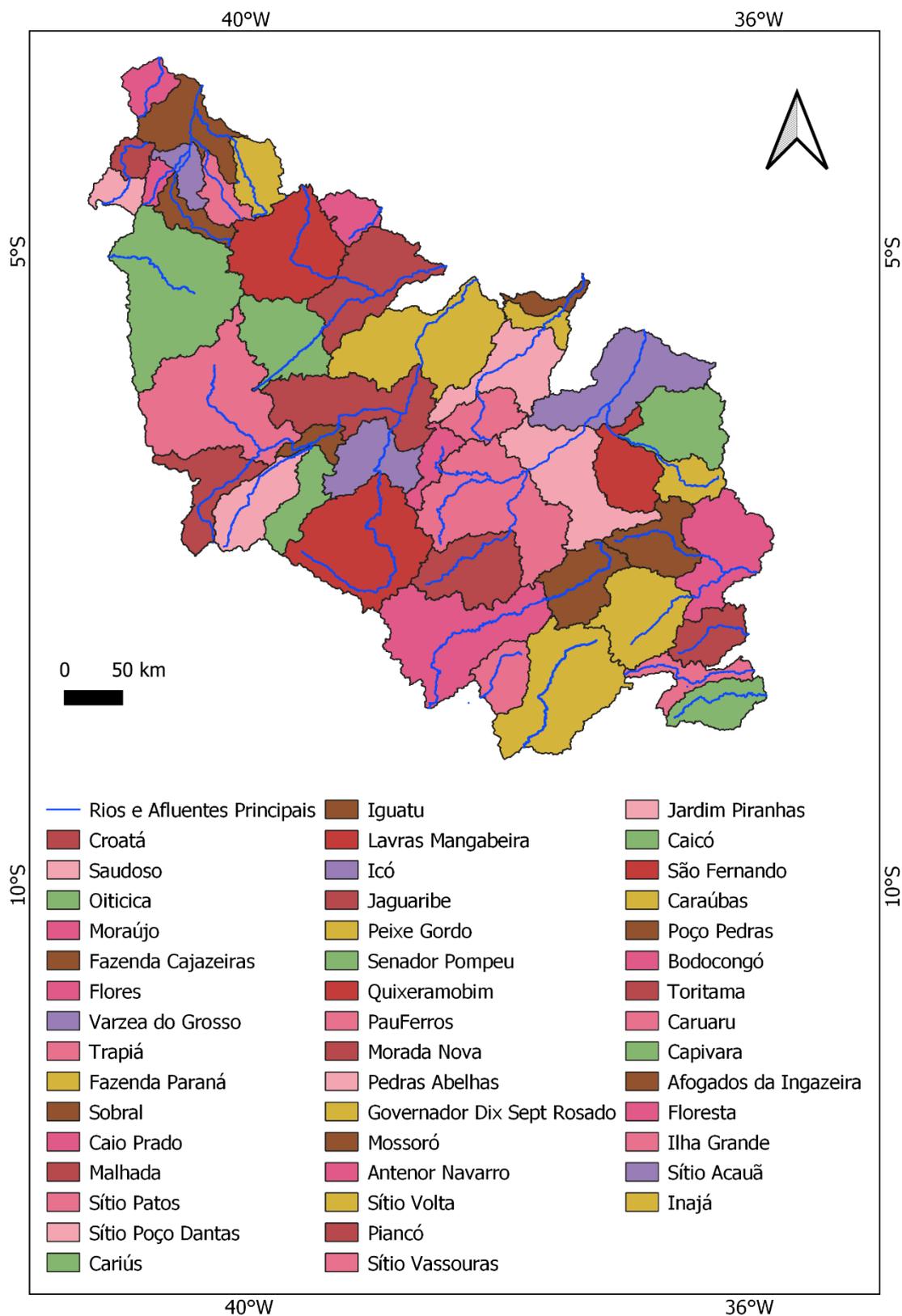
Mapa 6 - Bacias hidrográficas da área de estudo



Fonte: A Autora (2021).

Nota: Adaptado de Virões (2018).

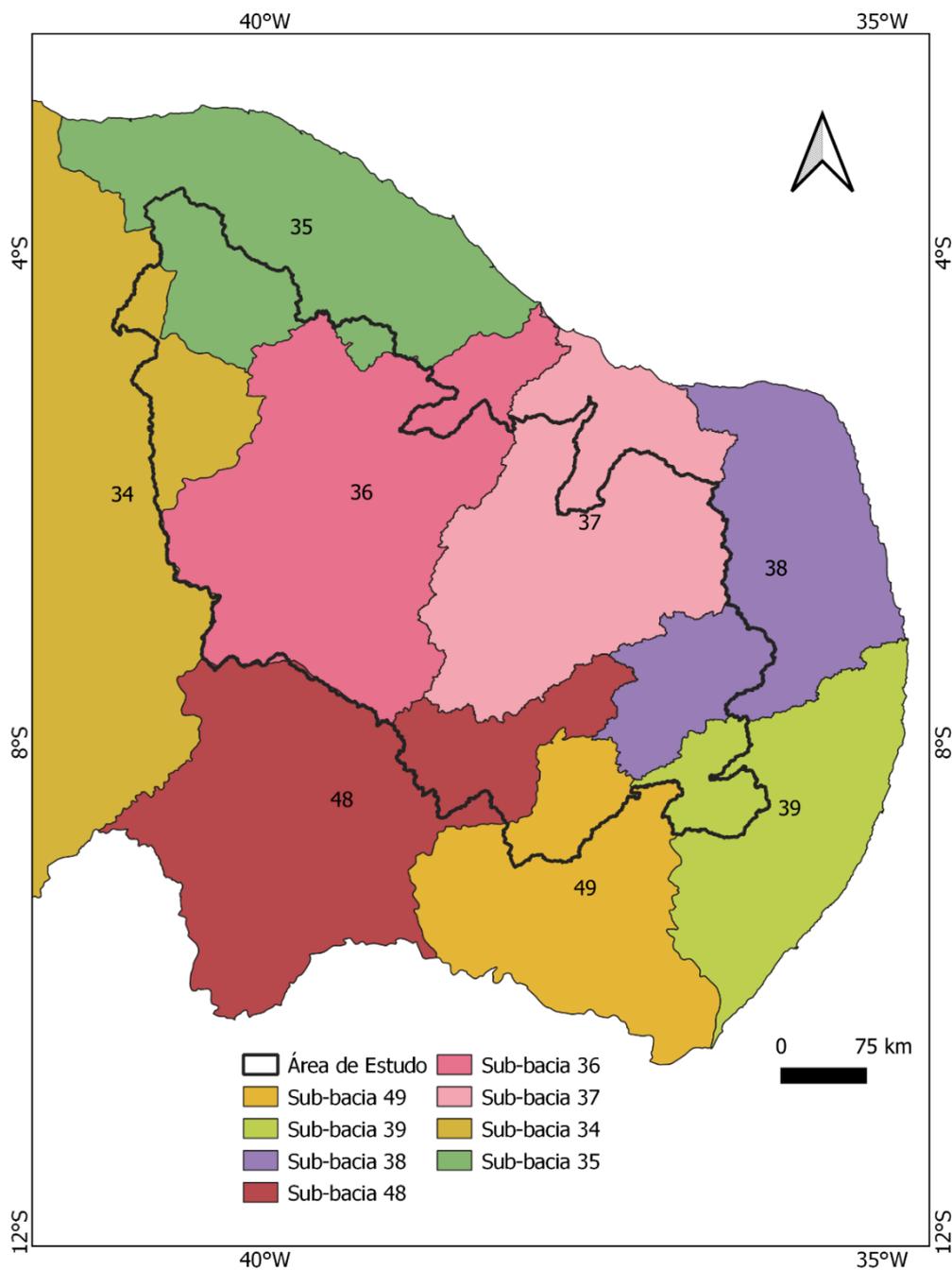
Mapa 7 - Sub-bacias delimitadas



Fonte: A Autora (2021).

Nota: Adaptado de Virões (2018).

Mapa 8 - Sub-bacias em que a área de estudo está abrangida.



Fonte: A Autora (2021).

Nota: Adaptado de Virões (2018).

### 3.1.4 Vegetação

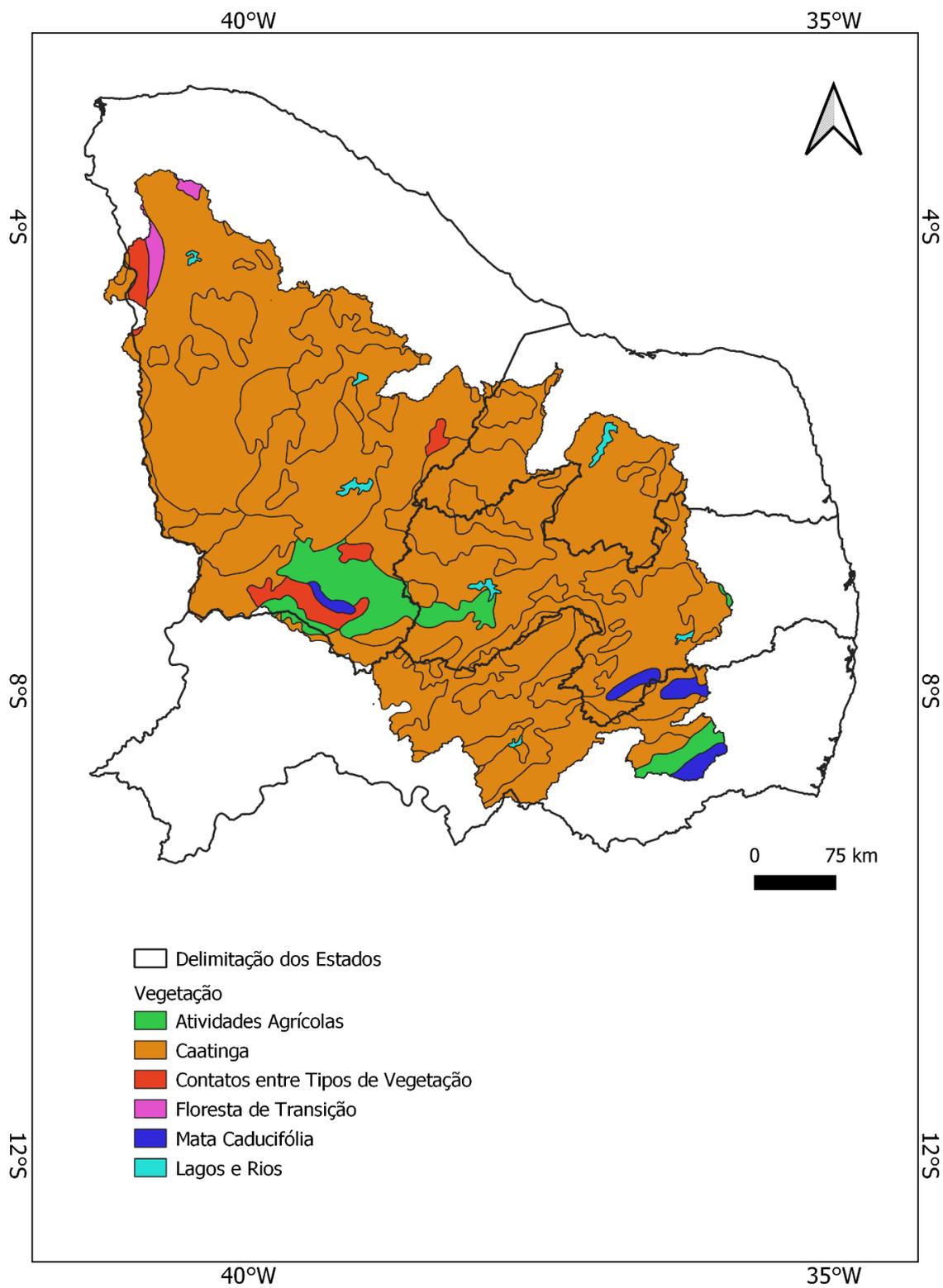
A área de Caatinga, apesar de ser predominante, divide a paisagem com outros como a Mata Caducifólia, como é mostrado no Mapa 9.

Essa área sofre com condições meteorológicas extremas, como a elevada incidência de radiação solar, altas temperaturas, baixa umidade relativa do ar e alta evapotranspiração (LEAL; TABARELLI; SILVA, 2003).

A vegetação dessa região é caracterizada pela queda das folhas durante as estações secas, o que ocorre como consequência da adaptação da vegetação a condição ambiental. É composta por florestas arbustivas com árvores e arbustos baixos. As plantas dessa região são classificadas como xerófilas, por possuírem, em sua maioria, espinhos, armazenamento de água nas raízes e caules, folhas pequenas e cutículas impermeáveis (CORREIA *et al.*, 2011; GIULIETTI *et al.*, 2002).

Grande parte da área de estudo está antropizada, com as áreas urbanas e atividades agrícolas, a última, presente principalmente na região sul do Ceará. Há também, a presença de florestas de transição (noroeste do Ceará), áreas de mata Caducifólia (região entre as divisas de Pernambuco e Paraíba) e áreas onde há a presença de tipos de vegetações diferentes (sul e noroeste do Ceará).

Mapa 9 - Vegetação da Área de Estudo



Fonte: A Autora (2021).

Nota: Adaptado INSA (2014).

### 3.1.5 Clima

De acordo com a delimitação da Sudene (Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste) a área de estudo está completamente contida na região semiárida. Para que uma região seja classificada como semiárida, deve atender aos seguintes critérios: média pluviométrica anual menor ou igual a 800 mm; índice de aridez de Thornthwaite menor ou igual a 50; percentual do déficit hídrico diário maior ou igual 60%, levando em consideração todos os dias do ano (SUDENE, 2020).

A precipitação dessa região é caracterizada pela elevada variabilidade espacial e temporal, isso faz com que em algumas regiões os totais pluviométricos sejam superiores as médias anuais e em outras sejam inferiores. É comum nessa área, a presença de eventos extremos de secas e cheias (CORREIA *et al.*, 2011).

A região também é caracterizada por elevadas temperaturas ao longo do ano. Suas características climáticas são influenciadas por fenômenos de circulação geral da atmosfera. Os quatro principais desses fenômenos, segundo Uvo e Berndtsson (1996), são:

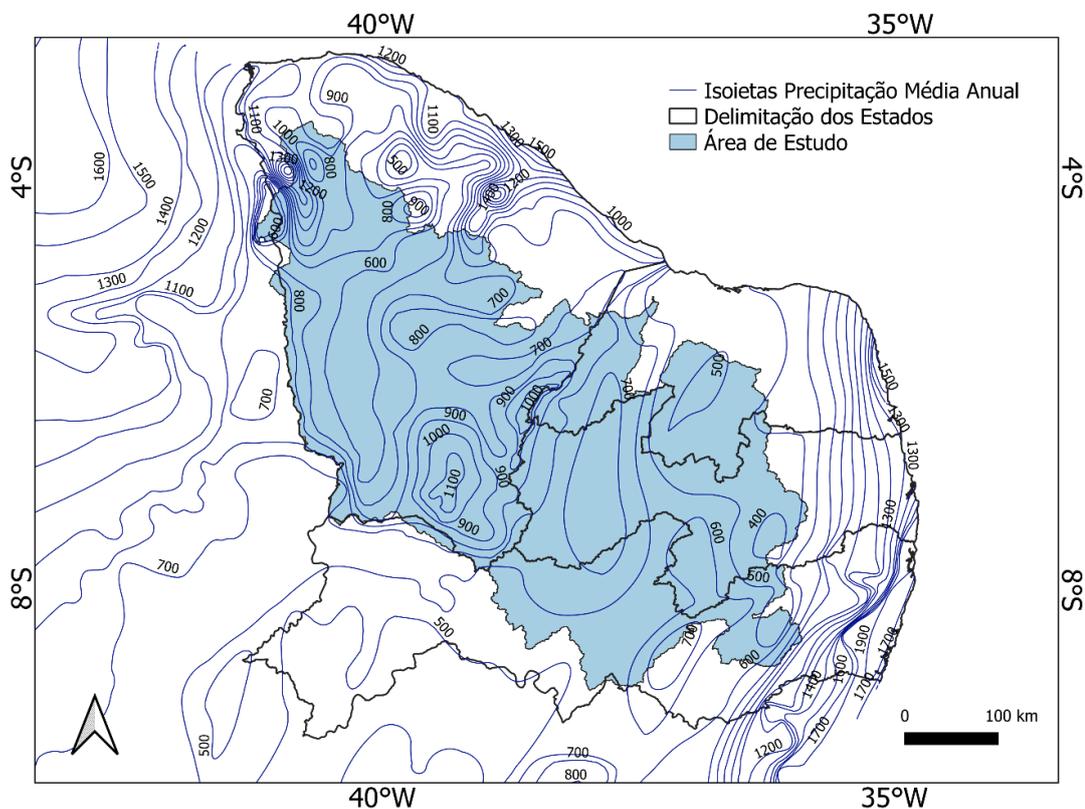
- El Niño;
- Temperatura da superfície do mar do oceano Atlântico, ventos alísios e pressão no nível do mar;
- Zonas de convergência intertropical no oceano Atlântico;
- Frentes frias e vórtices ciclônicos de altos níveis.

De acordo com o mapa das isoietas de precipitações médias anuais fornecidas pela CPRM (Mapa 10) na região de estudo, as precipitações variam de 400 a 1500. Essa diferença de valores deixa clara a grande variabilidade pluviométrica existente na região. O valor máximo é encontrado na região noroeste do estado do Ceará, abrangendo as sub-bacias de 35125000 Moraújo e 35275000 Sobral. E o valor mínimo é encontrado também na região noroeste do estado do Ceará, numa região próxima aos valores máximos, abrangendo as sub-bacias de 34730000 Croatá e 34740000 Saudoso e na região central do Estado da Paraíba, abrangendo a sub-bacia de 38860000 Bodocongó.

O estado que apresenta a maior variabilidade de precipitações médias anuais dentre a área de estudo é o Ceará, com a região central um pouco mais constante, atingindo valores entre 600 e 800 mm. No estado de Pernambuco a variação fica entre

500 e 700 mm. No estado da Paraíba, 400 a 900 mm. No estado do Rio Grande do Norte 500 a 700.

Mapa 10 - Isoietas de Precipitações Médias Anuais



Fonte: A Autora (2021).

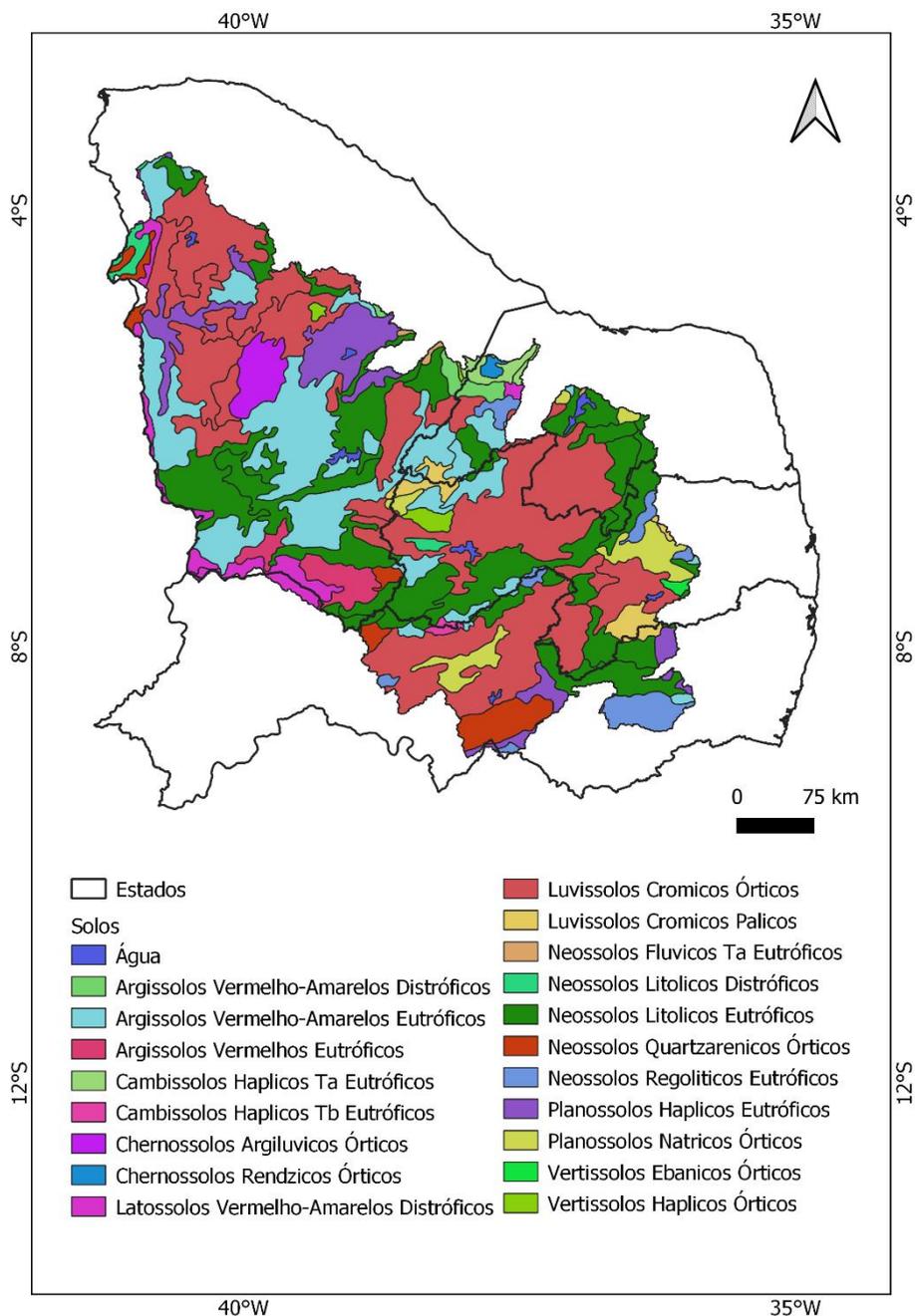
Nota: Adaptado de CPRM (2020).

### 3.1.6 Solos

Os tipos de solos presentes na área de estudo são argissolos, cambissolos, chernossolos, latossolos, luvisolos, neossolos, planossolos e vertissolos (Mapa 11).

Na parte da área de estudo que ocupa o território do estado de Pernambuco, a predominância é de luvisolos. Nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte, luvisolos e neossolos. Já o Ceará possui uma maior variabilidade, com predominância de argissolos, luvisolos e neossolos.

Mapa 11 - Mapa de solos da área de estudo



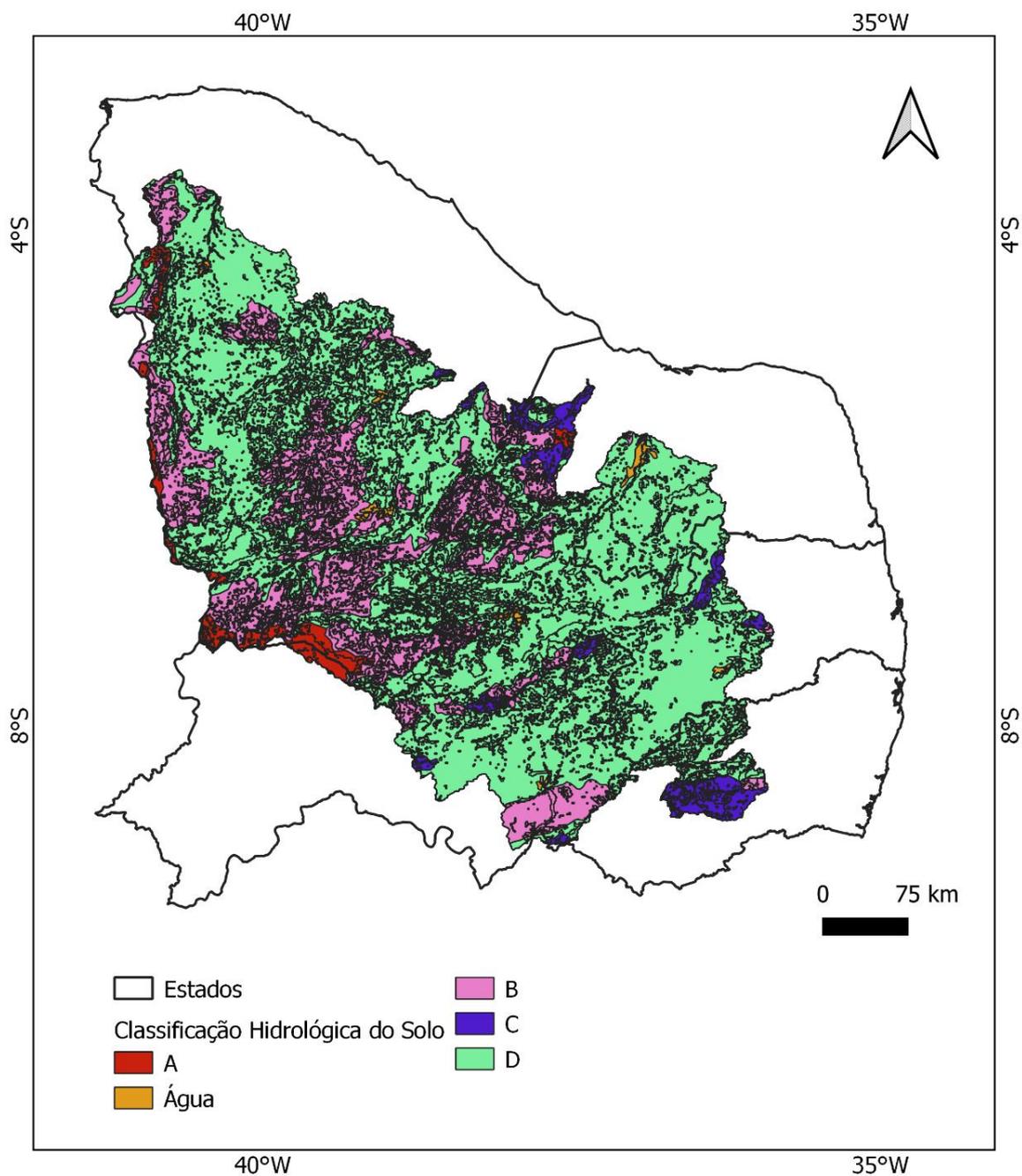
Fonte: A Autora (2021).

Nota: Adaptado de EMBRAPA (2020).

O Mapa 12 apresenta a classificação hidrológica do solo, a partir do mapa de uso e ocupação do solo. As classes são A, B, C e D, que representam a capacidade de infiltração do solo, as com maiores capacidades de infiltração ficando na classe A e as menores na classe D. Por exemplo, os solos arenosos ficam na classe A e os solos argilosos na classe D (SARTORI, 2010). Esse mapa é utilizado para calcular o

parâmetro S do modelo CAWM Versão IV. Ele é utilizado no cálculo do parâmetro Curve Number, que foi explicado anteriormente, sendo que, para cada unidade de área dentro dessas classes há um valor de CN associado, possibilitando o cálculo do S.

Mapa 12 – Classificação hidrológica de acordo com o uso e ocupação do solo



Fonte: A Autora (2021).

Nota: Adaptado de INPE (2020).

### 3.2 METODOLOGIA

Inicialmente foram obtidos todos os dados de entrada, para que fosse possível simular o modelo hidrológico CAWM Versão IV, para todas as bacias hidrográficas que são objeto do estudo apresentadas anteriormente.

Os postos fluviométricos utilizados foram os mesmos presentes no trabalho de Virões (2018). As estações escolhidas têm dados de vazões com, no mínimo, 8 anos consecutivos sem que suas falhas sejam significativas. Esses postos fazem parte da plataforma de dados da ANA (Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico), e a partir deles, foram delimitadas as sub-bacias do estudo.

Os dados pluviométricos foram obtidos através da criação de um banco de dados único, com informações da ANA, APAC (Agência Pernambucada de Águas e Clima) e FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos). Essa incrementação com dados estaduais foi feita para aumentar a quantidade de estações nos cálculos. Os estados que não tiveram seus dados de agências incluídos não disponibilizam os mesmos em plataformas online, o que impossibilitou sua inclusão. Como o modelo hidrológico utilizado é concentrado, os dados de entrada têm que ser médias diárias representativas para toda a bacia e, por isso, o cálculo da chuva média foi realizado através do Método de Thiessen.

Como o volume de informações para cada uma das bacias foi muito elevado, o pré-processamento desses dados se tornou complexo e trabalhoso (seleção no banco, organização temporal, identificação de falhas). Para amenizar esse problema e retirar dados do banco de dados, tratá-los e realizar o cálculo da chuva média, foram utilizados algoritmos desenvolvidos em linguagem Python por Gomes (2019).

Já os dados evaporimétricos foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia. Foram considerados todos os postos de evapotranspiração dentro das sub-bacias em estudo e, quando não havia nenhum posto dentro da mesma, o critério de escolha foi o posto mais próximo e em regiões com características climáticas mais similares.

Para levantar os dados físicos de cada bacia, o primeiro passo foi obter o MDE (Modelo Digital de Elevação) para toda a região de estudo. O MDE utilizado nesse trabalho é fruto do Projeto SRTM, descrito no item 2.5.1.1, disponibilizado pela plataforma *Earth Explorer*, USGS. Os dados do PE3D não foram utilizados por só

existirem para o estado de Pernambuco e assim manter-se a mesma base espacial para toda a região de estudo.

Após a obtenção desses dados, foi necessário preencher os vazios dos pixels do MDE. Depois desse processo, foram iniciadas as subdivisões das bacias, através de uma série de algoritmos presentes no *software* livre QGIS, que são descritos no tópico 3.2.2.

O cálculo do parâmetro S foi realizado segundo os procedimentos descritos no tópico 2.4.1.3 e do mapa apresentado no Mapa 12.

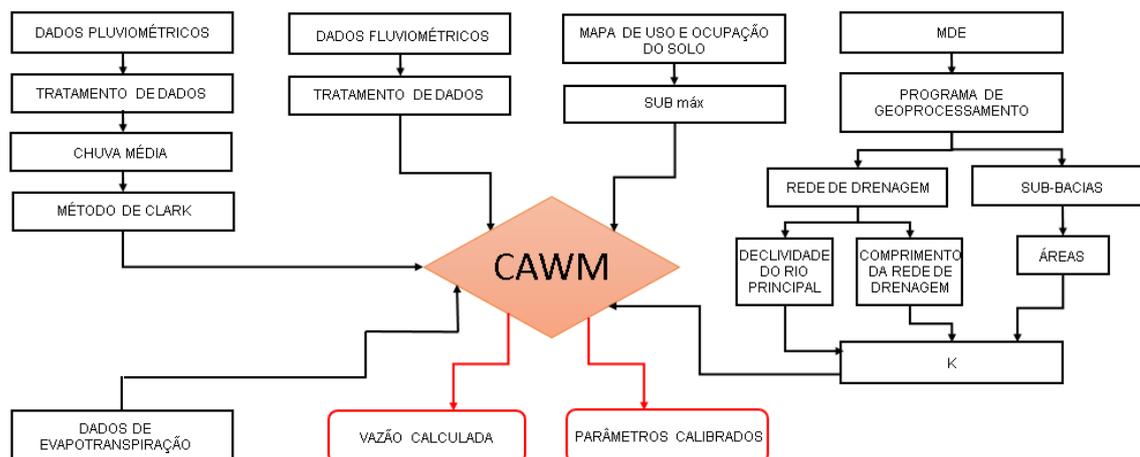
O Fluxograma 1 simboliza os procedimentos utilizados, desde a fase de pré-processamento até à calibração ou validação com o modelo CAWM IV. Quando as sub-bacias analisadas apresentaram tempo de concentração superior a 1 dia, passo de tempo da simulação, aplicou-se uma transformação sobre as precipitações a partir do hidrograma unitário sintético de Clark para considerar o “lag-time” precipitação-vazão.

A versão do modelo CAWM Versão IV utilizada foi a desenvolvida através do *software Microsoft Office Excel* e da sua ferramenta *Solver*. Gomes (2019) desenvolveu uma versão em linguagem Python, porém os procedimentos de calibração ainda se encontram em aperfeiçoamento.

Foram inseridos na planilha os dados de chuva média, vazão, evapotranspiração, parâmetro calculado K e parâmetro calculado S. Para que não fosse necessário utilizar período de aquecimento do modelo, visto que as séries são curtas, foram ajustados parâmetros de estado inicial de reserva de água no solo e no reservatório de calha fluvial, observando o hidrograma para que as vazões calculadas se aproximem das observadas nos dias iniciais. A escolha de período de estiagem para o início da simulação, quando praticamente não há precipitação e vazão nos rios temporários facilita essa inicialização.

Primeiro, cada bacia foi simulada isoladamente considerando como parâmetros calibráveis os já definidos  $K_s$  e  $K_L$ . Depois buscou-se regionalizar seus valores. No estudo de Cirilo et al (2020) para um conjunto de bacias em Pernambuco os autores chegaram a manter apenas o indicador de perdas  $K_L$  variando entre as bacias.

Fluxograma 1 - Modelo CAWM



Fonte: A Autora (2021).

### 3.2.1 Dados hidrológicos

Os dados fluviométricos utilizados provêm da base de dados da ANA. Os dados pluviométricos foram complementados por outras fontes de dados, como descrito a seguir.

#### 3.2.1.1 Dados fluviométricos

Os dados fluviométricos correspondem aos dados de vazão de cada um dos 45 postos escolhidos. A partir deles foram realizadas as subdivisões das bacias. As informações sobre cada posto estão presentes na Tabela 1.

As séries de dados históricas foram retiradas de um banco de dados da ANA, registrados até o final do ano de 2018, organizado por Virões (2018). O software onde o banco de dados está contido é o *Microsoft Office Access*. As estações fluviométricas foram as mesmas propostas por Virões (2018) para as bacias hidrográficas do Atlântico Norte/Nordeste e do Rio São Francisco. O mapa com as sub-bacias delimitadas a partir de cada posto fluviométrico está indicado na Figura 12. Foram desconsideradas do estudo as estações 38129000, 38170000, 38380000, 38440000, 38500000, e 38650000 por apresentarem dados comprometidos por muitas falhas.

A maioria dos postos utilizados possuem mais de 30 anos de dados. 11 estações possuem registros entre 8 e 30 anos e apenas a estação de Oiticica possui 8 anos de dados.

Tabela 1 - Postos pluviométricos em estudo

Código	Nome (Continua)	Rio	Sub-bacia	UF	Longitude	Latitude	Área de drenagem (km <sup>2</sup> )
34730000	Croatá	Macambira	34	CE	-40,911	-4,416	1031
34740000	Saudoso	Macambira	34	CE	-41,125	-4,620	2216
34741000	Oiticica	Poti	34	CE	-41,083	-5,030	10730
35125000	Moraujo	Coreau	35	CE	-40,685	-3,465	1498
35210000	Fazenda Cajazeiras	Acaraú	35	CE	-40,549	-4,378	1563
35223000	Flores	Jatobá	35	CE	-40,562	-4,345	698
35235000	Várzea do Grosso	Acaraú	35	CE	-40,430	-4,144	3653
35240000	Trapiá	Riacho dos Macacos	35	CE	-40,318	-4,195	1530
35258000	Fazenda Paraná	Groaíras	35	CE	-40,126	-4,097	2375
35275000	Sobral	Acaraú	35	CE	-40,339	-3,688	11273
35830000	Caio Prado	Choro	35	CE	-38,943	-4,658	1599
36045000	Malhada	Riacho Conceição	36	CE	-39,962	-6,646	3454
36070000	Sítio Patos	Jaguaribe	36	CE	-39,639	-6,521	13700
36125000	Sítio Poço Dantas	Rio dos Bastiões	36	CE	-39,509	-6,558	3632
36130000	Cariús	Rio Cariús	36	CE	-39,500	-6,534	6000
36160000	Iguatu	Jaguaribe	36	CE	-39,293	-6,374	20824
36270000	Lavras da Mangabeira	Salgado	36	CE	-38,967	-6,750	8910
36290000	Icó	Salgado	36	CE	-38,867	-6,407	12203
36320000	Jaguaribe	Jaguaribe	36	CE	-38,633	-5,900	39689
36390000	Peixe Gordo	Jaguaribe	36	CE	-38,198	-5,228	48283
36470000	Senador Pompeu	Banabuiu	36	CE	-39,381	-5,596	4525
36520000	Quixeramobim	Quixeramobim	36	CE	-39,292	-5,201	7038
36580000	Morada Nova II	Banabuiu	36	CE	-38,446	-5,122	17237

Código	Nome (Continua)	Rio	Sub-bacia	UF	Longitude	Latitude	Área de drenagem (km²)
37030000	Pau dos ferros	Apodí-Mossoró	37	RN	-38,201	-6,111	2197
37080000	Pedra de abelhas	Apodí-Mossoró	37	RN	-37,684	-5,593	6588
37084000	Governador Dix Sept Rosado	Apodí-Mossoró	37	RN	-37,515	-5,450	7690
37090000	Mossoró	Apodí-Mossoró	37	RN	-37,362	-5,219	9786
37260000	Antenor Navarro	Rio do Peixe	37	PB	-38,448	-6,735	1451
37340000	Piancó	Piancó	37	PB	-37,928	-7,204	4555
37410000	Sítio Vassouras	Piranhas-Açu	37	PB	-37,798	-6,726	15212
37470000	Jardim de Piranhas	Piranhas-Açu	37	RN	-37,353	-6,378	21639
37515000	Sítio Volta	Seridó	37	RN	-36,785	-6,594	1868
37559000	Caicó	Seridó	37	RN	-37,091	-6,451	6316
37570000	São Fernando	Seridó	37	RN	-37,180	-6,370	9714
37710150	Sítio Acauã II	Piranhas-Açu	37	RN	-36,891	-5,616	38061
38830000	Caraúbas	Paraíba	38	PB	-36,505	-7,721	5033
38850000	Poço de Pedras	Taperoá	38	PB	-36,434	-7,398	3181
38860000	Bodocongó	Paraíba	38	PB	-36,000	-7,528	13648
39130000	Toritama	Capibaribe	39	PE	-36,058	-8,013	2443
39340000	Caruaru	Ipojuca	39	PE	-36,011	-8,303	1973
39540000	Capivara	Una	39	PE	-35,915	-8,498	2628
48820000	Afogados da Ingazeira	Pajeú	48	PE	-37,642	-7,743	3537
48860000	Floresta	Pajeú	48	PE	-38,577	-8,609	12276
48880000	Ilha Grande	Riacho do Navio	48	PE	-38,166	-8,528	2263
49160000	Inajá	Moxotó	49	PE	-37,827	-8,918	8241

Fonte: A Autora (2021).

Nota: Adaptado de Virões (2017).

- Possuem até 8 anos de dados de vazões
- Possuem de 8 a 30 anos de dados de vazões
- Possuem mais de 30 anos de dados de vazões

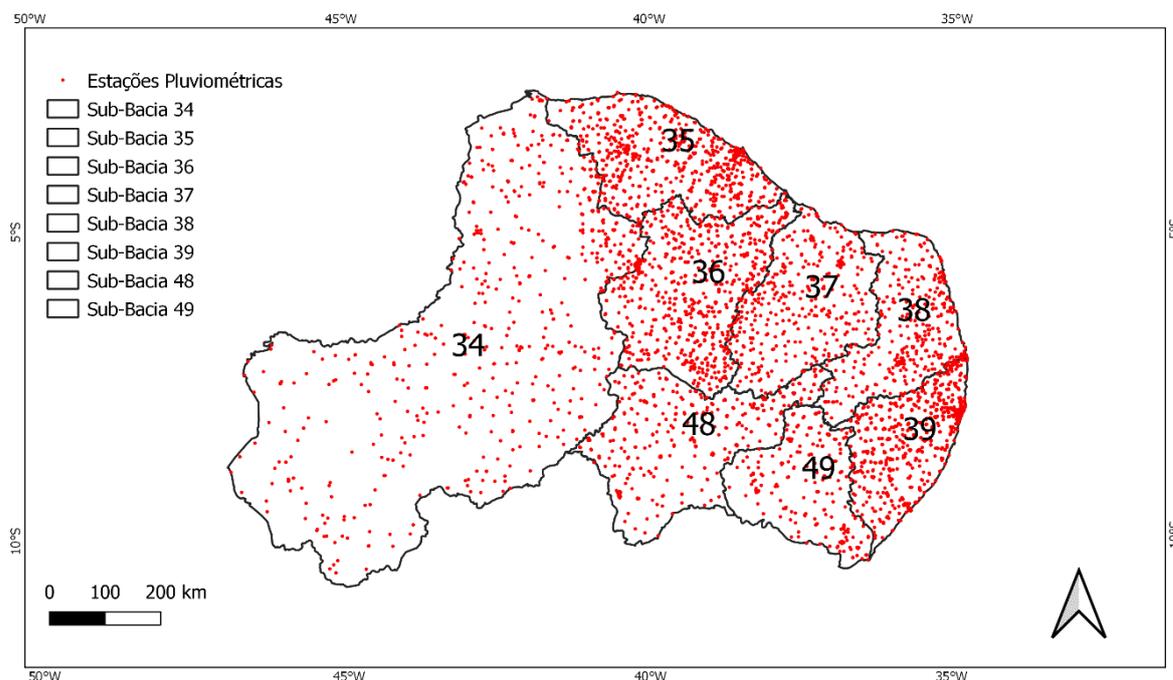
### 3.2.1.2 Dados pluviométricos

Conforme antecipado, a base de dados pluviométricos é composta por dados diários da ANA, APAC e FUNCEME.

O modelo hidrológico utilizado no trabalho foi do tipo concentrado, e, por isso, foi necessário calcular a chuva média de cada sub-bacia estudada. Para que isso fosse possível, foi necessário utilizar uma série de algoritmos escritos na linguagem computacional Python, para realizar o processo de tratamento e manipulação dos dados obtidos. Esses cálculos são descritos a seguir.

A planilha contendo a quantidade de postos pluviométricos utilizados em cada sub-bacia está presente no Apêndice A. Foram utilizadas entre 21 e 618 estações para cada uma. Na Mapa 13 apresenta-se o mapa indicando todos os postos pluviométricos disponíveis para a área de estudo.

Mapa 13 - Postos pluviométricos da área de estudo



Fonte: A Autora (2021).

#### 3.2.1.2.1 Chuva Média

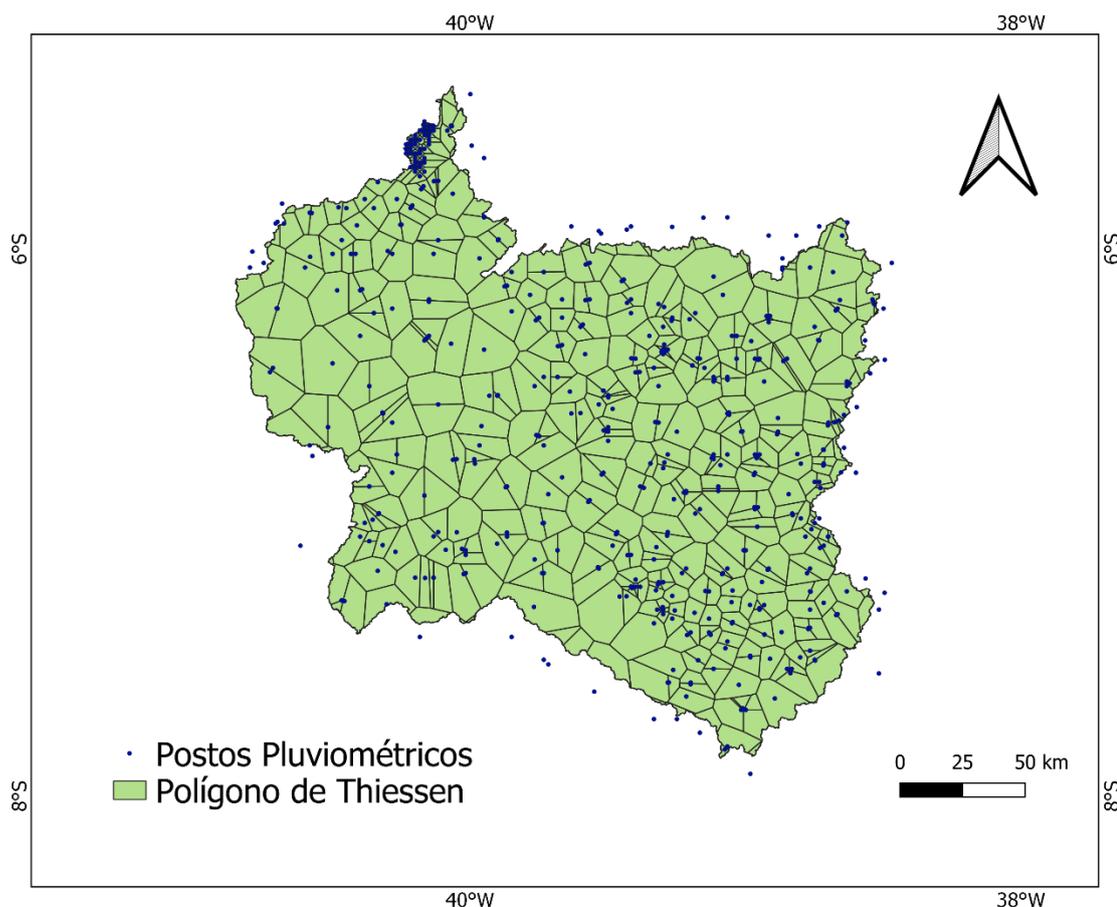
A chuva média foi calculada através do Método de Thiessen, onde cada estação pluviométrica possui uma área de influência que é delimitada através de um

desenho poligonal. Por esse método considerar áreas de influência, as estações utilizadas no cálculo não serão necessariamente apenas as localizadas dentro da sub-bacia utilizada, sendo portanto consideradas estações pluviométricas presentes na sub-bacia e em seus arredores.

Depois da criação dos Polígonos de Thiessen são calculados os fatores de área de cada estação pluviométrica que possui área de influência dentro da sub-bacia. O fator de área é uma razão entre a área de influência da estação dentro da bacia. Quando em um dado dia não existe dado de chuva, a área de influência desse posto é redistribuída proporcionalmente entre as demais pelo algoritmo.

O Mapa 14 ilustra um exemplo desse polígono na sub-bacia 36320000 Jaguaribe.

Mapa 14 - Polígono de Thiessen e estações pluviométricas da estação Jaguaribe



Fonte: A Autora (2021).

### 3.2.1.2.2 Método de Clark

O Método de Clark foi utilizado para calcular a defasagem da chuva média em bacias com tempo de concentração superior a um dia, visto que o modelo CAWM tem passo de tempo diário. Considerou-se no trabalho, para isso, as sub-bacias até cada estação fluviométrica com área superior a 10.000 km<sup>2</sup>, estimando-se que a partir dessa área as bacias tenham tempo de concentração superior a 1 dia.

As ordenadas do histograma tempo-área são calculadas pelas Equações 29 a 31. Essas ordenadas foram utilizadas para redistribuir as precipitações médias no tempo, antes da modelagem chuva-vazão.

$$A_c = at^n \quad (29)$$

Para  $0 \leq t \leq 0,5t_c$

$$A_c = 1 - a(1 - t)^n \quad (30)$$

Para  $0,5t_c \leq t \leq 1$

$$a = \frac{0,5}{\left(\frac{t_c}{2}\right)^n} \quad (31)$$

Onde:

t – tempo de percurso;

t<sub>c</sub> – tempo de concentração;

n – coeficiente da forma da bacia;

Para realizar esse cálculo, foi estimado um tempo de concentração através da fórmula da US Corpus of Engineers (Equação 32).

$$t_c = 0,191 \frac{L^{0,76}}{I^{0,19}} \quad (32)$$

Uma alternativa à utilização do método de Clark é proposta por Cirilo et al (2020) para considerar a variabilidade espacial das precipitações que ocorrem na região. Consiste na defasagem no tempo dos dados de cada posto pluviométrico, de

modo proporcional à extensão do caminho que seria percorrido pelo escoamento decorrente das precipitações ocorridas em cada posto até o exutório (distância hidrológica). O estudo analisa o efeito de diferentes distribuições espaciais para uma mesma precipitação média. Esta técnica não é utilizada na presente pesquisa por conta do volume muito grande de dados que estão sendo processados e ainda não se dispor de um programa computacional que automatize o procedimento desenvolvido por Cirilo et al (2020).

### 3.2.1.3 Programas de pré-processamento de dados hidrológicos

Como os bancos de dados são ferramentas computacionais feitas com o intuito de abranger um volume de informações muito grande, foram necessárias algumas rotinas de programação para poder organizar e configurar as informações de forma a coincidir com o formato de entrada do modelo hidrológico utilizado. Essas rotinas foram desenvolvidas por Gomes (2019), estão detalhadas nos Anexos A, B, C, D e E e serão apresentadas a seguir.

Para os dados de vazão, as rotinas utilizadas são a II, III e IV. Para os dados de chuva, foram utilizadas as rotinas I, III, IV e V.

- I. `Matriz_access_input.py`: Esse código é uma das duas rotinas que tem por objetivo a obtenção das informações do Banco de Dados da ANA, presente no *Software Microsoft Office Access*. As informações obtidas por ele são referentes aos postos pluviométricos. Esses postos são listados em um arquivo no formato `formaco.csv` do *Software Microsoft Office Excel*. Os dados originalmente posicionados em linhas, são realocados em colunas, a primeira delas contendo a data e as demais cada posto (Anexo A).
- II. `Matriz_access_vazoes.py`: Esse código é a segunda rotina que retira informações do Banco de dados da ANA, no caso dos postos fluviométricos. Os postos utilizados também são listados em um arquivo no formato `.csv`. Assim como o algoritmo anterior, os dados posicionados em linhas no arquivo original são transpostos para colunas, com a primeira coluna contendo a data e as demais os dados de cada posto fluviométrico (Anexo B).
- III. `Calcula_intervalo_dados.py`: Utilizado para verificar se há intervalos de dados com falhas e indicar o começo e fim de cada um desses intervalos. Indica as

datas de começo e fim de cada intervalo contínuo. São usados tanto com os dados de chuva quando de vazões (Anexo C).

- IV. `Uniformizar_serie.py`: Realiza o preenchimento dos intervalos falhos identificados anteriormente, porém só completa as datas, sem inserir valores pluviométricos ou fluviométricos (Anexo D).
- V. `Chuva_media.py`: Calcula a chuva média, tendo como dados de entrada o arquivo uniformizado com as estações pluviométricas de cada sub-bacia e o arquivo contendo as estações selecionadas e seus respectivos fatores de área (Anexo E).

#### 3.2.1.4 Dados de Evapotranspiração

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) disponibiliza dados de evapotranspiração para diversas cidades brasileiras. A escolha desses postos se deu da seguinte forma: foi calculada uma média aritmética com os dados de todos os postos localizados no interior de cada sub-bacia. No caso da inexistência de postos de evapotranspiração dentro das sub-bacias, foi escolhido o posto mais próximo da mesma e com características climáticas mais similares. A Tabela 2 apresenta os postos utilizados, com seus respectivos códigos.

Tabela 2 - Postos de Evapotranspiração

Posto Fluviométrico		Posto de Evapotranspiração	
Código	Nome (Continua)	Código	Cidade
34730000	Croatá	82583	Crateús
34740000	Saudoso	82583	Crateús
34741000	Oiticica	82583	Crateús
35125000	Moraujo	82392	Sobral
35210000	Fazenda Cajazeiras	82583	Crateús
35223000	Flores	82583	Crateús
35235000	Várzea do Grosso	82583	Crateús
35240000	Trapiá	82392	Sobral
35258000	Fazenda Paraná	82392	Sobral
35275000	Sobral	82392	Sobral
35830000	Caio Prado	82487	Guaramiranga
36045000	Malhada	82777	Campos Sales

<b>Posto Fluviométrico</b>		<b>Posto de Evapotranspiração</b>	
<b>Código</b>	<b>Nome (Continua)</b>	<b>Código</b>	<b>Cidade</b>
36045000	Malhada	82777	Campos Sales
36070000	Sítio Patos	82777; 82683	Campos Sales; Tauá
36125000	Sítio Poço Dantas	82777	Campos Sales
36160000	Iguatu	82686; 82683;82777	Iguatu; Tauá; Campos Sales
36270000	Lavras da Mangabeira	82784	Barbalha
36290000	Icó	82784	Barbalha
36320000	Jaguaribe	82686; 82683;82777; 82784	Iguatu; Tauá; Campos Sales; Barbalha
36390000	Peixe Gordo	82686; 82683;82777; 82785	Iguatu; Tauá; Campos Sales; Barbalha
36470000	Senador Pompeu	82586	Quixeramobim
36520000	Quixeramobim	82586	Quixeramobim
36580000	Morada Nova II	82586	Quixeramobim
37030000	Pau dos ferros	82591	Mossoró
37080000	Pedra de abelhas	82591	Mossoró
37084000	Governador Dix	82591	Mossoró
37090000	Sept Rosado		
37090000	Mossoró	82591	Mossoró
37260000	Antenor Navarro	82791	Patos
37340000	Piancó	82791	Patos
37410000	Sítio Vassouras	82791	Patos
37470000	Jardim de Piranhas	82791	Patos
37515000	Sítio Volta	82791	Patos
37559000	Caicó	82791	Patos
37570000	São Fernando	82791	Patos
37710150	Sítio Acauã II	82791	Patos
38830000	Caraúbas	82792	Monteiro
38850000	Poço de Pedras	82791	Patos
38860000	Bodocongó	82792	Monteiro
39130000	Toritama	82797	Surubim
39340000	Caruaru	82892	Pesqueira
39540000	Capivara	82893	Garanhuns
48820000	Afogados da Ingazeira	82792	Monteiro

Posto Fluviométrico		Posto de Evapotranspiração	
Código	Nome (Continua)	Código	Cidade
48860000	Floresta	82792	Monteiro
48880000	Ilha Grande	82792	Monteiro
49160000	Inajá	82892	Pesqueira

Fonte: A Autora (2021).

### 3.3 TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO

O modelo digital de elevação (MDE) fornece informações georreferenciadas que são importantes para obtenção de dados em estudos hidrológicos. Alguns dados de entrada do modelo hidrológico CAWM são obtidos através de ferramentas de geoprocessamento

#### 3.3.1 Tratamento do MDE

O MDE utilizado foi o produto do projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), obtido através do *site Earth Explorer*, pertencente a *United States Geological Survey* (USGS), com resolução espacial de 30 metros. Algumas falhas de dados foram observadas, como *pixels* vazios do MDE. Para corrigir esse problema, foi necessária a utilização de uma sequência de comandos pertencentes a ferramentas de geoprocessamento.

A série de comandos utilizada identificou as falhas presentes no MDE, através de camadas vetoriais em cores diferentes se sobrepondo, gerando duas categorias: 0 (demais pixels) e 1 (sem dados). Em seguida, foram preenchidos os pixels inexistentes, quando identificadas falhas com o algoritmo anterior a partir da categoria 1 (sem dados). Depois disso, os pixels foram preenchidos no MDE original.

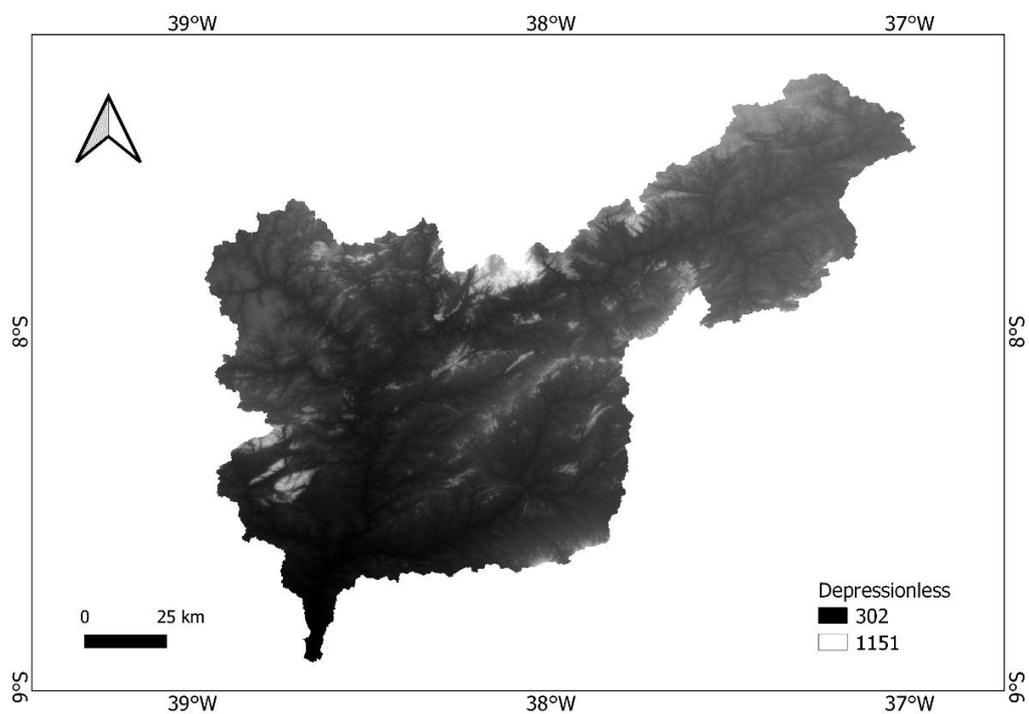
#### 3.3.2 Subdivisão da bacia

O parâmetro K é um dos dados de entrada do modelo CAWM e, como visto anteriormente depende das características físicas da sub-bacia em estudo, como área, rede de drenagem e declividade do rio principal. Esses dados só podem ser obtidos através de ferramentas de geoprocessamento. O *Software* utilizado foi o QGIS, principalmente por ser de livre acesso. Dentro do *Software* a ferramenta

GRASS é utilizada nesse processo, a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) de cada sub-bacia em estudo. Os algoritmos envolvidos nesse processo e seus produtos serão apresentados a seguir, considerando como exemplo a bacia hidrográfica do rio Pajeú, em Pernambuco.

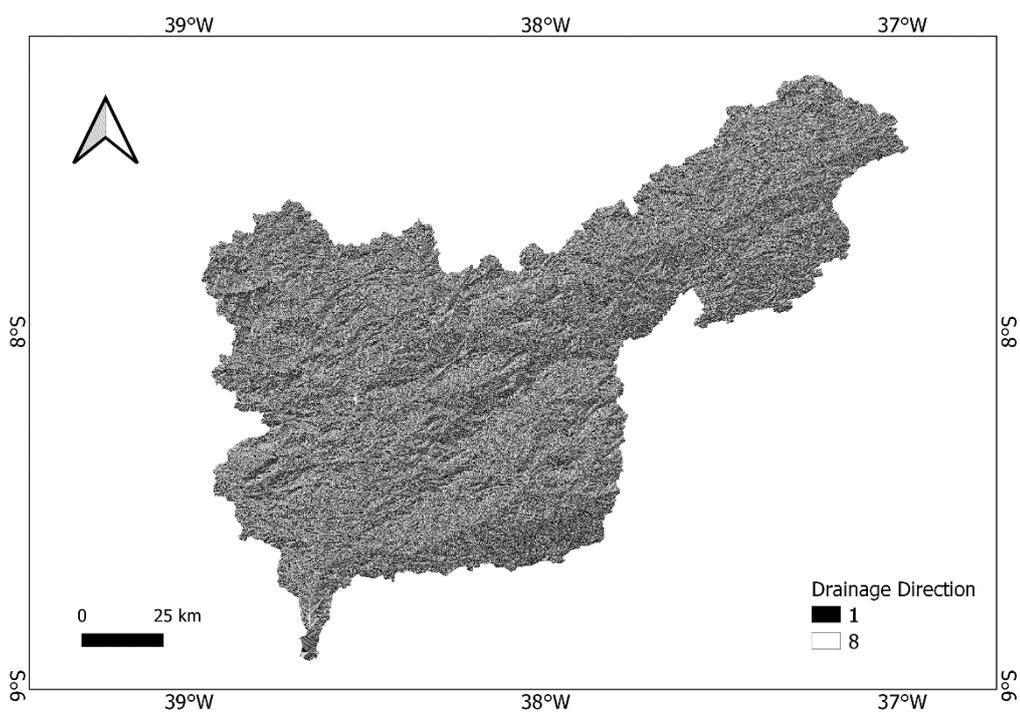
- I. *R.fill.dir*: Responsável por retirar as depressões do MDE da bacia hidrográfica escolhida para o estudo.  
Entrada: MDE da sub-bacia.  
Saída: Arquivo sem depressões, chamado *Depressionless* (Mapa 15).
- II. *R.watershed*: Responsável por gerar arquivos matriciais da rede de drenagem, sub-bacias e direção de drenagem da bacia em estudo.  
Entrada: *Depressionless*.  
Saída: *Drainage direction* (Direção da drenagem) (Mapa 16) e *Streams segments* (Rede de drenagem)
- III. *R.to.vect*: Algoritmo utilizado para vetorizar os arquivos matriciais produzidos anteriormente.  
Entrada: *Stream segments*.  
Saída: Rede de drenagem vetorizada (Mapa 17).
- IV. *R.water.outlet*: A partir da direção de drenagem da bacia hidrográfica e das coordenadas geográficas dos postos fluviométricos, são delimitadas sub-bacias, que são o objeto de estudo desse trabalho.  
Entrada: Coordenada da estação fluviométrica e *Drainage direction*.  
Saída: *Basin* (Sub-bacia) (Mapa 18).
- V. *R.to.vect*: Novamente utilizado para vetorizar o arquivo da sub-bacia que é produzido em formato matricial.  
Entrada: *Basin*.  
Saída: Vetor da sub-bacia (Mapa 19).

Mapa 15 - Raster com MDE sem depressões



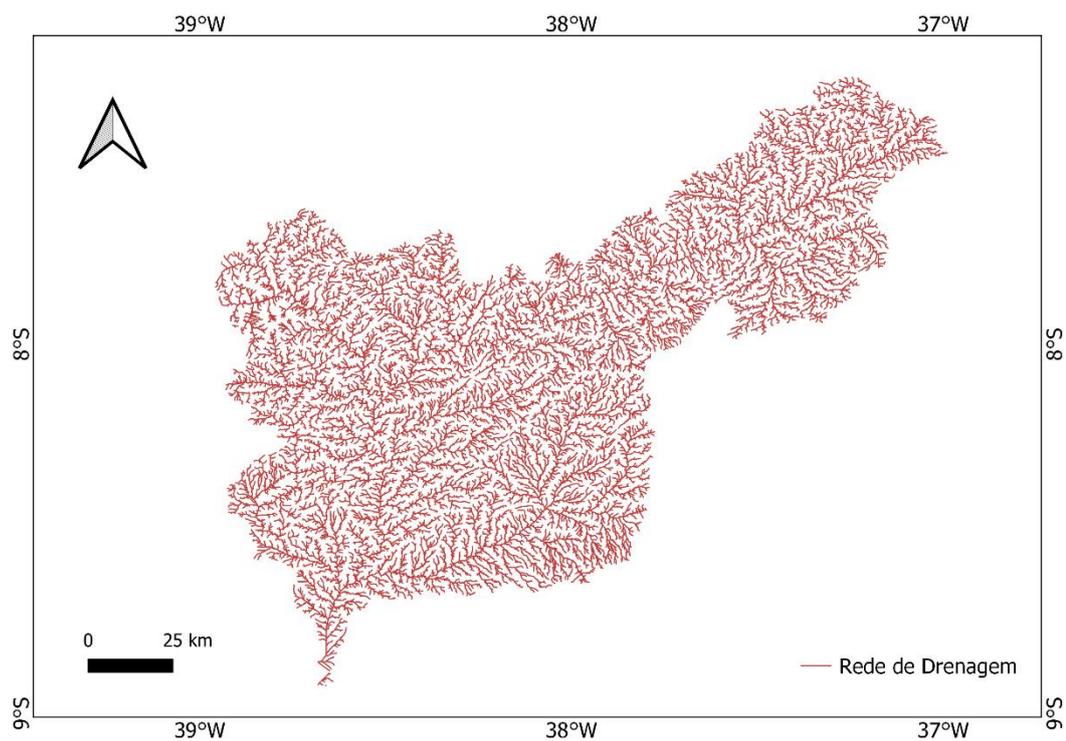
Fonte: A Autora (2021).

Mapa 16 - Raster com direção de drenagem da bacia do Rio Pajeú



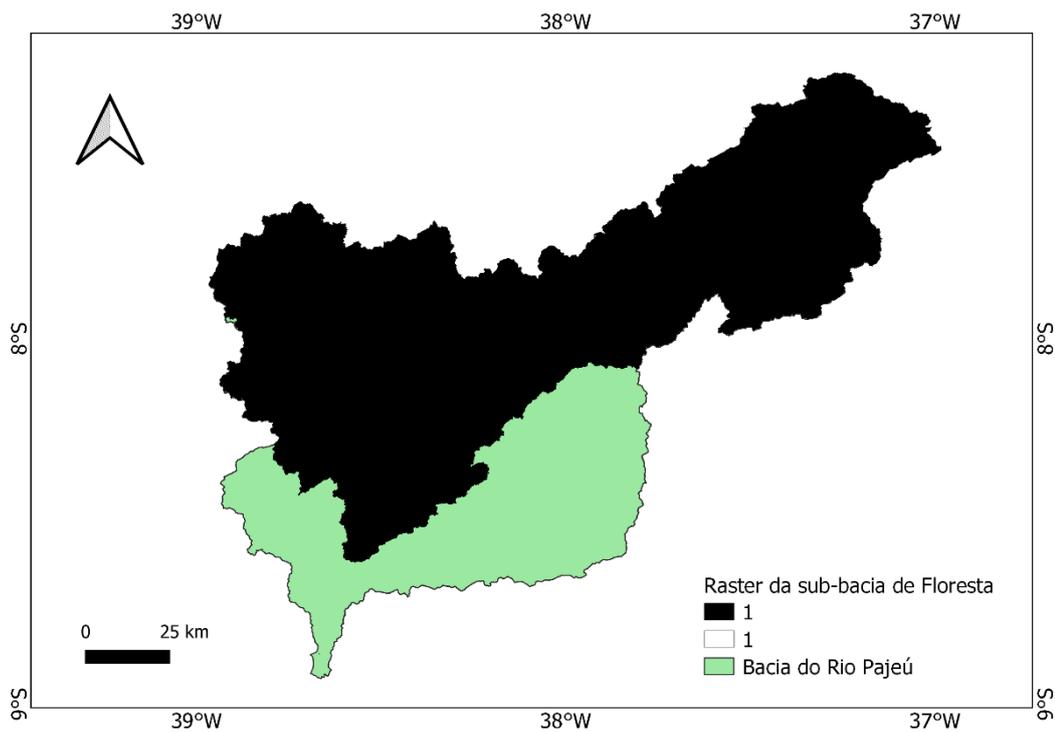
Fonte: A Autora (2021).

Mapa 17 - Rede de drenagem da bacia do Rio Pajeú



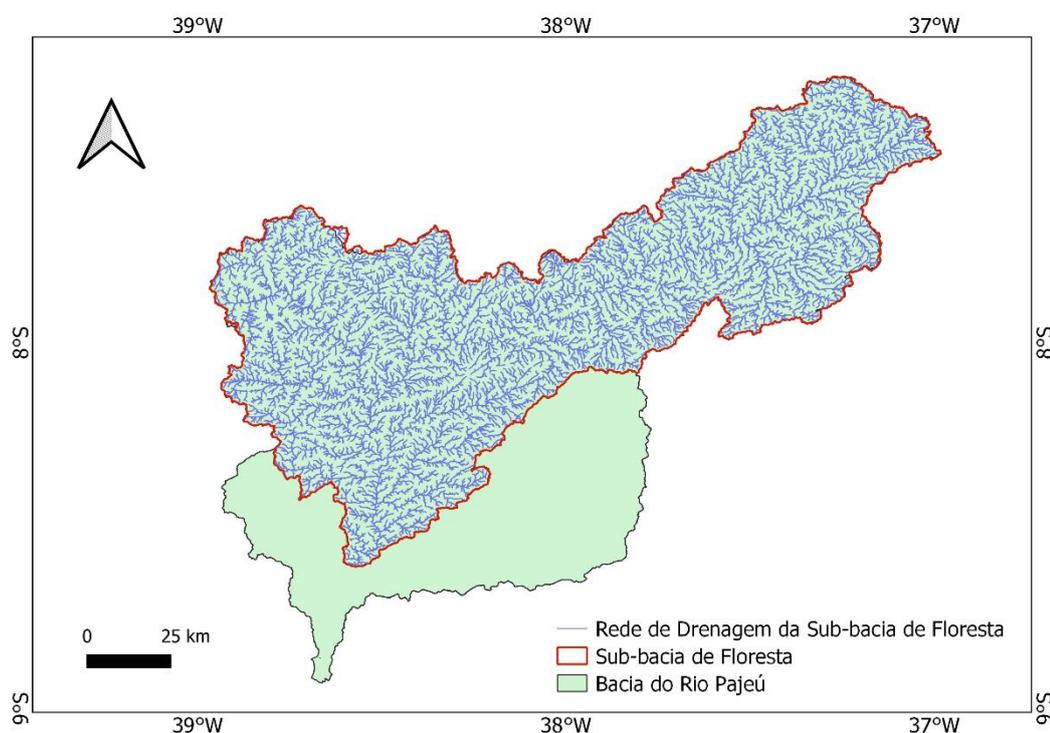
Fonte: A Autora (2021).

Mapa 18 - Raster com delimitação da sub-bacia de Floresta



Fonte: A Autora (2021).

Mapa 19 - Delimitação da sub-bacia de Floresta e rede de drenagem vetorizados

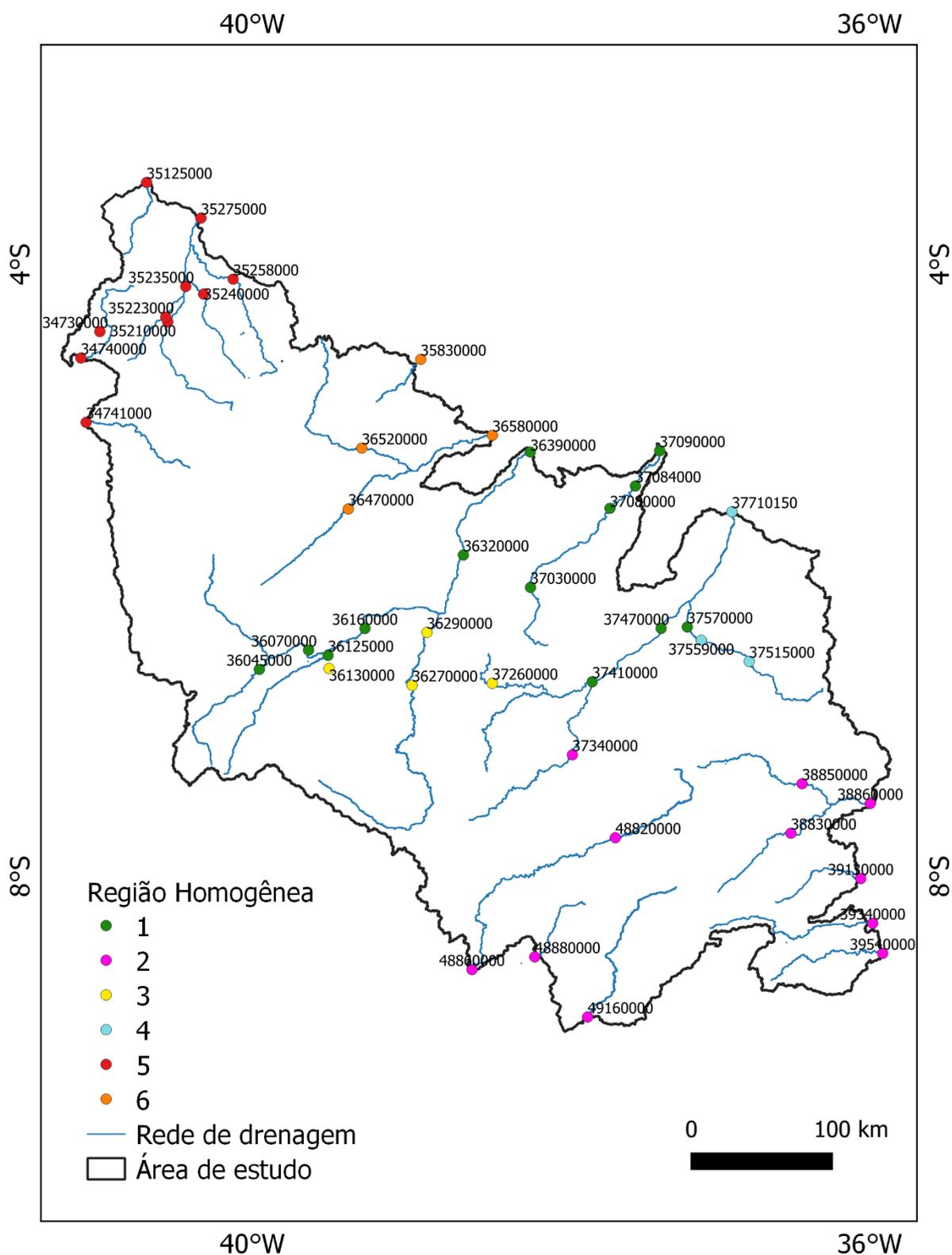


Fonte: A Autora (2021).

### 3.4 DIVISÃO DE REGIÕES HOMOGÊNEAS

Para possibilitar a regionalização do parâmetro  $K_L$ , foi necessário dividir as estações fluviométricas da área em estudo em regiões homogêneas, de acordo com suas características hidrológicas. Para isso, foi utilizado o programa SisCORV 1.0 - Sistema Computacional para Regionalização de Vazões, desenvolvido na Universidade Federal de Viçosa (ANA, 2013). O método utilizado foi o da curva adimensional, com a variável representativa das características físicas e climáticas sendo as vazões máximas. O programa usa como dados de entrada as vazões das estações fluviométricas obtidas no site da ANA e gera gráficos de dispersão das vazões adimensionalizadas e tabelas contendo o coeficiente angular, linear e o coeficiente estatístico  $R^2$  de cada posto fluviométrico. O resultado é obtido através de tentativas, fazendo com que as regiões homogêneas tenham a melhor correlação possível entre si e está apresentado no Mapa 20. As 45 estações fluviométricas foram divididas em 6 regiões homogêneas.

Mapa 20 - Regiões homogêneas



Fonte: A Autora (2021).

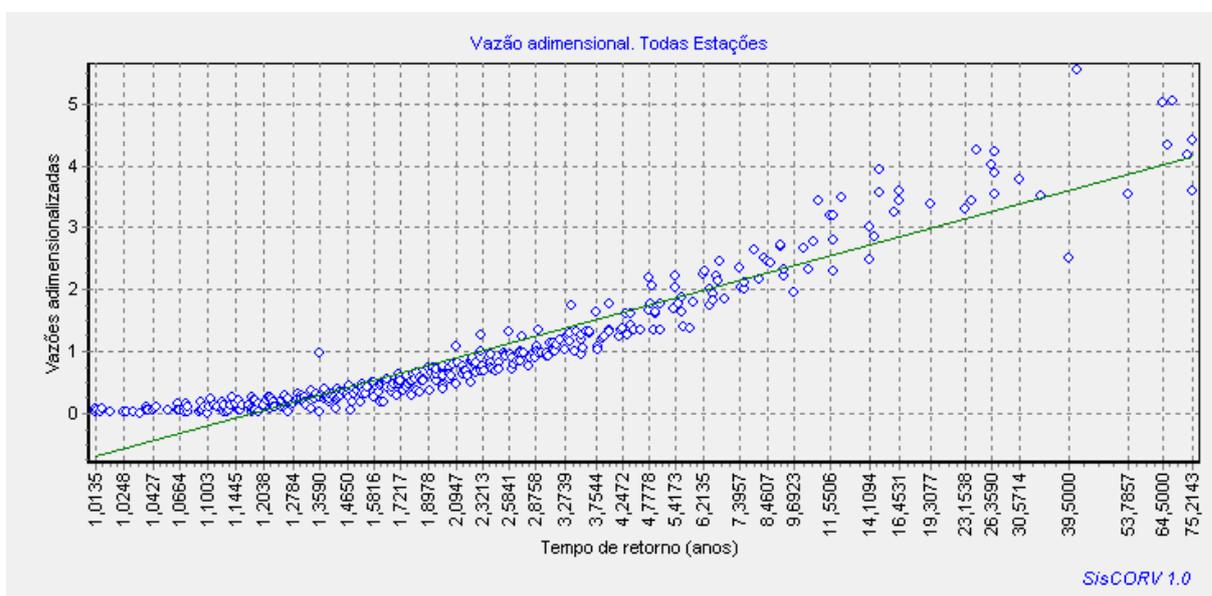
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados e discussões divididos em dois tópicos, o de regiões homogêneas e de calibração do modelo.

### 4.1 REGIÕES HOMOGÊNEAS

No Mapa 26 são apresentadas as 6 regiões homogêneas, com os códigos de estações pertencentes a cada uma. Os gráficos de dispersão das vazões adimensionais versus o tempo de retorno para cada uma das regiões homogêneas estão apresentados nos Gráficos 1, 2, 3, 4, 5 e 6. Essa foi a melhor divisão, considerando as características hidrológicas e a proximidade espacial das estações. Já as Tabelas 3, 4, 5, 6, 7 e 8 mostram os coeficientes lineares e angulares, além do coeficiente de correlação estatístico  $R^2$  para cada posto fluviométrico.

Gráfico 1 - Região homogênea 1



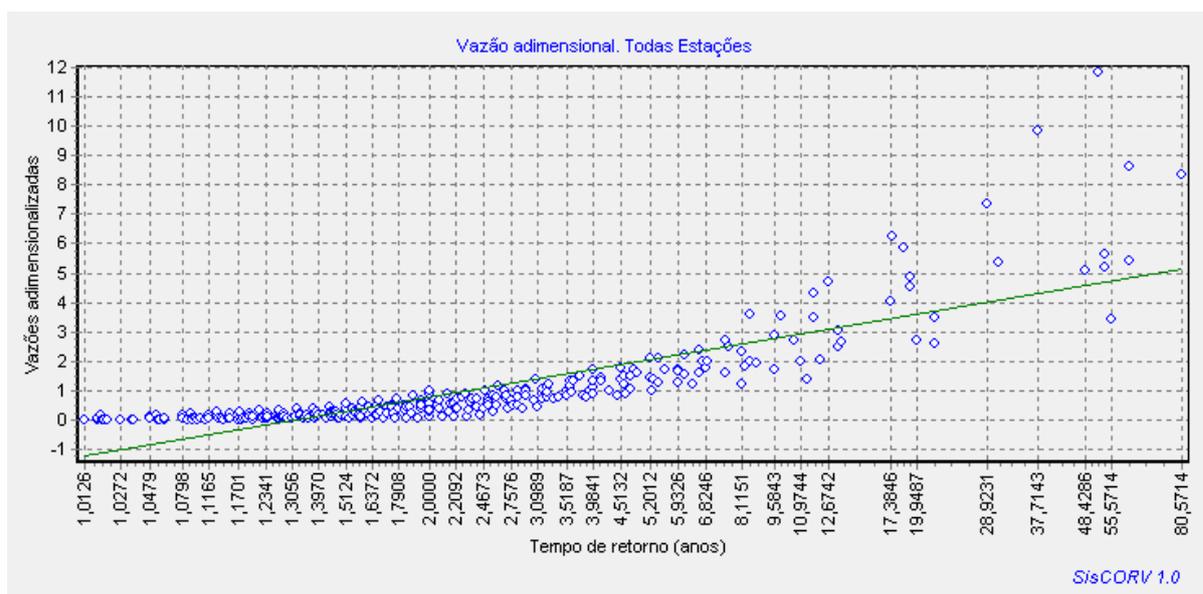
Fonte: A Autora (2021).

Tabela 3 - Coeficientes da região homogênea 1

Estação	Coeficiente Linear (a)	Coeficiente Angular (b)	Coeficiente de Determinação (R <sup>2</sup> )
37084000	0,41	1,06	0,87
37090000	0,98	0,03	1,00
37410000	0,58	0,74	0,91
37470000	0,51	0,87	0,90
37570000	0,54	0,83	0,93
Todas estações	0,53	0,84	0,90

Fonte: A Autora (2021).

Gráfico 2 - Região homogênea 2



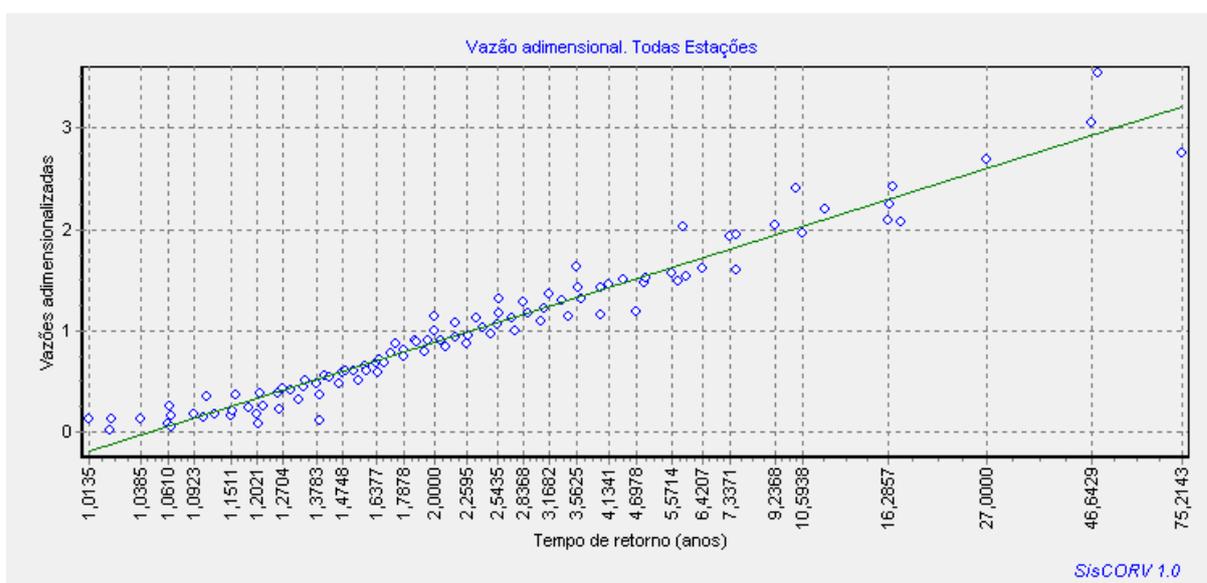
Fonte: A Autora (2021).

Tabela 4 - Coeficientes da região homogênea 2

Estação	Coeficiente Linear (a)	Coeficiente Angular (b)	Coeficiente de Determinação ( $R^2$ )
39540000	0,45	0,98	0,90
48820000	1,00	0,00	0,00
48860000	0,45	0,97	0,90
48880000	0,19	1,44	0,57
49160000	0,25	1,34	0,60
Todas estações	0,39	1,09	0,70

Fonte: A Autora (2021).

Gráfico 3 - Região homogênea 3



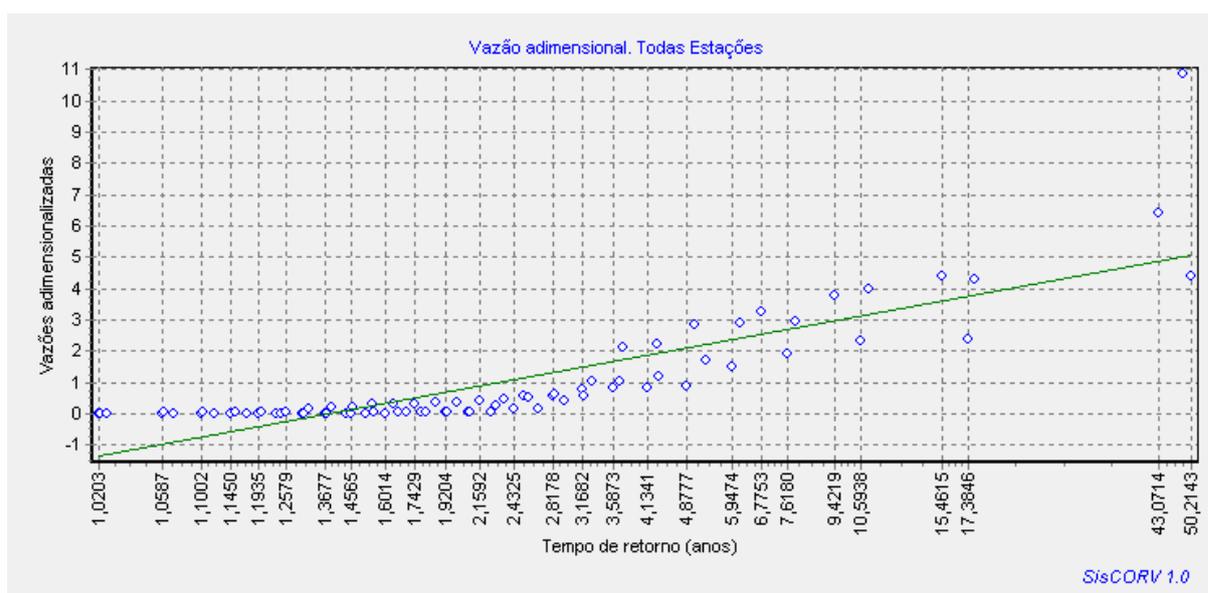
Fonte: A Autora (2021).

Tabela 5 - Coeficientes da região homogênea 3

Estação	Coeficiente Linear (a)	Coeficiente Angular (b)	Coeficiente de Determinação (R <sup>2</sup> )
36130000	0,65	0,62	0,96
36270000	0,68	0,58	0,95
36290000	0,68	0,56	0,98
37260000	0,64	0,66	0,89
Todas estações	0,67	0,59	0,95

Fonte: A Autora (2021).

Gráfico 4 - Região homogênea 4



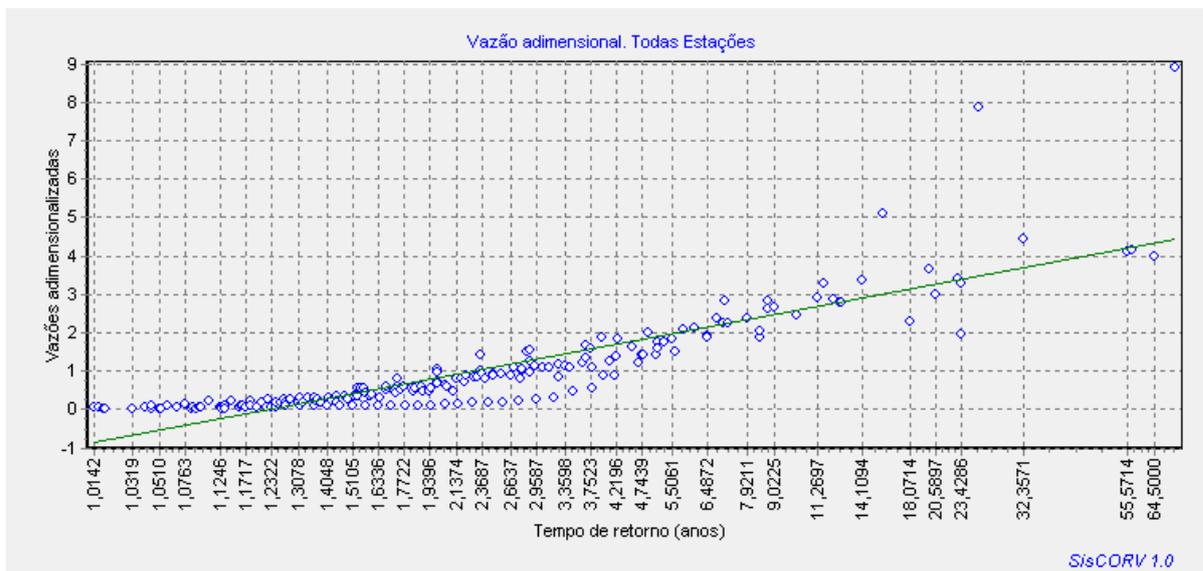
Fonte: A Autora (2021).

Tabela 6 - Coeficientes da região homogênea 4

Estação	Coeficiente Linear (a)	Coeficiente Angular (b)	Coeficiente de Determinação (R <sup>2</sup> )
37515000	0,27	1,29	0,58
37559000	0,29	1,26	0,81
37710150	0,38	1,10	0,81
Todas estações	0,32	1,21	0,70

Fonte: A Autora (2021).

Gráfico 5 - Região homogênea 5



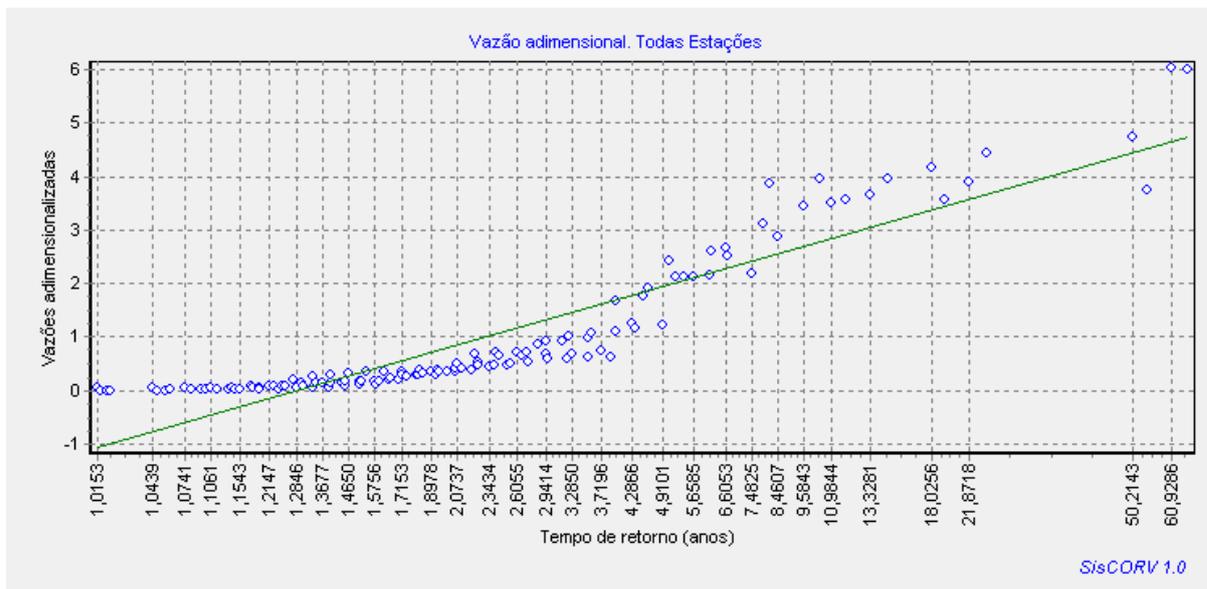
Fonte: A Autora (2021).

Tabela 7 - Coeficientes da região homogênea 5

Estação	Coeficiente Linear (a)	Coeficiente Angular (b)	Coeficiente de Determinação (R <sup>2</sup> )
35210000	0,64	0,67	0,93
35223000	0,58	0,77	0,97
35235000	0,22	1,38	0,71
35240000	0,53	0,84	0,95
35275000	0,52	0,85	0,94
Todas estações	0,48	0,92	0,76

Fonte: A Autora (2021).

Gráfico 6 - Região homogênea 6



Fonte: A Autora (2021).

Tabela 8 - Coeficientes da região homogênea 6

Estação	Coeficiente Linear (a)	Coeficiente Angular (b)	Coeficiente de Determinação (R <sup>2</sup> )
35830000	0,42	1,03	0,86
36470000	0,50	0,89	0,89
36520000	0,39	1,08	0,88
36580000	0,38	1,10	0,81
Todas estações	0,42	1,03	0,85

Fonte: A Autora (2021).

Em seguida, verificou-se a possibilidade de, através de regressão linear múltipla, encontrar correlação entre o parâmetro de perdas  $K_L$  e os parâmetros físicos Área, Declividade do rio principal, S e Comprimento da rede de rios. Essa tentativa se deve aos resultados de Cirilo et al (2020), visto que  $K_L$  foi o parâmetro para o qual não se conseguiu regionalização. A regressão não gerou bons resultados para a região homogênea 1, com poucas estações nas regiões 3, 4 e 5, o que impossibilita um resultado confiável para essas regiões. As regiões 2 e 5 levaram a bons resultados de correlação, porém, devido aos demais resultados, houve uma impossibilidade de

realizar a regionalização do parâmetro de perdas entre as estações de cada região. A Tabela 9 contém as estatísticas de regressão de todas as regiões homogêneas.

Tabela 9 - Estatísticas de regressão das regiões homogêneas

Região homogênea	R múltiplo	R-Quadrado	R-quadrado ajustado	Erro padrão	Observações
1	0,532	0,284	-0,074	0,138	13
2	0,901	0,811	0,685	0,097	11
3	1	1	0	0	4
4	1	1	65535	0	3
5	0,839	0,703	0,466	0,089	10
6	1	1	0	0	4

Fonte: A Autora (2021).

## 4.2 CALIBRAÇÃO DO MODELO CAWM

Foram feitas as calibrações e validações dos parâmetros do modelo CAWM IV para cada uma das 45 sub-bacias em estudo, com hidrogramas, coeficientes estatísticos e constatações sobre os fatores que influenciaram os resultados como por exemplo, a presença de barragens na área de estudo que influenciam as vazões dos corpos hídricos onde são instaladas, e conseqüentemente, afetam as calibrações. Essa análise é similar ao trabalho de Virães (2018), que utilizou o MODHAC (Modelo Hidrológico Auto Calibrável) para a mesma área de estudo. O uso do MODHAC foi feito em escala de tempo mensal, ao passo que as simulações com o CAWM tem passo de tempo diário.

### 4.2.1 Parâmetros do modelo

Como discutido no item anterior, não se conseguindo resultados conclusivos quanto ao relacionamento dos parâmetros calibráveis com as características físicas das bacias, adotou-se a metodologia utilizada por Cirilo et al (2020): fixou-se um valor para o parâmetro  $K_s$  e manteve-se  $K_L$  como único parâmetro calibrável.

A Tabela 10 contém os parâmetros de entrada e de saída do modelo. Os parâmetros fixos  $b$ ,  $Be$ ,  $K_s$ , expoente de perdas e expoente de recargas não estão presentes na tabela.  $K_s$  assume um valor constante de 0,0119: esse valor foi escolhido

com base na melhor representação de um conjunto de estações com dados mais consistentes na tentativa de reduzir a parametrização do modelo, assim como foi feito por Cirilo *et al.* (2020). Os parâmetros de expoente de perdas e de recargas foram considerados iguais a 1 para todas as estações. O parâmetro  $b$  foi assumido com o valor deduzido de  $5/3$  conforme as equações do modelo. O parâmetro  $B_e$ , que representa a largura equivalente da rede de drenagem das bacias, foi considerado constante como 2 metros para todas as bacias calibradas.

O parâmetro  $K_L$  portanto foi o único parâmetro calibrado, assumindo valores distintos para cada estação entre 0,3 e 0,9. Os parâmetros físicos são  $K$ , calculado pela fórmula presente no Capítulo 2, em função da área da sub-bacia, da declividade do rio principal da sub-bacia, do comprimento total da rede de drenagem, da capacidade de retenção de água no solo  $S$ . O parâmetro  $\alpha$  é variável, tendo sido adotados os valores de 1,4 (“default” do modelo, para o caso em que o balanço global da simulação mostra equilíbrio entre os volumes decorrentes de precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial) ou 10 (evapotranspiração subdimensionada). Em outro extremo, um valor  $\alpha = 0$  seria usado para situações com a evapotranspiração superdimensionada.

Tabela 10 - Parâmetros do modelo CAWM IV

Estação		Parâmetros						
Código (Continua)	Nome	K <sub>L</sub>	K	S	A (km <sup>2</sup> )	I (m/m)	Lt (m)	α
34730000	Croatá	0,6964	0,0289	150,13	1023	0,000913	1482160	1,4
34740000	Saudoso	0,7455	0,0262	142,49	2235	0,000830	2087443	1,4
34741000	Oiticica	0,8313	0,0137	90,20	10724	0,000815	5724250	10
35125000	Moraujo	0,6255	0,0284	127,44	1498	0,000709	1617582	10
35210000	Fazenda Cajazeiras	0,7221	0,0474	71,63	1560	0,001466	1503861	1,4
35223000	Flores	0,4129	0,0447	62,30	693	0,000896	970436	1,4
35235000	Várzea do Grosso	0,7970	0,0250	64,76	3652	0,000992	2753843	10
35240000	Trapiá	0,5599	0,0243	94,26	1529	0,000344	1440723	1,4
35258000	Fazenda Paraná	0,6891	0,0215	73,40	2369	0,000727	2311279	1,4
35275000	Sobral	0,7227	0,0118	74,06	11273	0,000754	6247582	1,4
35830000	Caio Prado	0,8496	0,0380	75,74	1613	0,000979	1541625	1,4
36045000	Malhada	0,8394	0,0105	131,93	3454	0,000398	3458367	1,4
36070000	Sítio Patos	0,8020	0,0115	98,23	13671	0,000945	7339625	1,4
36125000	Sítio Poço Dantas	0,7552	0,0138	141,59	3631	0,000914	3834986	1,4
36130000	Cariús	0,8825	0,0250	148,07	6182	0,000943	3351690	1,4
36160000	Iguatu	0,4991	0,0154	112,16	20872	0,000873	7113082	1,4
36270000	Lavras da Mangabeira	0,7278	0,0245	119,20	8988	0,000814	3767707	1,4
36290000	Icó	0,6987	0,0197	113,80	12423	0,000993	5193687	1,4
36320000	Jaguaribe	0,8427	0,0114	110,08	39630	0,000769	11912866	1,4
36390000	Peixe Gordo	0,6815	0,0105	102,75	48359	0,000729	11912866	1,4
36470000	Senador Pompeu	0,7495	0,0534	102,72	4524	0,000950	1879700	1,4
36520000	Quixeramobim	0,3780	0,0110	66,06	7037	0,001618	6788113	1,4
36580000	Morada Nova II	0,7162	0,0215	76,13	17236	0,000814	5293457	1,4

Estação		Parâmetros						
Código (Continua)	Nome	K <sub>L</sub>	K	S	A (km <sup>2</sup> )	I (m/m)	Lt (m)	α
37030000	Pau dos ferros	0,3495	0,0242	105,32	2195	0,000913	2236386	1,4
37080000	Pedra de abelhas	0,6919	0,0268	106,45	6584	0,000670	2974168	1,4
37084000	Governador Dix Sept Rosado	0,7540	0,0203	108,74	7635	0,000546	3506033	1,4
37090000	Mossoró	0,6629	0,0200	105,75	8534	0,000649	3897440	1,4
37260000	Antenor Navarro	0,8197	0,0371	74,19	1447	0,000839	1429925	1,4
37340000	Piencó	0,6844	0,0117	74,62	4554	0,000793	4431784	1,4
37410000	Sítio Vassouras	0,7406	0,0331	75,50	15211	0,000858	3949517	1,4
37470000	Jardim de Piranhas	0,6195	0,0271	75,67	21644	0,000768	4956561	1,4
37515000	Sítio Volta	0,8304	0,0310	67,56	1861	0,000948	1825038	1,4
37559000	Caicó	0,8860	0,0205	65,31	6313	0,000800	3623023	1,4
37570000	São Fernando	0,6584	0,0263	65,36	9709	0,000957	3908365	1,4
37710150	Sítio Acauã II	0,4851	0,0355	70,48	38064	0,000755	5253192	1,4
38830000	Caraúbas	0,6508	0,0283	64,82	5035	0,000902	2830142	10
38850000	Poço de Pedras	0,4019	0,0218	63,98	3178	0,001464	3184276	1,4
38860000	Bodocongó	0,3987	0,0164	63,60	13717	0,000904	5855998	10
39130000	Toritama	0,6202	0,0309	64,79	2451	0,001875	2505967	1,4
39340000	Caruaru	0,7915	0,0245	63,01	1975	0,000692	1957527	1,4
39540000	Capivara	0,7454	0,0351	75,39	2604	0,002455	2576305	1,4
48820000	Afogados da Ingazeira	0,8791	0,0663	64,69	3540	0,000944	1493934	1,4
48860000	Floresta	0,7979	0,0199	69,85	12281	0,000814	4846573	1,4
48880000	Ilha Grande	0,7673	0,0276	67,29	2262	0,001266	2308286	1,4
49160000	Inajá	0,9262	0,0198	92,92	8250	0,000927	4309957	1,4

Fonte: A Autora (2021).

Tabela 11 - Percentuais da quantidade de eventos com índices estatísticos bons ou aceitáveis

Código (Continua)	Estação Nome	Percentual de índices estatísticos bons ou aceitáveis					Período de calibração		Número de anos analisados
		NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	RSR	Início	Fim	
34730000	Croatá	50%	35%	0%	55%	20%	23/09/1995	21/09/1996	19
34740000	Saudoso	82%	82%	0%	71%	59%	29/12/2008	28/12/2009	16
34741000	Oiticica	67%	67%	0%	44%	22%	10/01/2005	09/01/2006	8
35125000	Moraujo	90%	83%	3%	40%	77%	10/01/1984	08/01/1985	29
35210000	Fazenda Cajazeiras	64%	68%	0%	32%	30%	08/01/1969	07/01/1970	43
35223000	Flores	30%	30%	0%	100%	0%	09/01/2001	08/01/2002	9
35235000	Várzea do Grosso	40%	20%	0%	20%	7%	27/12/1995	25/12/1996	14
35240000	Trapiá	56%	69%	0%	38%	22%	07/01/2005	06/01/2006	31
35258000	Fazenda Paraná	50%	36%	0%	57%	14%	06/01/2004	04/01/2005	13
35275000	Sobral	87%	84%	0%	26%	58%	29/12/1986	28/12/1987	29
35830000	Caio Prado	44%	75%	0%	75%	13%	02/01/2003	01/01/2004	15
36045000	Malhada	55%	30%	0%	65%	35%	04/01/1986	03/01/1987	19
36070000	Sítio Patos	60%	33%	0%	20%	40%	04/01/2003	03/01/2004	14
36125000	Sítio Poço Dantas	88%	84%	8%	80%	60%	06/01/1989	05/01/1990	23
36130000	Cariús	75%	75%	12%	58%	42%	04/01/1990	03/01/1991	24
36160000	Iguatu	59%	69%	55%	83%	34%	01/01/2004	30/12/2004	29
36270000	Lavras da Mangabeira	88%	81%	4%	85%	65%	30/12/1995	28/12/1996	26
36290000	Icó	70%	72%	16%	49%	63%	09/01/1977	08/01/1978	43
36320000	Jaguaribe	85%	73%	19%	46%	38%	30/12/2005	29/12/2006	26
36390000	Peixe Gordo	88%	88%	35%	46%	54%	04/01/1984	02/01/1985	26
36470000	Senador Pompeu	84%	88%	4%	56%	48%	01/01/1996	30/12/1996	25
36520000	Quixeramobim	72%	64%	12%	52%	40%	29/12/1984	28/12/1985	25
36580000	Morada Nova II	71%	57%	0%	50%	21%	06/01/1976	04/01/1977	14

Estação		Percentual de índices estatísticos bons ou aceitáveis					Período de calibração		Número de anos analisados
Código (Continua)	Nome	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	RSR	Início	Fim	
37030000	Pau dos ferros	64%	57%	7%	43%	50%	09/01/1980	07/01/1981	14
37080000	Pedra de abelhas	74%	74%	26%	48%	22%	01/01/1973	31/12/1973	23
37084000	Governador Dix Sept Rosado	50%	57%	21%	36%	21%	10/01/1988	08/01/1989	14
37090000	Mossoró	38%	38%	0%	100%	38%	09/01/1995	08/01/1996	8
37260000	Antenor Navarro	33%	58%	0%	25%	8%	04/01/1987	03/01/1988	12
37340000	Piancó	55%	45%	11%	30%	23%	10/01/1971	09/01/1972	44
37410000	Sítio Vassouras	85%	44%	0%	19%	37%	23/12/2009	22/12/2010	27
37470000	Jardim de Piranhas	80%	67%	0%	47%	53%	28/12/1990	27/12/1991	30
37515000	Sítio Volta	36%	21%	0%	64%	7%	14/01/1982	13/01/1983	14
37559000	Caicó	45%	55%	0%	55%	9%	05/01/2008	03/01/2009	11
37570000	São Fernando	67%	71%	29%	38%	48%	05/01/1996	03/01/1997	21
37710150	Sítio Acauã II	75%	50%	0%	75%	50%	04/01/2009	03/01/2010	8
38830000	Caraúbas	32%	53%	0%	37%	16%	06/01/1987	05/01/1988	19
38850000	Poço de Pedras	45%	41%	0%	64%	27%	09/01/1973	08/01/1974	22
38860000	Bodocongó	92%	92%	25%	75%	83%	09/01/1974	08/01/1975	12
39130000	Toritama	53%	59%	0%	82%	35%	07/01/1988	05/01/1989	17
39340000	Caruaru	58%	74%	11%	100%	32%	10/01/1976	08/01/1977	19
39540000	Capivara	68%	68%	20%	48%	24%	06/01/1994	05/01/1995	25
48820000	Afogados da Ingazeira	80%	53%	0%	13%	20%	10/01/1966	09/01/1967	15
48860000	Floresta	67%	57%	17%	43%	33%	07/01/1987	06/01/1988	30
48880000	Ilha Grande	56%	38%	0%	75%	13%	07/01/1976	05/01/1977	16
49160000	Inajá	18%	9%	0%	82%	9%	12/01/1992	10/01/1993	11

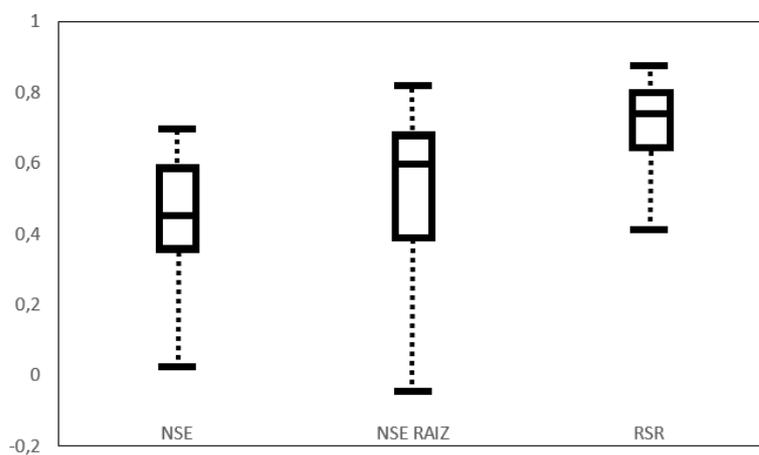
Fonte:A Autora (2021).

Os gráficos das curvas de permanência em escala logarítmica de cada uma das 45 sub-bacias se encontram no apêndice B e podem ser utilizados para melhor compreender o comportamento hídrico das vazões observadas e calculadas. A Tabela 11 apresenta os percentuais de indicadores estatísticos aceitáveis ou bons de todo o período, incluindo o de calibração e os de validação. Além disso, contém também o número de anos utilizados na calibração e validação que variaram entre 8 e 44 anos, sendo um ano utilizado para calibração e os demais para validação.

Os coeficientes estatísticos podem ser melhor visualizados através dos Gráficos 7 e 8 que apresentam gráficos do tipo Boxplot para cada indicador estatístico obtido para as simulações de longo período de todas as estações, ou seja, utilizando toda a série histórica. Esses dados podem ser interpretados de acordo com a Tabela 12 que contém a classificação da performance dos indicadores estatísticos.

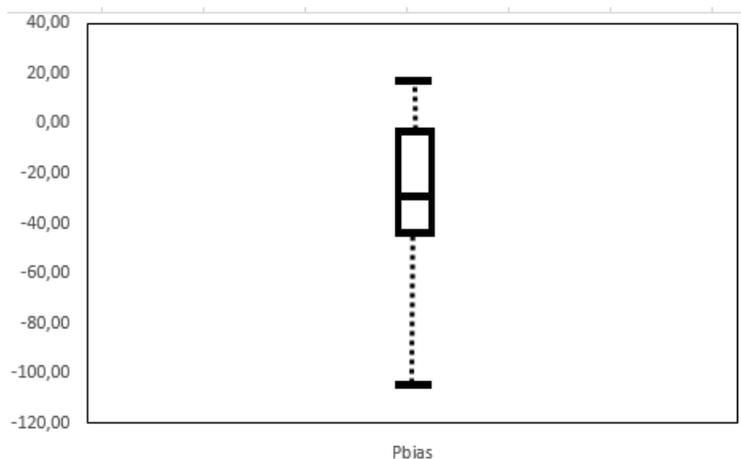
De acordo com a performance dos indicadores estatísticos, o número de Nash possui valor maior que 0,36 em 76% dos eventos e os maiores que 0,5 totalizam 33%. O valor de Nash Raiz foi superior a 0,5 em 68% dos eventos e de Nash Log esse valor só foi atingido para 2% dos eventos. Isso reflete baixa performance para as vazões mínimas. O coeficiente RSR apresentou-se em 68% eventos com valor entre 0 e 0,6. Já o coeficiente Pbias possuiu 42% dos eventos bons ou muito bons de acordo com a classificação de Moriasi (2007). Quando são analisados os três coeficientes juntos, considerando os eventos de análise contínuos, 44% dos eventos atenderam aos três critérios simultaneamente, apesar do número de NSE e RSR apresentarem bons resultados para a maioria.

Gráfico 7 - Boxplot com coeficientes estatísticos resultantes da calibração do modelo CAWM



Fonte: A Autora (2021).

Gráfico 8 - Boxplot com coeficiente Pbias resultante da calibração do modelo CAWM



Fonte: A Autora (2021).

Tabela 12 - Classificação de performance de indicadores estatísticos para simulações mensais

Classificação de performance	RSR	NSE	Pbias
Muito bom	0.00-0.50	0.75-1.00	<±10
Bom	0.50-0.60	0.65-0.75	±10 - ±15
Satisfatório	0.60-0.65	0.50-0.65	±15 - ±25
Insatisfatório	>0.70	≤0.50	≥ ±25

Fonte: Moriasi (2007).

Como são muitos eventos, deixa-se de apresentar os hidrogramas. No Apêndice B são apresentadas as curvas de permanência de vazões calculadas e registradas. Utilizou-se escala logarítmica para destacar as diferenças que não são bem percebidas em escala normal. Dá para perceber que na maioria das estações o comportamento das vazões calculadas nos períodos de baixa vazão não representou bem o comportamento das vazões medidas, o que foi registrado na análise estatística pelos baixos indicadores de sucesso de NASH LOG. Também o mediano valor de percentual de sucesso alcançado para o parâmetro PBIAS é refletido no afastamento entre as séries em diversos casos, mesmo com a preponderância dos valores de razoável a bom obtidos de NASH e NASH RAIZ. Algumas razões para isso podem ser elencadas: a) presença de barragens nas bacias e mudanças na quantidade de postos pluviométricos afetaram sensivelmente a qualidade das simulações mais recentes, fato constatado por Virões et al (2019); b) o período de calibração, considerado igual a um ano, precisa ser ampliado.

Uma análise sobre a simulação nas bacias é apresentada a seguir.

#### **4.2.2 Análise por bacia hidrográfica**

Em sequência são discutidos os resultados de simulação para as bacias hidrográficas estudadas em análise dos eventos ocorridos, diferente dos resultados já apresentados que considerou todo o período histórico. Nos casos a seguir, os indicadores estatísticos foram calculados por evento, acompanhando o ano hidrológico.

##### **4.2.2.1 Bacia do Rio Acaraú**

A bacia do rio Acaraú está localizada no estado do Ceará e abrange as estações de Fazenda Cajazeiras, Fazenda Paraná, Flores, Sobral, Trapiá e Várzea do Grosso.

Foram 44 eventos entre os anos 1962 e 2011, analisados para a estação de Fazenda Cajazeiras, com 63,6% dos coeficientes de Nash Sutcliffe aceitáveis, dentre eles apenas um muito bom com valor de 0,83. Para estudo dessa bacia, Virões (2018) estabeleceu correlação com os parâmetros calibrados para a série do posto de Iguatu,

que em seu estudo apresentou ajuste muito bom até 1999. Observando a curva de permanência, percebe-se subdimensionamento das vazões calculadas.

Para a estação de Fazenda Paraná foram 14 anos simulados entre 1984 e 2012. Essa estação foi afetada pela presença da Barragem do Serrote que altera o comportamento das vazões na bacia: vazões mais elevadas menores que as simuladas e comportamento inverso para as vazões mais reduzidas, o que denota efeito de regularização de vazões. Apesar de apresentar 50% dos coeficientes de Nash aceitáveis, as simulações não se comportaram da maneira adequada.

A estação de Flores não gerou bons resultados de simulação. Foram apenas 10 anos simulados entre 1999 e 2009, com maioria de coeficientes ruins ou aceitáveis. Essa análise coincide com os resultados obtidos por Virões (2018).

Para os dados da estação Sobral, os picos de vazões calculadas não acompanharam as vazões observadas, apesar disso, a maioria dos coeficientes foram aceitáveis, sendo cinco delas ótimas e com valores de Nash superiores a 0,76. Foram 31 anos analisados entre os anos de 1973 e 2009. 90% dos coeficientes possuem o coeficiente estatístico de correlação superiores a 0,5. Observa-se nas vazões medidas que o rio não se comporta como temporário: não se identificou se isso ocorre por regularização por barragem ou se trata mesmo de corpo d'água permanente e assim a versão mais adequada do modelo seria a CAWM V.

A simulação da estação de Trapiá contém 32 anos analisados entre os anos de 1973 e 2010. 56,3% dos coeficientes de Nash são aceitáveis, com apenas um coeficiente muito bom de valor igual a 0,79. Observa-se superdimensionamento das vazões calculadas. Virões (2018) obteve coeficientes aceitáveis para a estação durante todo o período utilizando como referência os parâmetros da estação de Iguatu,

A estação de Várzea do Grosso foi simulada para 15 anos entre 1973 e 1996. Contém vários dados inconsistentes entre 1976 e 1984 que foram desconsiderados, assim como os anos entre 1989 e 1994. A calibração gerou coeficientes insatisfatórios, com alguns coeficientes de Nash aceitáveis, mas para o período como um todo abaixo de 0,36, embora as curvas de permanência mostrem ajuste adequado para as vazões mais altas, que ocorrem durante cerca de 10% do tempo. Os resultados podem ser explicados pela presença do Açude Araras que gerou interferência nos dados a partir de 1982, como atestado por Virões (2018).

#### 4.2.2.2 Bacia Metropolitana

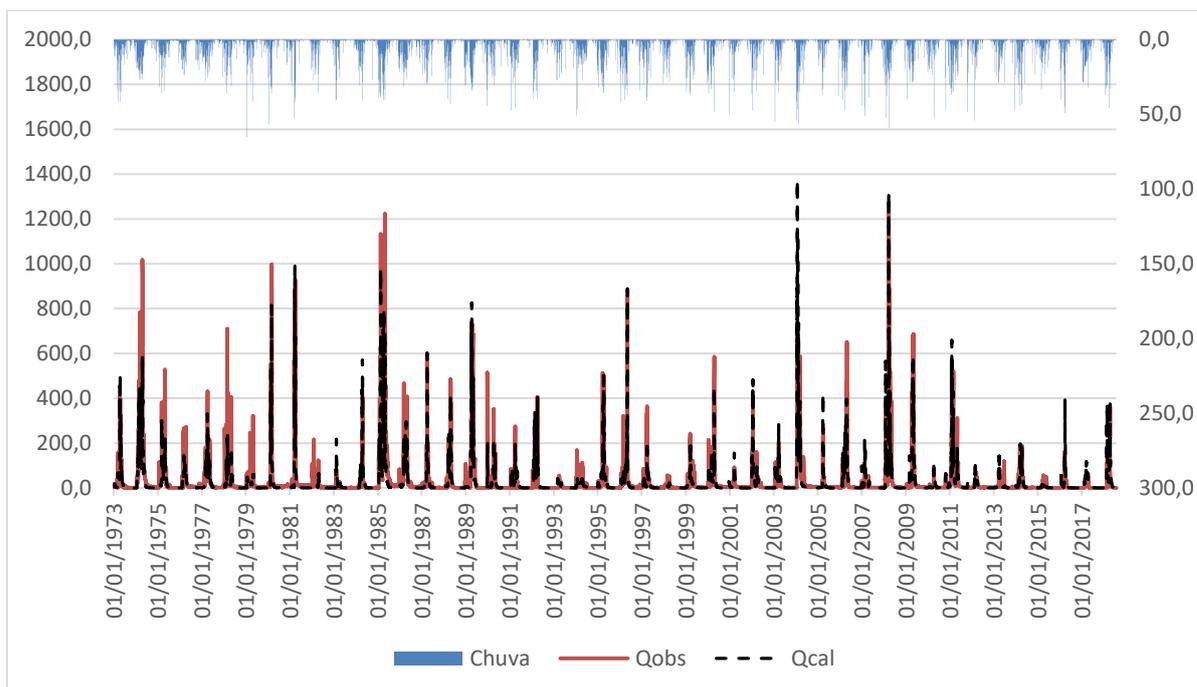
Essa bacia está localizada no estado do Ceará e abrange apenas a estação de Caio Prado. Essa estação foi simulada para 15 anos entre 1984 e 2009. Possui falhas de dados entre os anos de 1990 e 1994 e também entre os anos de 1997 a 2002. A curva de permanência apresenta bom ajuste para as vazões mais altas, com alguma dificuldade de acompanhar a recessão.

#### 4.2.2.3 Bacia do Rio Salgado

Essa bacia contém as estações de Icó e Lavras da Mangabeira, ambas localizadas no estado do Ceará. Icó foi simulada para 43 anos entre 1973 e 2014, com bom comportamento (Figura 3) do modelo e consequente bom ajuste de vazões observadas e calculadas. Os coeficientes de Nash foram muito bons para 10 dos 43 anos e 69,8% do total de anos simulados resultaram em coeficientes aceitáveis. Os dados desta estação levaram aos melhores ajustes entre todos os analisados, o que foi observado também por Virões (2018). Apesar dos bons resultados, há a influência do Açude Lima Campos, presente no riacho São João.

As vazões da estação de Lavras da Mangabeiras se adequaram bem. Foram simulados 26 anos entre 1973 e 1977, com 88,5% dos coeficientes de Nash aceitáveis ou bons enquanto os de Nash raiz foram 80,8%. Os indicadores Pbias e RSR também alcançaram bons valores. A partir de 1998 há ausência de dados de vazões observadas. O comportamento dessa estação foi similar ao obtido por Virões (2018), também com coeficientes muito bons e aceitáveis e dados até 1996.

Figura 3 - Hidrograma da estação Icó



Fonte: A Autora (2021).

#### 4.2.2.4 Bacia dos Sertões de Crateús

Essa bacia está localizada no estado do Ceará e abrange a estação fluviométrica de Oiticica. Essa estação foi simulada para 9 anos entre 2004 (ano em que foi instalada) e 2012. Como pode ser visualizado na curva de permanência da estação presente no Apêndice B, as vazões calculadas não acompanharam suficientemente as vazões observadas para altos valores. Os coeficientes com bom comportamento foram o Nash, Nash Raiz e  $R^2$ . Os resultados foram similares aos obtidos para o modelo MODHAC.

#### 4.2.2.5 Bacia de Serra da Ibiapaba

Essa bacia hidrográfica abrange as estações de Saudoso e Croatá. A simulação da estação de Saudoso considerou 17 anos entre os anos de 1996 e 2012. A maioria dos coeficientes estatísticos se comportou bem, com exceção de Nash Log. A curva de permanência evidencia que as vazões mais elevadas possuem um bom ajuste. 82,4% dos coeficientes de Nash Sutcliffe são bons ou aceitáveis, o que

demonstra um ajuste superior ao obtido por Virões (2018), que não encontrou resultados aceitáveis em nenhum dos ajustes.

Para estação de Croatá foram considerados 20 anos entre 1962 e 2009. Os períodos de 1971 a 1977, de 1992 a 1995 e de 1997 a 2006 possuem falhas nas vazões, tornando necessário desconsiderar os mesmos da simulação. Apenas o coeficiente estatístico Pbias apresentou maioria aceitável para todo o período de simulação (embora com subestimativa), fazendo com que o ajuste seja inadequado, assim como constatado por Virões (2018).

#### 4.2.2.6 Bacia do Coreaú

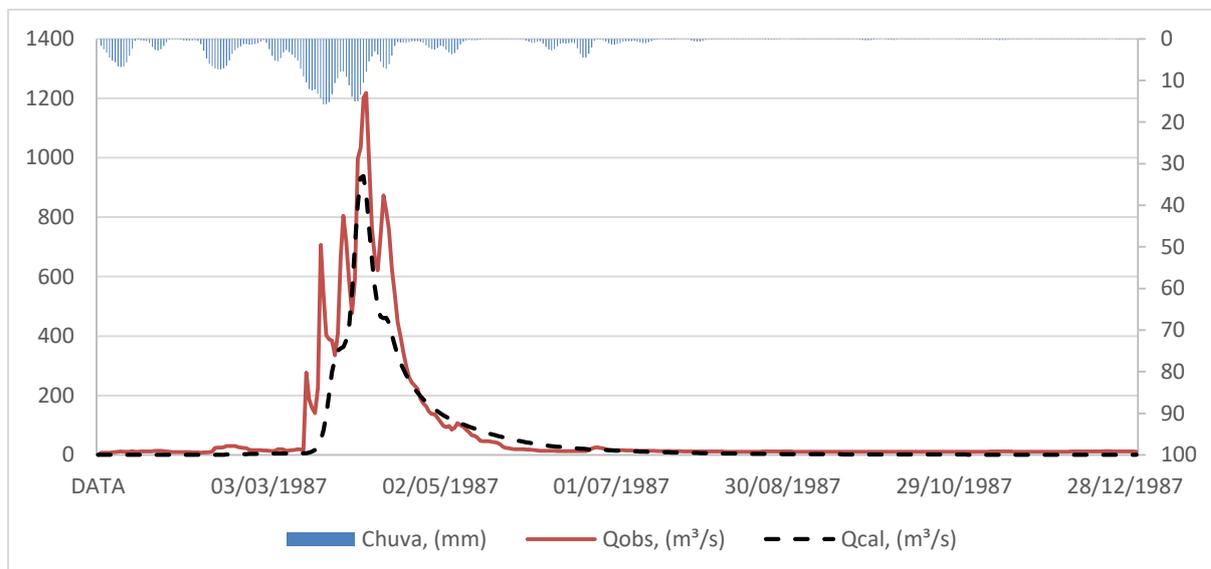
Essa bacia está localizada no estado do Ceará e é composta pela estação de Moraújo. Essa estação foi simulada para 30 anos do período de 1979 e 2012. Possui falha de dados entre 2012 e 2016, e gerou resultados aceitáveis para a maioria dos índices estatísticos de Nash, Nash Raiz, RSR e  $R^2$ . Na maioria dos eventos, as vazões observadas foram superiores às calculadas, como se pode constatar na curva de permanência. Os resultados se assemelham aos obtidos para o modelo MODHAC.

#### 4.2.2.7 Bacia do Alto Jaguaribe, Médio Jaguaribe e do rio Salgado

As estações de Peixe Gordo e Jaguaribe abrangem todas as três bacias agrupadas. Já as estações de Cariús, Iguatu, Sítio Patos, Sítio Poço Dantas e Malhada pertencem apenas à bacia do Alto Jaguaribe. Para estação de Peixe Gordo foram analisados 26 eventos entre os anos de 1973 e 2000. Os únicos coeficientes estatísticos que não tiveram a maioria aceitável foram Nash Log e Pbias. O ajuste foi bom, apesar das vazões calculadas não alcançarem os picos das vazões observadas para a maioria dos eventos. A Figura 4 contém o hidrograma para a estação de Peixe Gordo no período de 03/01/1987 a 02/01/1988, que foi o período de calibração no modelo CAWM IV. O coeficiente estatístico de Nash Sutcliffe desse período é 0.83, sendo considerado um coeficiente muito bom e apresentando um bom ajuste entre as vazões calculadas e calibradas. A comparação entre as curvas de permanência sugere efeito de regularização por reservatório. Para essa estação Virões (2018)

encontrou resultados aceitáveis até o ano de 1980 para a regionalização com os dados da estação de Iguatu.

Figura 4 - Hidrograma da estação Peixe Gordo para evento de 03/01/1987 a 02/01/1988



Fonte: A Autora (2021).

A estação de Jaguaribe está situada entre os reservatórios de Orós e Castanhão, o que faz com que sua simulação seja afetada pela influência de Orós. Na curva de permanência pode-se perceber o efeito da regularização comparando-se as vazões medidas e calculadas. Os coeficientes estatísticos em que a maioria dos resultados foram aceitáveis foram Nash, Nash raiz e  $R^2$ . O período de calibração/validação foi de 26 anos, entre 1977 e 2018. As vazões calculadas não acompanharam os picos de vazões observadas para a maioria dos eventos. Apesar disso a calibração demonstrou um bom comportamento. Para Virões (2018) os coeficientes foram aceitáveis até ano de 2000 e insuficientes até 2007.

A estação de Cariús teve 24 eventos analisados entre os anos de 1984 e 2012. Os coeficientes de Nash, Nash Raiz, Pbias e  $R^2$  apresentaram maioria dos resultados aceitáveis ou muito bons, embora a curva de permanência indique superestimativa das vazões menores. Apesar de dados pluviométricos a partir de 1963, os dados fluviométricos só foram registrados a partir de 1984. Para a modelagem com o MODHAC pela regionalização dos parâmetros de Icó, todos os coeficientes foram aceitáveis demonstrando um resultado similar ao obtido nesse trabalho.

Para a estação de Iguatu foram analisados 29 eventos entre 1973 e 2018. O único coeficiente estatístico que não se adequou bem foi RSR e os picos de vazões calculadas e observadas se ajustaram bem, embora com superestimativa das vazões mais baixas. O mesmo resultado foi observado com o MODHAC, onde foram obtidos bons ajustes durante todo o período. Resultados similares foram obtidos pela estação Sítio Poço Dantas, com menor afastamento das curvas de permanência, para os quais foram utilizados dados de 25 eventos entre os anos de 1973 e 2012.

A análise da estação de Sítio Patos gerou bons resultados de coeficientes de Nash e  $R^2$ . Também se constatou superestimativa das vazões menores. Foram 15 anos analisados entre 2000 e 2018. Assim como Sítio Patos, a estação de Malhada, simulada entre 1979 e 2009, também teve um ajuste aceitável, apesar dos coeficientes estatísticos com melhores ajustes serem apenas Nash e Pbias (a curva de permanência indica superestimativa, o que pode ser decorrente de alguns eventos com desvios grandes).

#### 4.2.2.8 Bacia de Banabuiú

A bacia hidrográfica de Banabuiú está localizada no Ceará e inclui as estações de Morada Nova II, Quixeramobim e Senador Pompeu. Em todas as estações os coeficientes estatísticos se comportaram de maneira similar, com apenas o RSR e Nash Log não atingindo a maioria de valores aceitáveis. Quixeramobim e Senador Pompeu tiveram ambas 25 eventos simulados entre os anos de 1973 a 2000, enquanto a estação de Morada Nova II teve 14 eventos simulados entre os anos de 1973 e 1990.

#### 4.2.2.9 Bacia do rio Piranhas

Essa bacia está localizada entre os estados da Paraíba e do Rio Grande do norte e abrange as estações de Antenor Navarro, Jardim Piranhas, Piancó, Sítio Vassouras, Sítio Acauã II, São Fernando, Caicó e Sítio Volta.

As estações de Sítio Vassouras e São Fernando se adequaram bem nas simulações, ambas com mais de 21 eventos avaliados entre 1973 e 2011. Além disso, ambas vazões calculadas acompanharam bem os picos de vazões observadas. A

estação de Jardim Piranhas foi simulada para 30 anos para o mesmo período das anteriores, resultando em bons coeficientes estatísticos para a maioria dos eventos. 80% dos coeficientes de Nash foram considerados aceitáveis ou muito bons.

Já a estação de Antenor Navarro, que teve 12 eventos simulados entre 1965 e 1973 e a de Sítio Volta, com 14 eventos entre 1979 e 1997, não geraram bons resultados. A última sofre a influência da barragem Boqueirão de Parelhas. Assim como a estação Sítio Acauã II, que sofre a influência da Barragem Armando Monteiro Gonçalves que foi concluída em 1980 (o efeito de regularização é nítido na curva de permanência), sendo seus coeficientes estatísticos considerados insuficientes na simulação. A estação de Caicó, com falhas a partir de 1997 levou a ajuste mediano.

Todas as estações tiveram resultados similares aos obtidos por Virões (2018), com a maioria das estações da bacia sofrendo influência de barragens, o que influencia diretamente as vazões observadas, comprometendo as simulações.

#### 4.2.2.10 Bacia do rio Paraíba

Essa bacia pertence ao estado da Paraíba e abrange três estações, que são Bodocongó, Caraúbas e Poço de Pedras.

A estação de Bodocongó levou a um ajuste de simulação insuficiente segundo o trabalho de Virões (2018), o que não foi confirmado pelo presente trabalho por apresentar na maioria dos eventos coeficientes estatísticos aceitáveis ou ótimos, com exceção de Nash Log. Essa estação foi simulada para 12 anos entre 1969 e 1987, com bons ajustes nesse intervalo de tempo. Um motivo para essa diferença nos resultados é a presença do Açude Epitácio Pessoa, que altera os dados obtidos a partir da data considerada.

A estação de Caraúbas também confirmou os resultados obtidos pelo MODHAC, não levando a resultados satisfatórios na simulação, o que pode ter sido causado pela presença do Açude Cordeiro que se localiza a montante da estação.

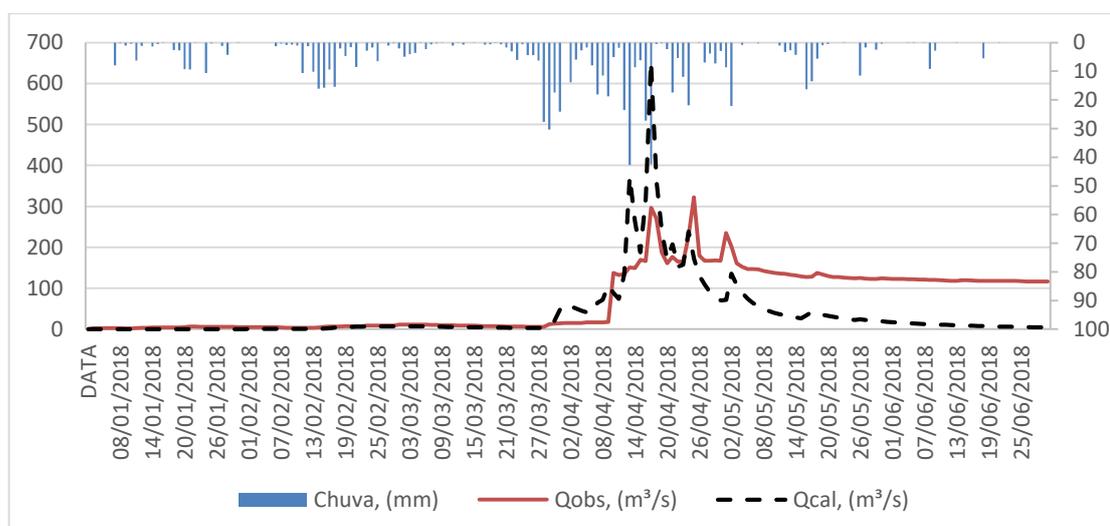
Já a simulação para os dados da estação Poço de Pedras resultou em coeficientes aceitáveis para Nash, Nash Raiz e Pbias. Os coeficientes obtidos por Virões (2018) foram melhores entre os anos de 1970 e 1977 e insuficientes para os demais anos.

#### 4.2.2.11 Bacia do rio Apodi

A bacia do rio Apodi está localizada no estado do Rio Grande do Norte e abrange as estações de Governador DixSept Rosado, Mossoró, Pau dos Ferros e Pedras de Abelhas.

Os resultados das simulações das estações de Governador DixSept Rosado e Mossoró foram insatisfatórios para o modelo MODHAC. Para a primeira estação com o modelo CAWM foram simulados 15 anos entre 1986 e 1996, com os coeficientes de Nash, Nash raiz e  $R^2$  aceitáveis. Além disso, as vazões se comportaram de maneira adequada. Já a estação de Mossoró possui alguns patamares de vazões que indicam um efeito de represamento ou erro de observação, como é demonstrado na Figura 5, além disso aconteceram longos períodos sem dados, de modo que todos os coeficientes estatísticos foram insatisfatórios.

Figura 5 - Hidrograma da estação de Mossoró



Fonte: A Autora (2021).

Já as estações de Pau dos Ferros e Pedras de Abelhas apresentaram performance aceitável a boa para os coeficientes NASH e NASH Raiz. Para ambas as estações o período de simulação ficou entre os anos de 1973 e 1996. As vazões observadas na estação de Pau dos Ferros foram afetadas pela presença da barragem com o mesmo nome a partir do ano de 1985. Os coeficientes estatísticos dessas estações não foram bons para a maioria dos eventos para Nash log, Pbias e RSR. O comportamento de ambas foi similar ao encontrado por Virões (2018).

#### 4.2.2.12 Bacia do rio Pajeú

A bacia do rio Pajeú está localizada no estado de Pernambuco e abrange as estações de Floresta, Ilha Grande e Afogados da Ingazeira.

Para todas as estações foram obtidos resultados de simulação aceitáveis. As simulações ocorreram entre 15 e 30 eventos ocorridos entre os anos de 1964 a 2008. A análise das estações de Floresta e Afogados da Ingazeira resultaram como maioria coeficientes aceitáveis ou muito bons Nash e Nash Raiz, enquanto para a estação de Ilha Grande os melhores resultados ocorreram para Nash e Pbias.

A estação de Afogados da Ingazeira sofre a influência da barragem de Brotas, concluída em 1976. Floresta sofre a interferência do Açude Serrinha, concluído em 1996. A estação de Ilha Grande sofre a influência do Açude Barra do Juá, concluído em 1982.

Assim como o obtido por Virões (2018), apesar da influência de reservatórios todas as estações tiveram resultados de simulação satisfatórios.

#### 4.2.2.13 Bacia do rio Una

A única estação presente na bacia do rio uma, na sua porção semiárida, é a de Capivara. Essa bacia se localiza no estado de Pernambuco e foi simulada para 25 eventos entre os anos de 1977 e 2012, com dados comprometidos por inconsistências a partir de 2013. Os resultados obtidos foram que em 68% dos eventos analisados os coeficientes de Nash e Nash Raiz dos eventos foram aceitáveis ou muito bons. Virões (2018) obteve resultados aceitáveis até 1993, similares aos encontrados por Cirilo et al. (2020) e confirmados no presente trabalho.

#### 4.2.2.14 Bacia do rio Moxotó

A bacia do rio Moxotó, no território de Pernambuco, é monitorada apenas na estação de Inajá. Essa estação sofre a influência da barragem Engenheiro Francisco Sabóia, que com 503 milhões de m<sup>3</sup> de capacidade é a maior de Pernambuco. Como

foi inaugurada em 1959 afeta toda a série de vazões. Por isso a simulação não foi satisfatória, tanto para o presente trabalho quanto para o realizado por Virões (2018).

#### 4.2.2.15 Bacia do rio Capibaribe

A bacia do rio Capibaribe está localizada no estado de Pernambuco. Para efeito de regionalização dos parâmetros de modelos hidrológicos foi utilizada no trabalho de Virões (2018) e também utilizada no de Cirilo *et al* (2020). Foram analisados 17 eventos entre os anos de 1973 e 1994. Essa estação se localiza a montante da Barragem de Jucazinho e a jusante do Açude Poço Fundo. Apesar da interferência desta última barragem (de porte relativamente pequeno) os coeficientes estatísticos indicaram um ajuste aceitável da estação. Os coeficientes de Nash, Nash Raiz e Pbias foram adequados para a maior parte do período de simulação, ao contrário do coeficiente Nash Log e RSR. Esse resultado foi similar aos obtidos em ambos os trabalhos anteriores citados.

#### 4.2.2.16 Bacia do rio Ipojuca

A bacia do rio Ipojuca está situada no estado de Pernambuco e contém a estação de Caruaru, além de outras com menor quantidade de dados. Para essa estação foram simulados 17 eventos entre os anos de 1973 e 1993. A partir de 1994 foram encontradas muitas falhas de dados, o que causou a exclusão do período. Apesar disso, a maioria dos coeficientes estatísticos demonstraram um bom ajuste entre as vazões observadas e calculadas, com coeficiente de Nash considerando o período contínuo entre 1973 e 1993 da ordem de 0,5, para os anos de 1973 a 1986 de 0,64 e para os anos de 1978 a 1992 de 0,4

## 5 CONCLUSÃO

O presente estudo busca contribuir para o enriquecimento de informações sobre os recursos hídricos da região semiárida, notadamente no que se refere às bacias hidrográficas com dados escassos. Uma das ferramentas importantes para isso é a modelagem hidrológica.

A necessidade de desenvolvimento ou adequação de modelos apropriados para tais regiões, em particular a que predomina no Nordeste do Brasil, motivou o desenvolvimento do modelo Campus Agreste Watershed Model – CAWM, cuja versão IV foi concebida para bacias hidrográficas de rios intermitentes. Neste trabalho o CAWM IV foi intensivamente aplicado a 45 bacias hidrográficas dos estados do Ceará, rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco, mesmas bacias simuladas por um modelo de aplicação geral, o MODHAC – Modelo Hidrológico Auto-Calibrável, com a finalidade de comparar resultados e performances de ambos.

A deficiência não só dos dados de vazão, já esperadas, mas também da descontinuidade de monitoramento das precipitações por desativação de estações pluviométricas afetou a qualidade das simulações. A integração do banco de dados da ANA com as agências estaduais APAC e FUNCEME reduziu o problema da escassez de dados de chuva enfrentado por Virões et al (2019) para a aplicação do MODHAC, embora não elimine a descontinuidade das séries. Por outro lado, o efeito da presença de barragens, afetando as vazões naturais dos rios, influencia a comparação dos resultados gerados por ambos os modelos. Também a presença de falhas e inconsistências nas séries de vazões são fatores que afetaram o ajuste dos dois modelos.

De maneira geral as tendências de bons e maus indicadores estatísticos estiveram presentes em ambos os modelos para a maioria das séries simuladas e observadas nas diversas estações. Alguns fatores levam a esperar que o desempenho do CAWM IV seja melhor que o do MODHAC. Primeiro, como as simulações no CAWM tem passo de tempo diário, a série de dados se torna mais longa. Segundo, por ter sido concebido para representar mais adequadamente as condições físicas presentes. Por último, pela maior facilidade de calibração de apenas um parâmetro, o fator de perdas, ao invés de 14 presentes no MODHAC. Os resultados efetivamente mostraram ajustes adequados para simuações com dados de algumas estações nos quais a utilização do MODHAC não teve sucesso, assim como

indicadores de performance melhores em geral. Por outro lado, os fatores que intervêm na qualidade dos dados medidos efetivamente prejudicam ambos os modelos.

Embora se tenha conseguido tanto nas simulações contínuas como por eventos valores aceitáveis, bons e alguns muito bons para os indicadores NASH e NASH Raiz, observou-se que a quantidade de eventos que atenderam o indicador NASH Log foi baixa, o que indica que as vazões mínimas não estão bem ajustadas. Também se observou a partir das curvas de permanência desvios significativos em parte significativa das simulações, quando comparadas às vazões medidas. Se por um lado em diversos casos isso reflete a influência de barragens, há que se considerar a hipótese de que o período de calibração com apenas um ano de dados foi insuficiente.

No tocante à regionalização de parâmetros, o agrupamento em regiões homogêneas foi aceitável. Esperava-se, porém, encontrar dentro desses grupos um relacionamento entre características físicas das bacias e os valores dos parâmetros a calibrar. Essas relações físicas não foram evidentes, pois se mostraram factíveis para uns agrupamentos e outros não. Como a amostra é pequena o resultado não se mostrou confiável. Uma explicação possível pode ser a interdependência entre as perdas diretas e as perdas por evapotranspiração. Assim, os valores calibrados para o parâmetro  $K_L$  podem sempre estar influenciados pelo cálculo da evapotranspiração, visto que se complementam. Por outro lado, o parâmetro  $K_S$  foi regionalizado apresentando um único valor para todas as regiões, como feito por Cirilo et al (2020) para as bacias do semiárido pernambucano.

Acredita-se que os resultados obtidos demonstram a aplicabilidade do modelo CAWM IV para bacias hidrográficas de regiões semiáridas, considerando que, ao final, apenas um parâmetro, o coeficiente de perdas, precisou efetivamente ser calibrado. Os outros parâmetros têm significado físico e podem ser avaliados a partir de características físicas da bacia ou estimados com base nas aplicações conhecidas do modelo.

Como recomendações para trabalhos futuros, boas contribuições ao estudo desenvolvido podem vir de:

- Pesquisas sobre elementos do meio físico que podem contribuir para aprimorar os mecanismos do cálculo de perdas de água nas simulações, como a quantificação das depressões do terreno, por meio de geoprocessamento aplicado ao MDE/MDT;
- Aprofundamento da relação entre a evapotranspiração e as demais perdas, na hipótese de que isso venha a melhorar a perspectiva de regionalização desse parâmetro.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V.. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista da FAE**, v. 20, n. 1, p. 129–137, 2017. Disponível em: <https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/view/113>

AL-QURASHI, A.; MCINTYRE, N.; WHEATER, H.; UNKRICH, C.. Application of the Kineros2 rainfall–runoff model to an arid catchment in Oman. *Journal of Hydrology*, v. 355, n. 1–4, p. 91–105, 2008.

ANA. **Metadados**. 2020. Disponível em: <https://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home>.

ANA. **Atlas Nordeste**: Abastecimento Urbano de Água: Alternativas de Oferta de Água para as Sedes Municipais da região Nordeste do Brasil e do Norte de Minas gerais. Brasília: ANA, 2006. 80 p. ISBN: 85-89629-11-2. Disponível em: <<https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSH/ArquivosPDF/publicacoes/AtlasNordeste-AbastecimentoUrbanodeagua.pdf> >. Acesso em: 22 julho 2020.

ARAÚJO, S. M. S.. A região semiárida do nordeste do Brasil: Questões ambientais e possibilidades de uso sustentável dos recursos. **Revista Rios Eletrônica**, v. 5, n. 5, p. 89–98, 2011. Disponível em: [https://www.fasete.edu.br/revistarios/media/revistas/2011/5/a\\_regiao\\_semiarida\\_do\\_nordeste\\_do\\_brasil.pdf](https://www.fasete.edu.br/revistarios/media/revistas/2011/5/a_regiao_semiarida_do_nordeste_do_brasil.pdf)

ÁVILA, C. J. C. P.; ASSAD, E. D.; VERDESIO, J. J.; EID, N. J.; SOARES, W.; FREITAS, Marcos Aurélio Vasconcelos de. **Geoprocessamento da informação hidrológica**. ASFAGRO: trabalhos técnicos, 2007.

BAO, Z.; ZHANG, J.; LIU, J.; FU, G.; WANG, G.; HE, R.; YAN, X.; JIN, J.; LIU, H.. Comparison of regionalization approaches based on regression and similarity for predictions in ungauged catchments under multiple hydro-climatic conditions. **Journal of Hydrology**, v. 466–467, p. 37–46, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.07.048>

BÁRDOSSY, A. Calibration of hydrological model parameters for ungauged catchments. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 2, p. 703–710, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-11-703-2007>

BECK, H. E.; VAN DIJK, A. I. J. M.; DE ROO, Ad; DUTRA, E.; FINK, G.; ORTH, R.; SCHELLEKENS, J.. Global evaluation of runoff from 10 state-of-the-art hydrological models. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 6, p. 2881–2903, 2017.

BECK, H. E.; VAN DIJK, A. I. J. M.; DE ROO, Ad; MIRALLES, D. G.; MCVICAR, T. R.; SCHELLEKENS, J.; BRUIJNZEEL, L. A.. Global-scale regionalization of hydrologic model parameters. **Water Resources Research**, v. 52, n. 5, p. 3599–3622, 2016.

BERGSTRÖM, S.. Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments. **SHMI**, Norrköpin, n. 7, p. 134, 1976.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, n. 1, p. 43–69, 1979.

BOUMENNI, H.; BACHNOU, A.; ALAA, N. E.. The rainfall-runoff model GR4J optimization of parameter by genetic algorithms and Gauss-Newton method: application for the watershed Ourika (High Atlas, Morocco). **Arabian Journal of Geosciences**, v. 10, n. 15, 2017.

BRIGHENTI, T.; BONUMÁ, N.; CHAFFE, P.. Calibração hierárquica do modelo swat em uma bacia hidrográfica Catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 53–64, 2016.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. Principles of Geographical Information Systems. *In: New Zealand Geographer*. Oxford: OXFORD UNIVERSITY PRESS, 1998. p. 17–34.

CABRAL, S. L.; SAKURAGI, J.; SILVEIRA, C. Da S.. Incertezas e erros na estimativa

de vazões usando modelagem hidrológica e precipitação por RADAR. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 12, n. 1, p. 57, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1924>

CHAI, T.; DRAXLER, R. R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. **Geoscientific Model Development**, v. 7, n. 3, p. 1247–1250, 2014.

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, L. A. C. da; CAMPOS, J. H. de A. L. Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 07, n. 04, p. 755–763, 2014.

CIRILO, J. A.; VERÇOSA, L. F. de M.; GOMES, M. M. de A.; FEITOZA, M. A. B.; FERRAZ, G. de F.; SILVA, B. de M.. Development and application of a rainfall-runoff model for semi-arid regions. **RBRH**, Porto Alegre, v. 25, p. 1–19, 2020.

COEN, M. **108 Contos e parábolas orientais**. 1.ed. São Paulo: Planeta. 2015.

COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia) Porto Alegre, 2001.

CORREIA, R. C.; KIILL, L. H. P.; MOURA, M. S. B. de; CUNHA, T. J. F.; JESUS JUNIOR, L. A. DE ARAUJO, J. L. P. A região semiárida brasileira. *In: Produção de caprinos e ovinos no Semiárido*. p. 21–48. *E-book*. 2011.

CPRM. **Atlas Pluviométrico do Brasil**. 2020. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>. Acesso em: 5 ago. 2020.

DE VOS, N. J.; RIENTJES, T. H. M.; GUPTA, H. V. Diagnostic evaluation of conceptual rainfall-runoff models using temporal clustering. *Hydrological Processes*, v. 24, n. 20, p. 2840–2850, 2010.

DINIZ, L. S. **REGIONALIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE MODELO CHUVA-VAZÃO USANDO REDES NEURAIS**. 2008. Tese Doutorado (Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

EDIJATNO, C. Michel. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. **La Houille Blanche**, Antony, n. 2, p. 113–122, 1989.

ELETROBRÁS. **Metodologia para regionalização de vazões**. Rio de Janeiro: Centrais Elétricas Brasileiras S.A., 1985.

EMBRAPA. **Mapa de solos do Brasil**. 2020. Disponível em: [http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Asolos\\_br5m\\_2011\\_lat\\_long\\_wgs84](http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Asolos_br5m_2011_lat_long_wgs84). Acesso em: 20 ago. 2020.

FARR, T. G.; KOBICK, M. Shuttle Radar Topography Mission Produces a Wealth of Data. **Eos**, Pasadena, v. 81, n. 48, p. 583–585, 2000.

FELIX, V. de S.; DA PAZ, A. R.. Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, RS, v. 21, n. 3, p. 556–569, 2016.

FITZ, P. R.. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de textos, 2008.

FREITAS, V. A. L. **contribuição ao processo de regionalização de vazões: Análise de métodos e variáveis explicativas**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UFPE, Recife, 2003.

GIULIETTI, A. M.; HARLEY, R. M.; QUEIROZ, L. P. de; BARBOSA, M. R. de V.; NETA, A. L. B.; FIGUEIREDO, M. A. **Vegetação e flora da caatinga**. Recife: Associação Plantas do Nordeste, 2002. *E-book*.

GOLMOHAMMADI, G.; PRASHER, S.; MADANI, A.; RUDRA, R.. Evaluating three

hydrological distributed watershed models: MIKE-SHE, APEX, SWAT. **Hydrology**, v. 1, n. 1, p. 20–39, 2014.

GOMES, M. M. de A.. **Abordagem integrada de modelagem hidrológica e operação de barragens para avaliação da eficiência do controle de cheias na bacia do rio Capibaribe**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

GOTTSCHALK, L.; MOTOVILOV, Y. Macro-scale hydrological modelling - a scandinavian experience. *In: 'CAN SCIENCE AND SOCIETY SAVE THE WATER CRISIS IN 2000*, Tokio. **Anais...Tokyo: Japan Society of Hydrology and Water Resources**. Tokio: International Symposium, 2000.

HANSEN, J. R.; REFSGAARD, J. C.; HANSEN, S.; ERNSTSEN, V.. Problems with heterogeneity in physically based agricultural catchment models. *Journal of Hydrology*, v. 342, n. 1–2, p. 1–16, 2007.

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moment**. UK: Cambridge University Press, CB2 2RU, 1997.

HUANG, P.; LI, Z.; CHEN, J.; LI, Q.; YAO, C. Event-based hydrological modeling for detecting dominant hydrological process and suitable model strategy for semi-arid catchments. *Journal of Hydrology, Amsterdam*, v. 542, p. 292–303, 2016.

INPE. **Introdução ao Geoprocessamento**. 2020. Disponível em: [http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao\\_geo.html](http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_geo.html). Acesso em: 20 jul. 2020.

INSA. **Acervo Digital**. 2014. Disponível em: <http://sigsab.insa.gov.br/acervoDigital>. Acesso em: 5 ago. 2020.

JAIN, S. K.; SUDHEER, K. P. Fitting of hydrologic models: A close look at the nash-sutcliffe index. **Journal of Hydrologic Engineering**, [S. l.], v. 13, n. 10, p. 981–986, 2008. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2008\)13:10\(981\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:10(981))

KAISER, I. M.. Avaliação de métodos de composição de campos de precipitação para uso em modelos hidrológicos distribuídos. São Carlos, p. 400, 2006.

LANNA, A. E. **MAG 1 - MODHAC 97: Modelo Hidrológico Auto-Calibrável**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, 1997.

LEAL, I. R.; TABARELLI, Marcelo; SILVA, José Maria Cardoso da. **Ecologia e Conservação da Caatinga**. Recife: UFPE, 2003.

LEE, H.; MCINTYRE, N.; WHEATER, H.; YOUNG, A.. Assessment of rainfall-runoff model structures for regionalisation purposes. v. I, n. 2002, p. 302–308, 2004.

LI, F.; ZHANG, Y.; XU, Z.; TENG, J.; LIU, C.; LIU, W.; MPELASOKA, F.. The impact of climate change on runoff in the southeastern Tibetan Plateau. **Journal of Hydrology**, v. 505, p. 188–201, 2013.

LOPES, I.; MONTENEGRO, A. A. A. Hydrological Processes Simulation at Plot Scale Using the Smap Model in the Semiarid. Recife, v. 3, n. 2, p. 78–86, 2017.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. SMAP: a simplified hydrological model. Littleton, p. 167– 176, 1981.

LOU, R. F.. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do rio Piabanha/RJ**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.

MELO, H. De A.. **Integração entre modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas: Uma avaliação metodológica**. 2010. Disertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

MENDES, C. A. B. **Integração de modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas: Fundamentos**. Porto Alegre, RS: Revista Brasileira de

Recursos Hídricos, 1996.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. Geoprocessamento em Recursos hídricos Princípios, integração e Aplicação 2a Edição Revista e Ampliada. Porto Alegre: ABRH, 2013, v.1. p.572.

MENDEZ, M.; CALVO-VALVERDE, L. Assessing the Performance of Several Rainfall Interpolation Methods as Evaluated by a Conceptual Hydrological Model. *Procedia Engineering*, v. 154, p. 1050–1057, 2016.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. De. **Introdução ao processamento de imagem de sensoriamento remoto**. Brasília: Universidade de Brasília, 2012.

MORIASI, D. N.; WILSON, B. N.; ARNOLD, J. G.; GOWDA, P. H. Hydrologic and water quality models: Use, calibration, and validation. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 55, n. 4, p. 1241–1247, 2012.

NASONOVA, O. N. Application of a Land Surface Model for Simulating Rainfall Streamflow Hydrograph: 2. Comparison with Hydrological Models. *Hydrological Processes*, v. 38, n. 3, p. 274–283, 2011.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. Soil and Water Assessment Tool theoretical Documentation Version 2009. Agricultural Research Service Blackland Research Center – Texas Agrilife Research: Texas A&M University System, College Station, 2011.

LOUDIN, L.; ANDRÉASSIAN, V.; PERRIN, C.; MICHEL, C.; LE MOINE, N.. Spatial proximity, physical similarity, regression and ungaged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. **Water Resources Research**, v. 44, n. 3, p. 1–15, 2008.

LOUDIN, L.; KAY, A.; ANDRÁASSIAN, V.; PERRIN, C.. Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar? **Water Resources Research**, v. 46, n. 11, p. 1–15, 2010.

PARAJKA, J.; VIGLIONE, A.; ROGGER, M.; SALINAS, J. L.; SIVAPALAN, M.; BLÖSCHL, G. Comparative assessment of predictions in ungauged basins – Part 1: Runoff-hydrograph studies. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 17, n. 5, p. 1783–1795, 2013.

PATIL, S. D.; STIEGLITZ, M. Modeling daily streamflow at ungauged catchments: What information is necessary? *Hydrological Processes*, v. 28, n. 3, p. 1159-1169, 2014. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9660>.

PERNAMBUCO, Governo do Estado de. **Pernambuco Tridimensional**. Recife, 2016. Disponível em: <http://www.pe3d.pe.gov.br/>. Acesso em: 5 maio. 2020.

PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology*, v. 242, n. 3–4, p. 275–301, 2001.

PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V.. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. **Journal of Hydrology**, Antony, v. 279, n. 1–4, p. 275–289, 2003.

PETHERAM, C.; RUSTOMJI, P.; CHIEW, F. H. S.; VLEESHOUWER, J. Rainfall-runoff modelling in northern Australia: A guide to modelling strategies in the tropics. *Journal of Hydrology*, v. 462–463, p. 28-41, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.046>.

PILZ, T.; DELGADO, J. M.; VOSS, S.; VORMOOR, K.; FRANCKE, T.; COSTA, A. C.; MARTINS, E.; BRONSTERT, A.. Seasonal drought prediction for semiarid northeast Brazil. **Universität Potsdam**, n. 702, p. 21, 2019.

POMPERMAYER, R. do C.. **TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO APLICADAS AO MODELO SCS – SOILCONSERVATION SERVICE – CURVE NUMBER**. 2013. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) - UFMG, Belo Horizonte, 2013.

PONCELET, C.; MERZ, R.; MERZ, B.; PARAJKA, J.; OUDIN, L.; ANDRÉASSIAN, V.; PERRIN, C.. Process-based interpretation of conceptual hydrological model performance using a multinational catchment set. *Water Resources Research*, v. 53, n. 8, p. 7247–7268, 2017.

RIGGS, H. C. Estimating flow characteristics at ungauged sites. **IAHS**, Liubliana, n. 191, p. 159–170, 1990.

SACOMAN, M. A. R.. **Otimização De Projetos Utilizando Grg , Solver E Excel**. Belém: 2012.

SAMUEL, J.; COULIBALY, P.; METCALFE, R. A. Estimation of continuous streamflow in ontario ungauged basins: Comparison of regionalization methods. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 16, n. 5, p. 447–459, 2011.

SANTOS, E. C. K. **Modelagem hidrológica hec-hms da bacia hidrográfica do ribeirão lavapés, botucatu-sp**. 2017. Tese (Doutorado em Agronomia) - Unesp, Botucatu, 2017.

SARTORI, A.. **Desenvolvimento de critérios para classificação hidrológica de solos e determinação de valores de referência para o parâmetro CN**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)Campinas, SP, 2010.

SAVVIDOU, E.; EFSTRATIADIS, A.; KOUSSIS, A.; KOUKOUVINOS, A.; SKARLATOS, D.. The Curve Number Concept as a Driver for Delineating Hydrological Response Units. **Water**, v. 10, n. 2, p. 194, 2018.

SCHAEFLI, B.; GUPTA, H. V. Do Nash values have value? **Hydrological Processes**, v. 21, n. 15, p. 2075–2080, 2007.

SHARMA, A.; TIWARI, K. N. A comparative appraisal of hydrological behavior of SRTM DEM at catchment level. **Journal of Hydrology**, v. 519, n. PB, p. 1394–1404, 2014.

SILANS, A. M. B. P. De; ALMEIDA, N.; ALBUQUERQUE, D. J. S. De; PAIVA, E. D. B. Hidrográfica Do Rio Do Peixe - Estado Da Paraíba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, p. 5–19, 2000.

SILVA, B. de M. **MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA PARA AVALIAÇÃO DE INUNDAÇÕES NA ZONA URBANA DE CARUARU, PE**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - UFPE, Caruaru, 2019.

SILVA, J. M. A. DA. Modelo hidrológico para o cálculo do balanço hídrico e obtenção do hidrograma de escoamento superficial em bacias hidrográficas: desenvolvimento e aplicação. **Ufv**, v. tese de do, 2002.

SOARES, M. R. G. de J.; CENTENO, J. A. S.; FIORI, C. O.; SILVEIRA, C. T. da; KAVISKI, E.. Potencial de Retenção de Águas Pluviais pelo Método “Curve Number”. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Curitiba, v. 07, n. 03, p. 476–485, 2014.

SSEGANE, H.; TOLLNER, E. W.; MOHAMOUD, Y. M.; RASMUSSEN, T. C.; DOWD, J. F. Advances in variable selection methods I: Causal selection methods versus stepwise regression and principal component analysis on data of known and unknown functional relationships. **Journal of Hydrology**, v. 438–439, p. 16–25, 2012.

SUDENE. Delimitação do Semiárido. 2020. Disponível em: <http://www.sudene.gov.br/delimitacao-do-semiarido>

TRAORE, V. B.; SAMBOU, S.; TAMBA, S.; FALL, S.; DIAW, A. T.; CISSE, M. T.. Calibrating the Rainfall-Runoff Model GR4J and GR2M on the Koulountou River Basin, a Tributary of the Gambia River. **American Journal of Environmental Protection**, v. 3, n. 1, p. 36, 2014.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2005.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da

Universidade/ UFRGS, 2001.

UFRGS. **O que é o MGB?**. Porto Alegre, RS, 2020. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/hge/mgb/o-que-e/>. Acesso em: 1 jul. 2020.

USGS. Arquivo USOS EROS - Elevação digital - Resumo da missão SRTM. Washington, 2020 a. Disponível em: [https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-srtm-mission-summary?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-srtm-mission-summary?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects)

USGS. **Earth Explorer**. Washington, 2020b. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 5 maio. 2020.

USGS. Arquivo USGS EROS - Elevação digital - Mapas de cobertura SRTM. Washington, 2020 c. Disponível em: [https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-srtm-coverage-maps?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-srtm-coverage-maps?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects)

UVO, C.; BERNDTSSON, R.. Regionalization and spatial properties of Ceará State rainfall in northeast Brazil. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, [S. l.], v. 101, n. D2, p. 4221–4233, 1996.

VIGLIONE, A.; PARAJKA, J.; ROGGER, M.; SALINAS, J. L.; LAAHA, G.; SIVAPALAN, M.; BLÖSCHL, G. Comparative assessment of predictions in ungauged basins &ndash; Part 3: Runoff signatures in Austria. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 10, n. 1, p. 449–485, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hessd-10-449-2013>

VIRÃES, M. V.. **Regionalização de parâmetros de modelo hidrológico para a região semiárida do nordeste brasileiro**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

VIRÃES, M. V.; CIRILO, J. A.. Regionalization of hydrological model parameters for the semi-arid region of the northeast Brazil. **Revista Brasileira de Recursos**

**Hidricos**, Porto Alegre, v. 24, 2019.

WAGENER, T.. Can we model the hydrological impacts of environmental change? **Hydrological Processes**, v. 21, n. 23, p. 3233–3236, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/hyp.6873>

WAGENER, T.; MCINTYRE, N.. Identification of rainfall-runoff models for operational applications. **Hydrological Sciences Journal**, v. 50, n. 5, p. 735–751, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.5.735>

YANG, X.; MAGNUSSON, J.; RIZZI, J.; XU, C.. Runoff prediction in ungauged catchments in Norway: comparison of regionalization approaches. **Hydrology Research**, v. 49, n. 2, p. 487–505, 2018.

ZENG, L.; XIONG, L.; LIU, D.; CHEN, J.; KIM, J. S.. Improving parameter transferability of GR4J model under changing environments considering nonstationarity. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 10, 2019.

ZHANG, Z.; ZHANG, Q.; SINGH, V. P.; SHI, P.. River flow modelling: comparison of performance and evaluation of uncertainty using data-driven models and conceptual hydrological model. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 32, n. 9, p. 2667–2682, 2018.

ZHAO, R. J. Watershed Hydrologic Modelling. **Water Resources Power Press**, Beijing, 1984.

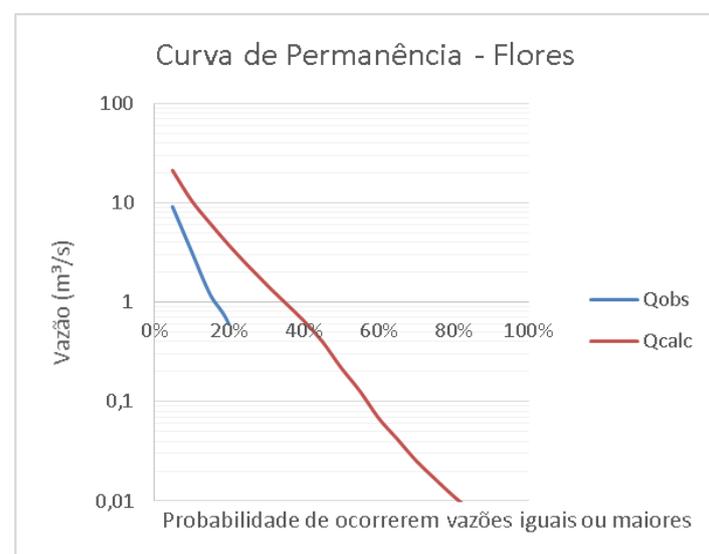
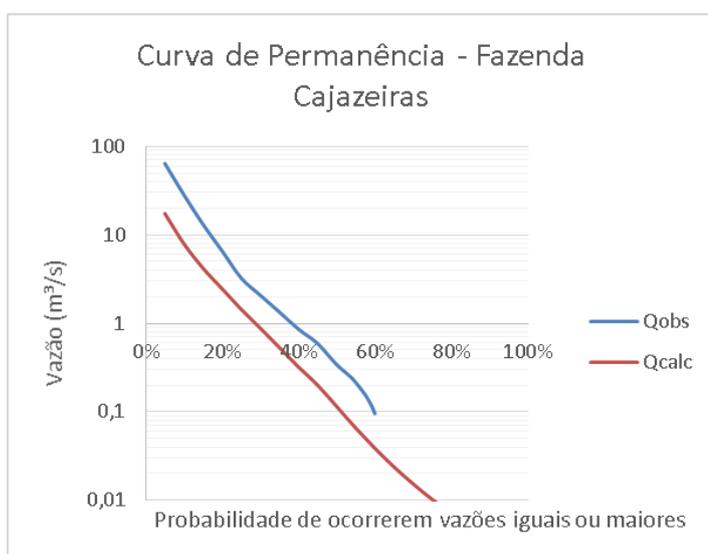
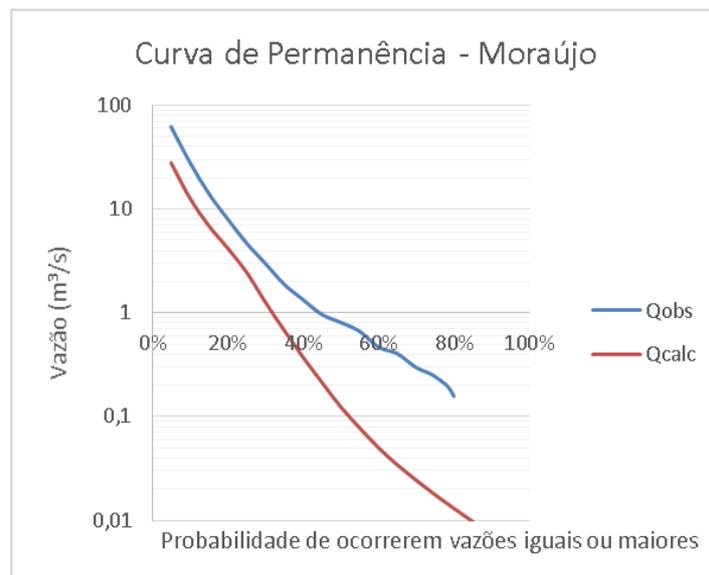
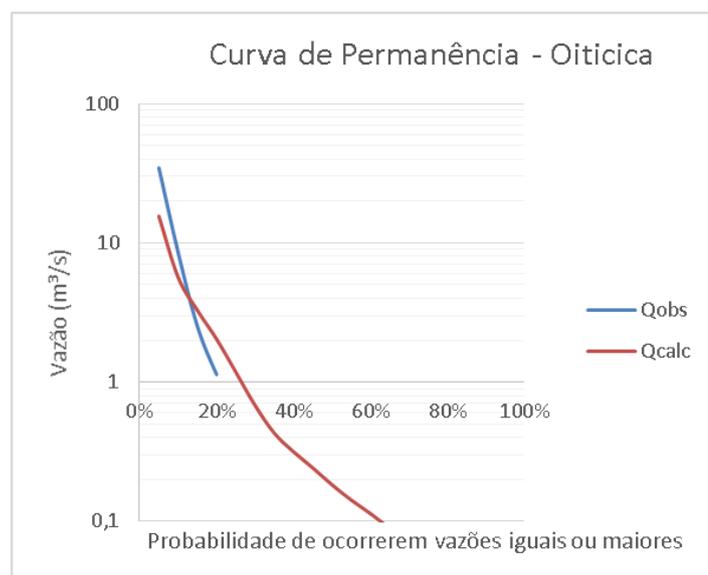
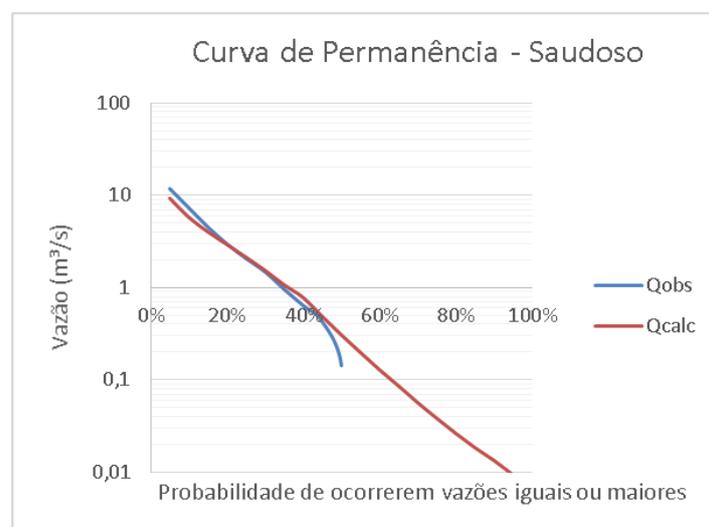
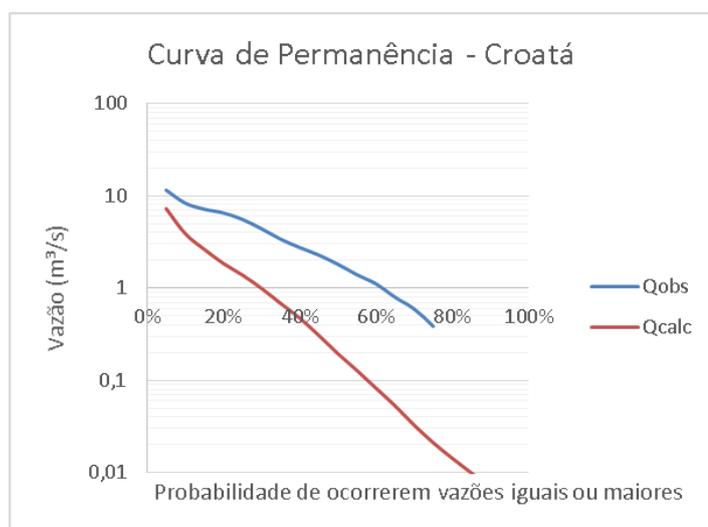
**APÊNDICE A – QUANTIDADE DE POSTOS PLUVIOMÉTRICOS USADOS EM  
CADA SUB-BACIA**

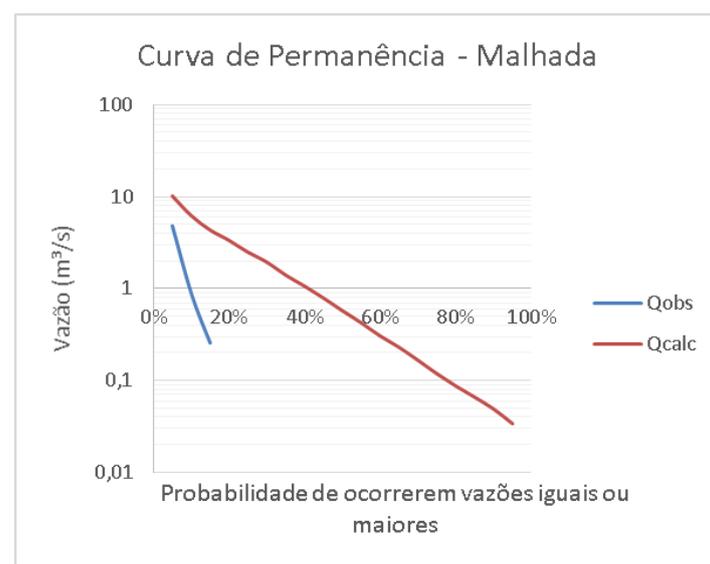
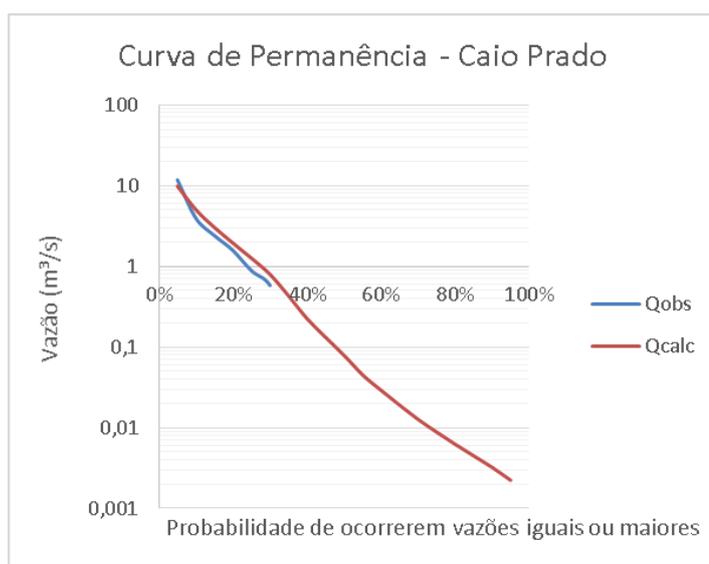
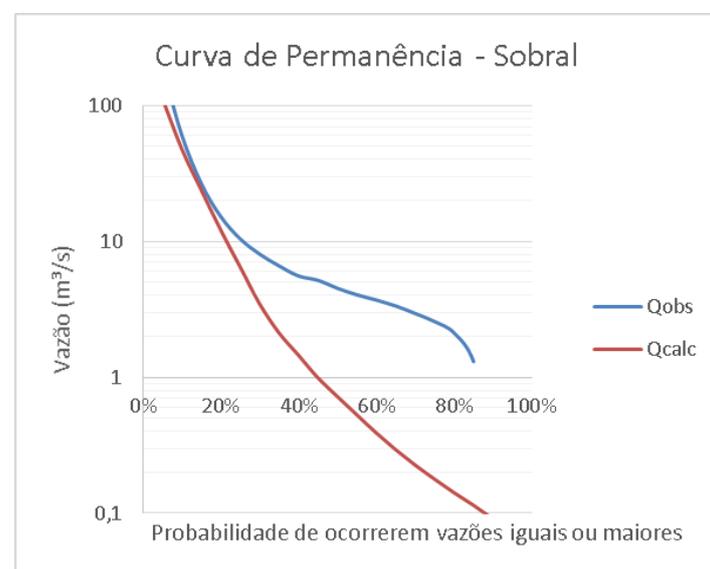
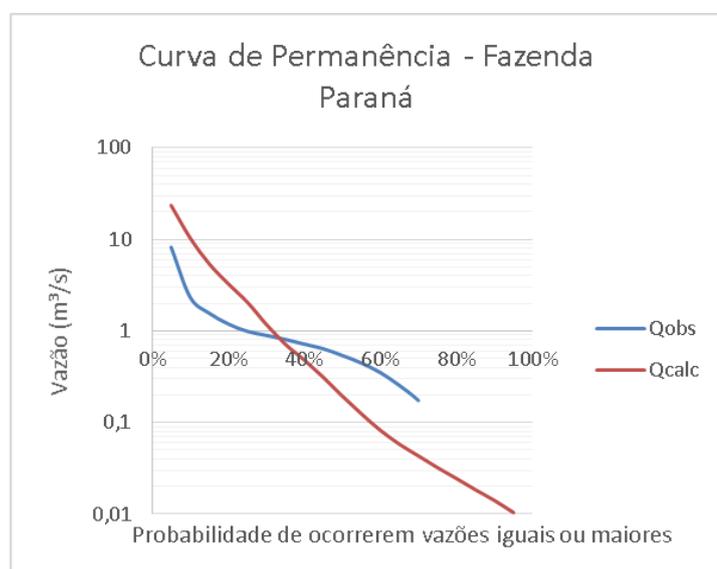
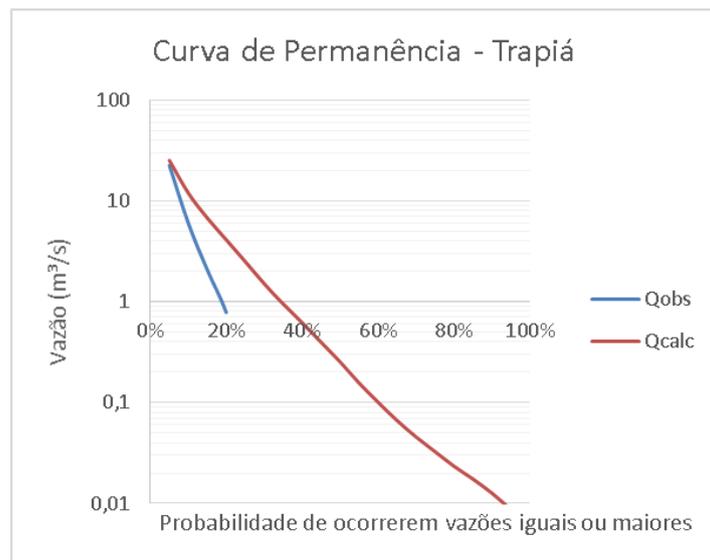
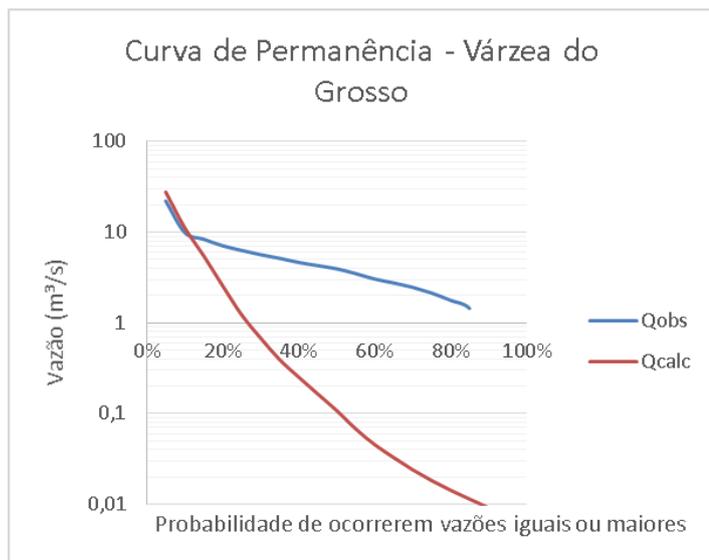
<b>Código do posto fluviométrico</b>	<b>Nome do posto fluviométrico (Continua)</b>	<b>Quantidade de postos pluviométricos</b>
34730000	Croatá	26
34740000	Saudoso	39
34741000	Oiticica	133
35125000	Moraujo	33
35210000	Fazenda Cajazeiras	31
35223000	Flores	21
35235000	Várzea do Grosso	63
35240000	Trapiá	21
35258000	Fazenda Paraná	28
35275000	Sobral	170
35830000	Caio Prado	24
36045000	Malhada	42
36070000	Sítio Patos	169
36125000	Sítio Poço Dantas	51
36130000	Cariús	77
36160000	Iguatu	248
36270000	Lavras da Mangabeira	155
36290000	Icó	215
36320000	Jaguaribe	509
36390000	Peixe Gordo	618
36470000	Senador Pompeu	59
36520000	Quixeramobim	95
36580000	Morada Nova II	223
37030000	Pau dos ferros	31
37080000	Pedra de abelhas	87
37084000	Governador Dix Sept Rosado	88
37090000	Mossoró	106
37260000	Antenor Navarro	38
37340000	Piancó	35
37410000	Sítio Vassouras	119
37470000	Jardim de Piranhas	162
37515000	Sítio Volta	21
37559000	Caicó	49
37570000	São Fernando	68
37710150	Sítio Acauã II	257

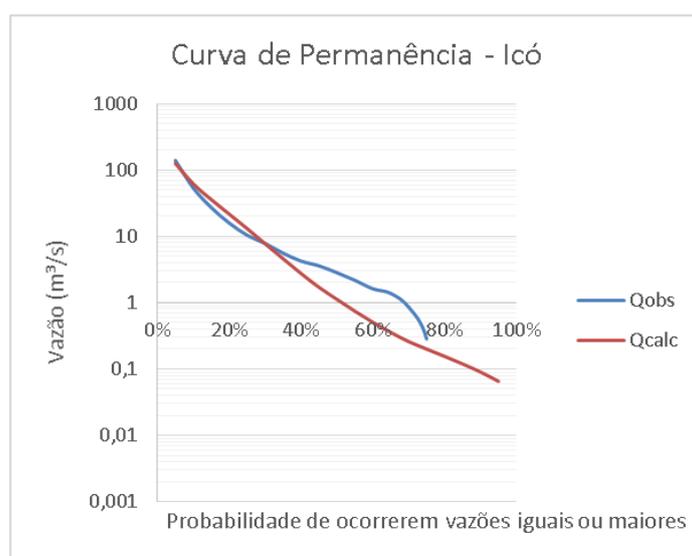
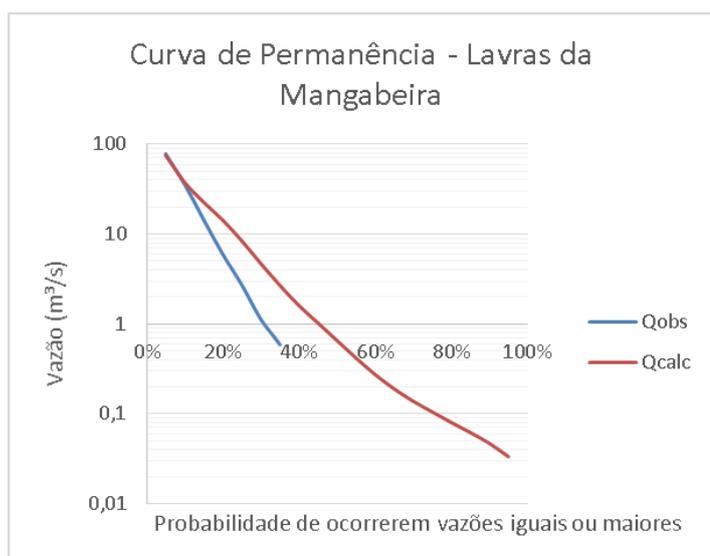
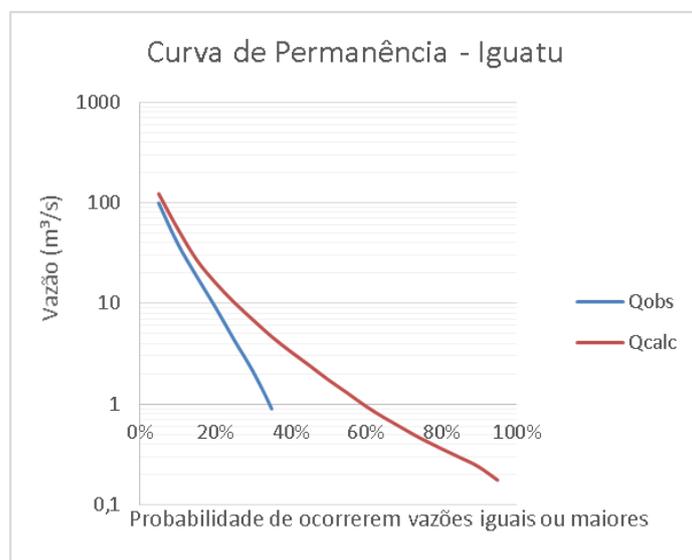
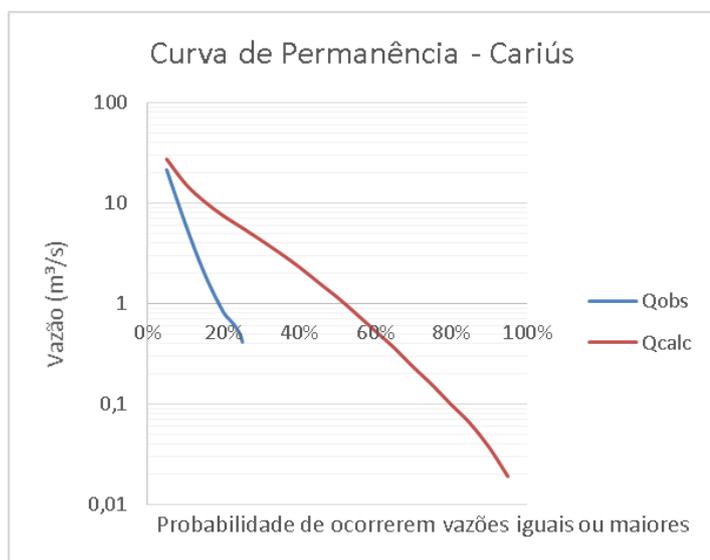
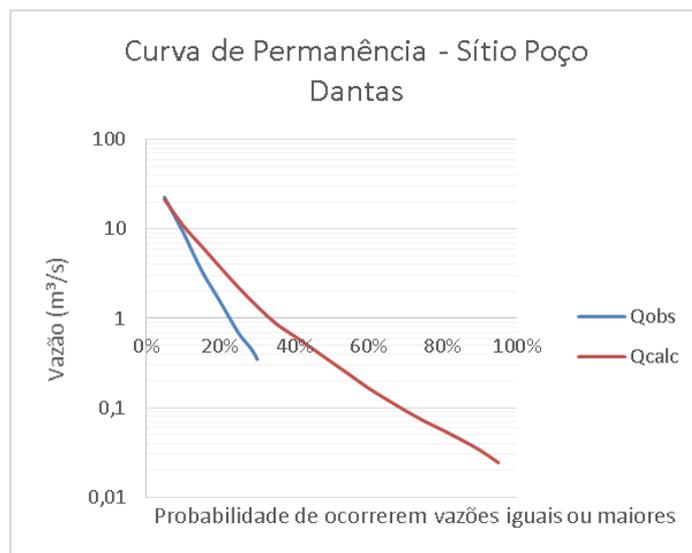
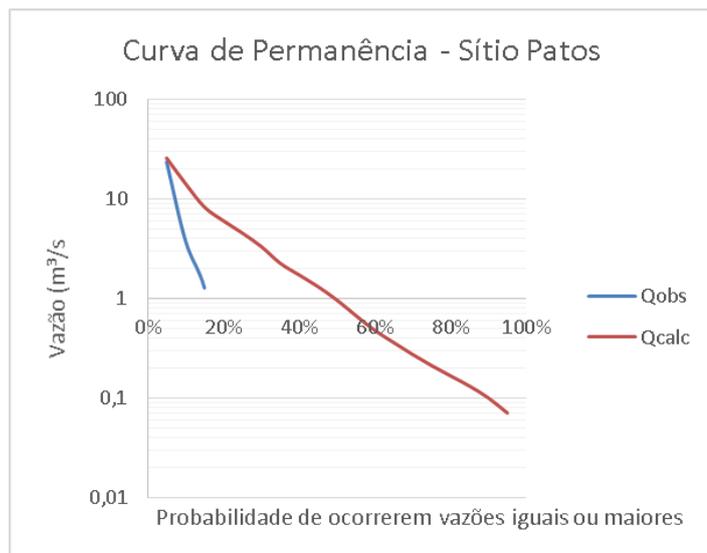
<b>Código do posto fluviométrico</b>	<b>Nome do posto fluviométrico (Continua)</b>	<b>Quantidade de postos pluviométricos</b>
38830000	Caraúbas	37
38850000	Poço de Pedras	27
38860000	Bodocongó	103
39130000	Toritama	51
39340000	Caruaru	42
39540000	Capivara	50
48820000	Afogados da Ingazeira	39
48860000	Floresta	121
48880000	Ilha Grande	20
49160000	Inajá	70

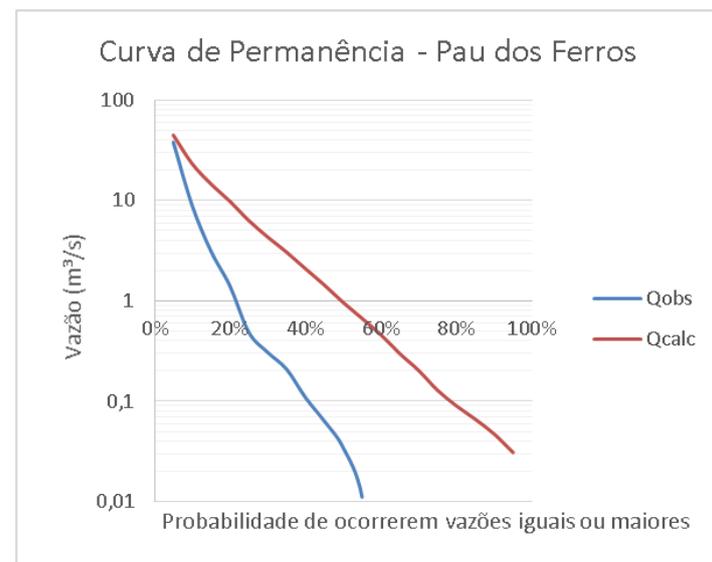
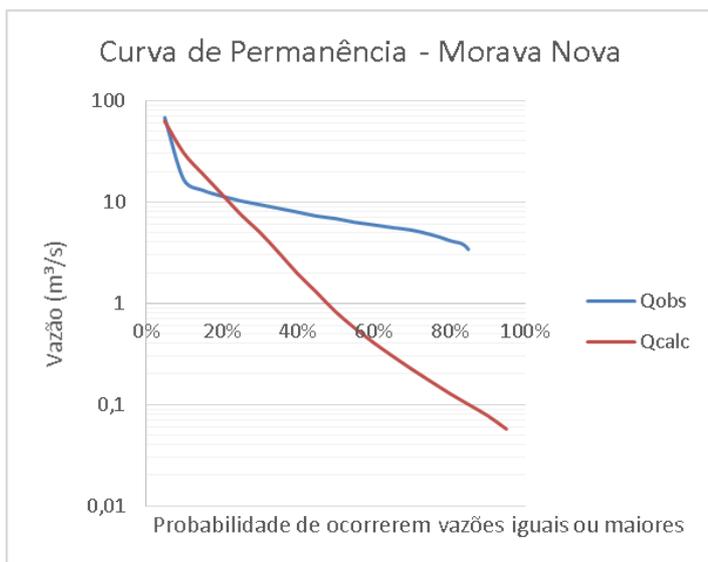
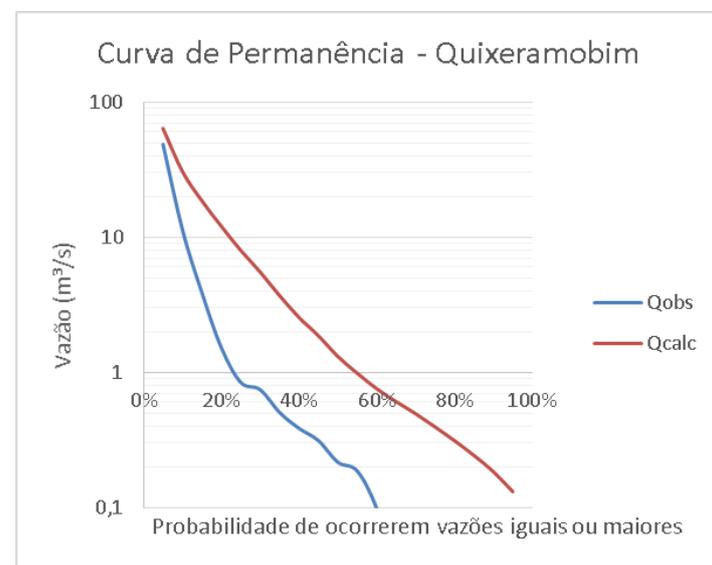
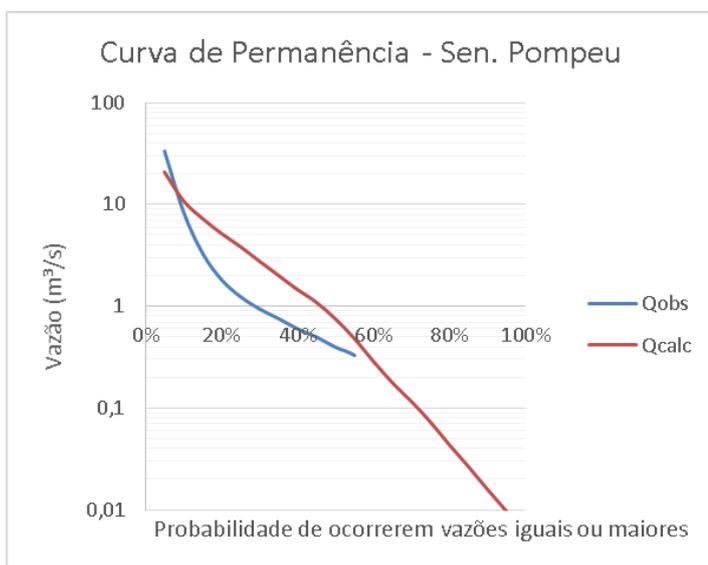
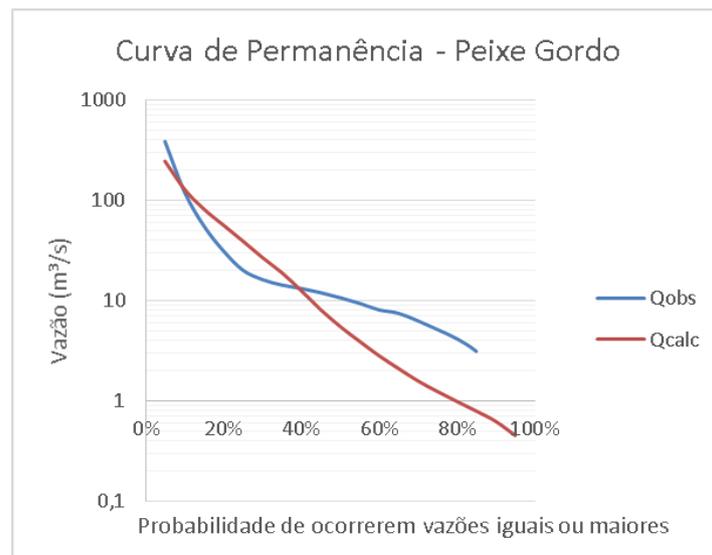
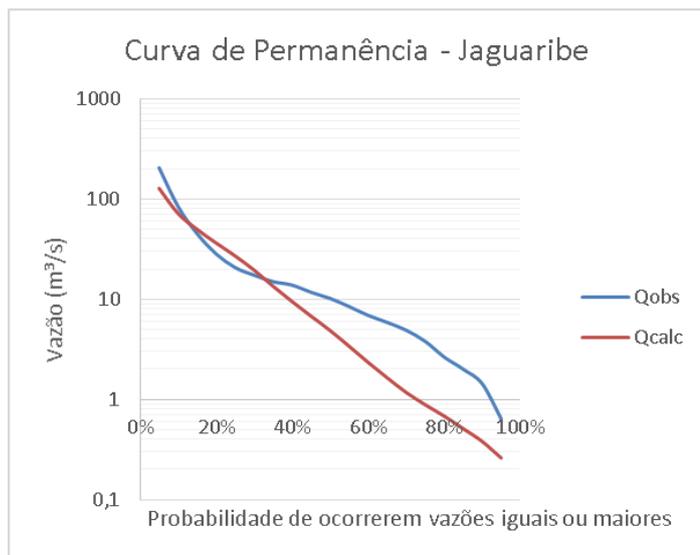
Fonte: Autora (2020).

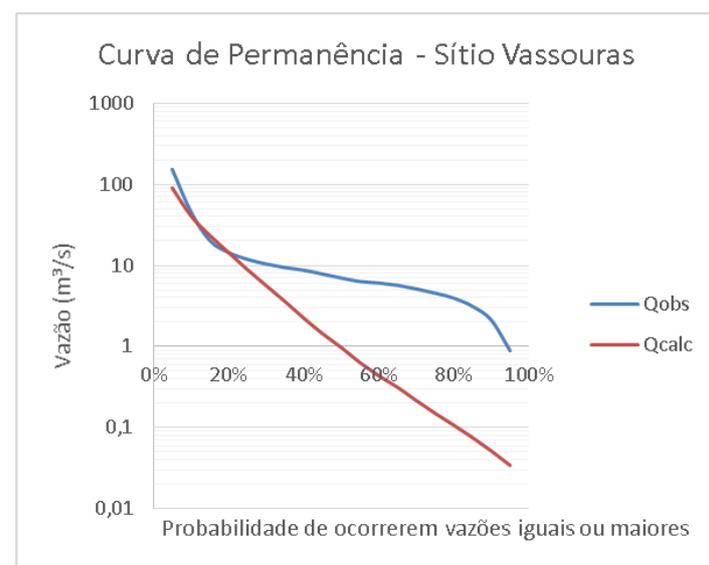
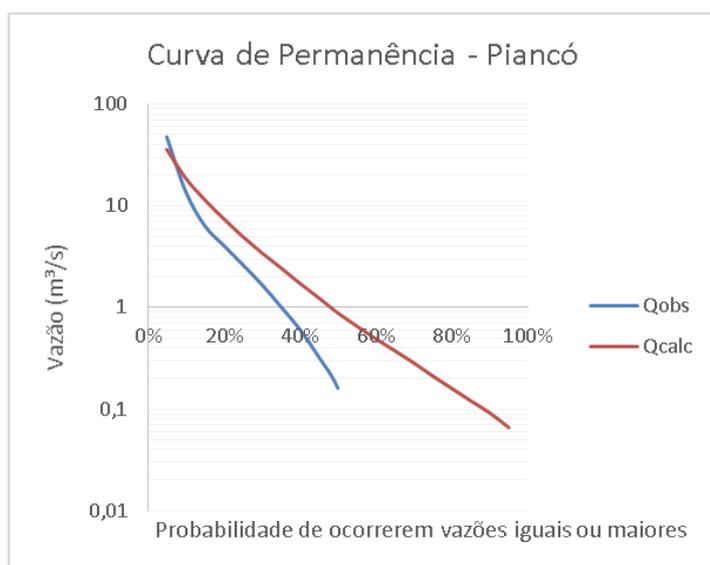
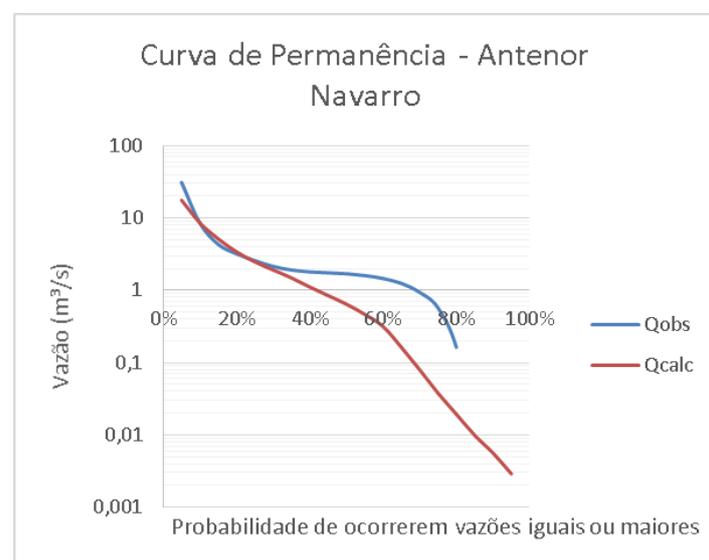
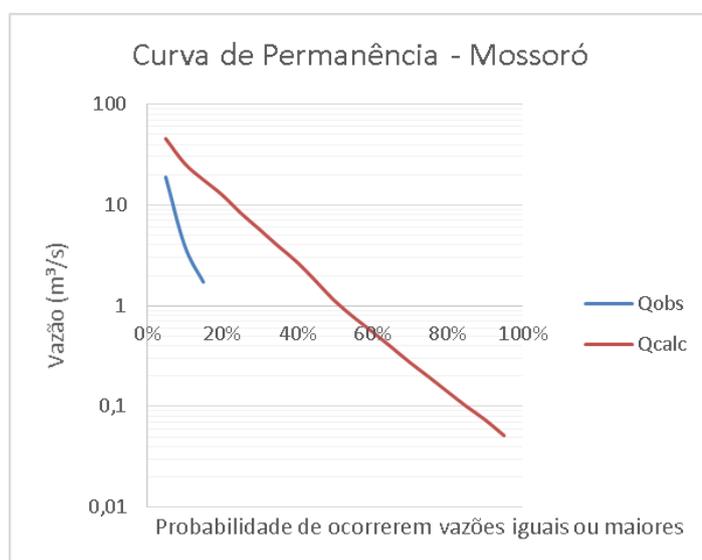
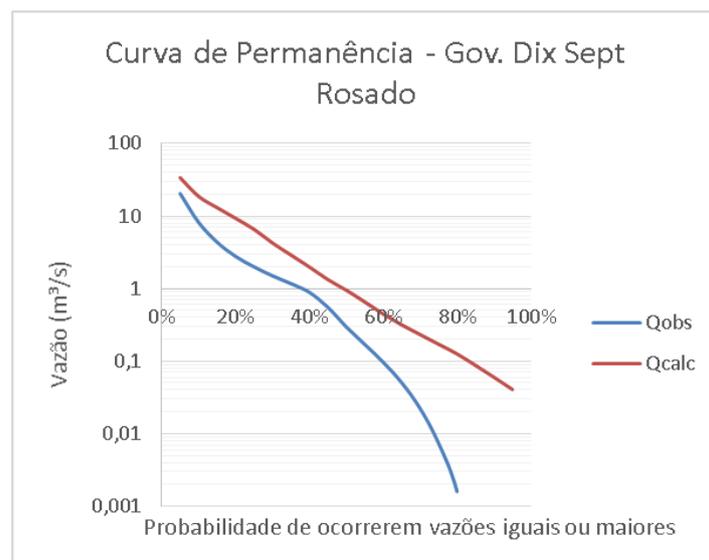
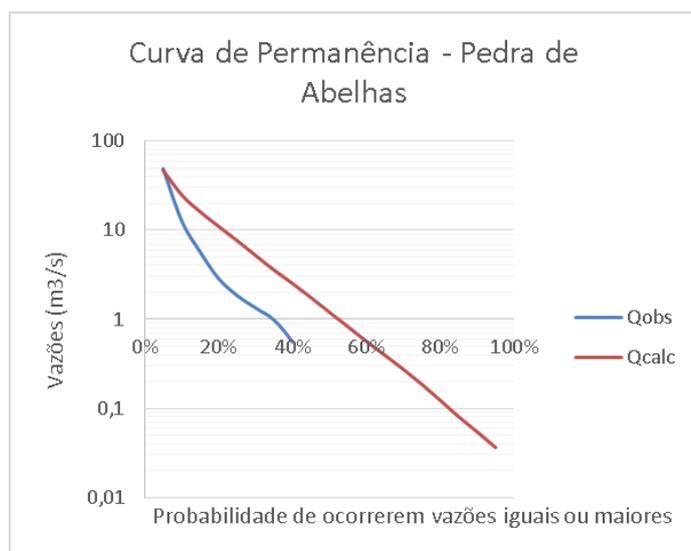
## APÊNDICE B – CURVAS DE PERMANÊNCIA

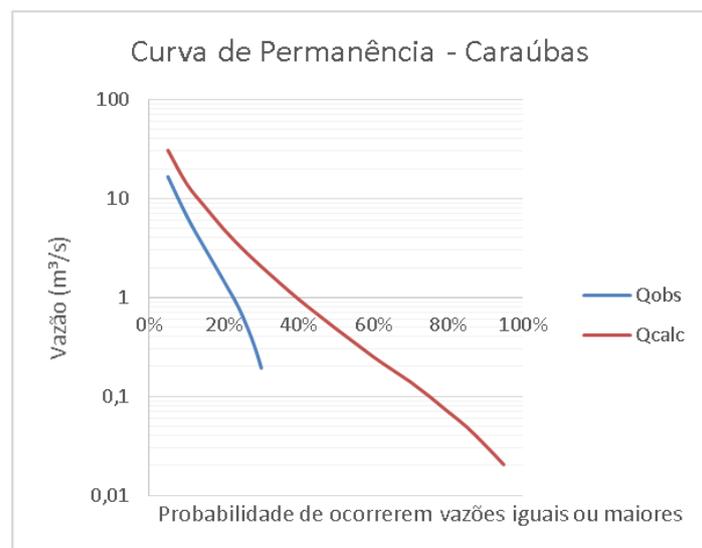
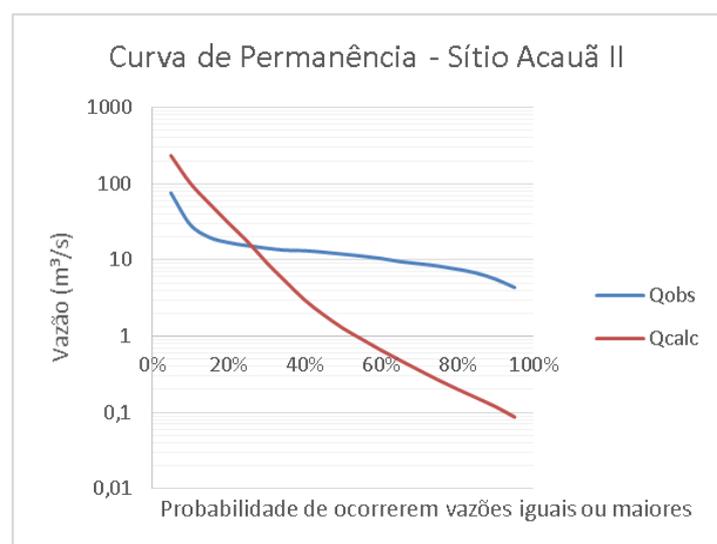
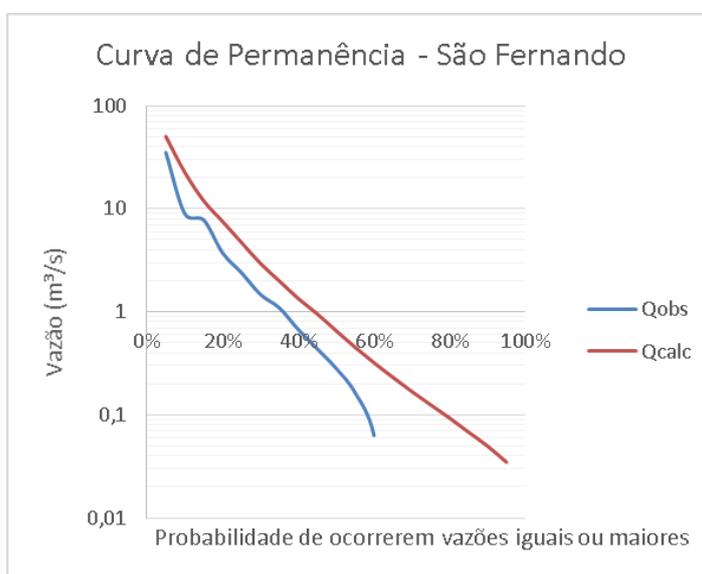
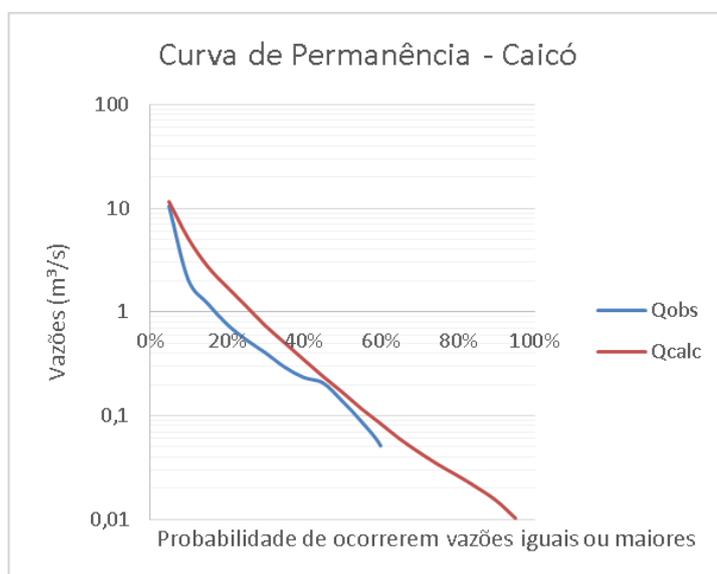
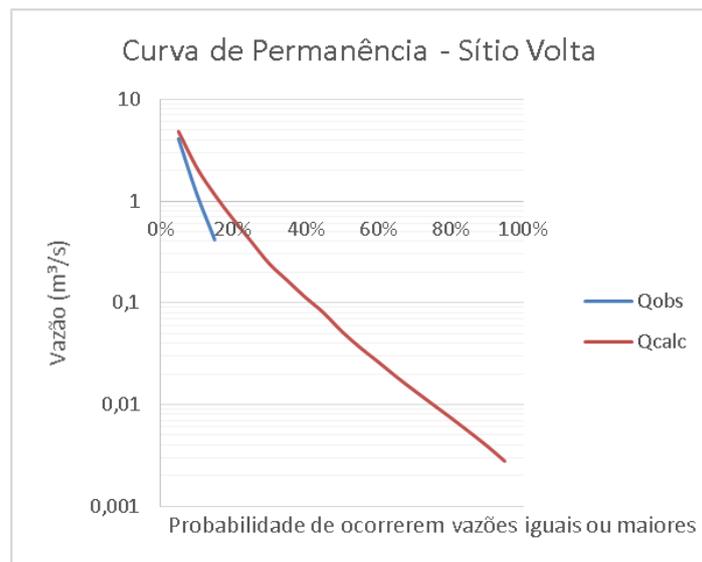
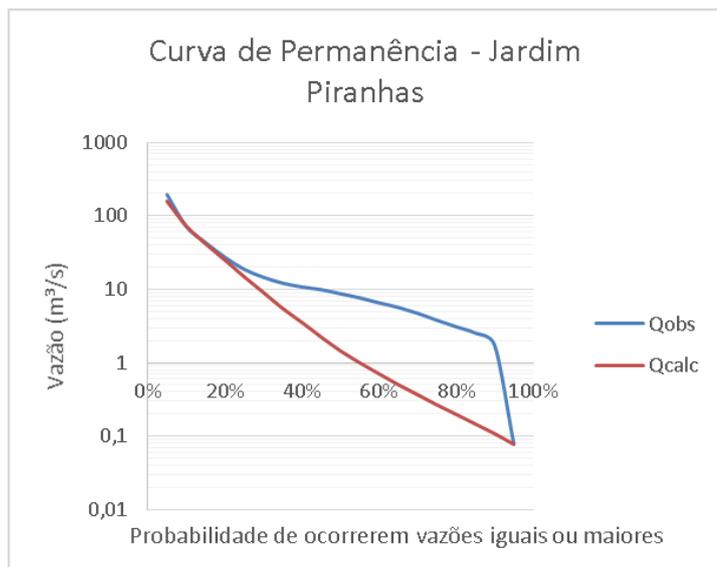


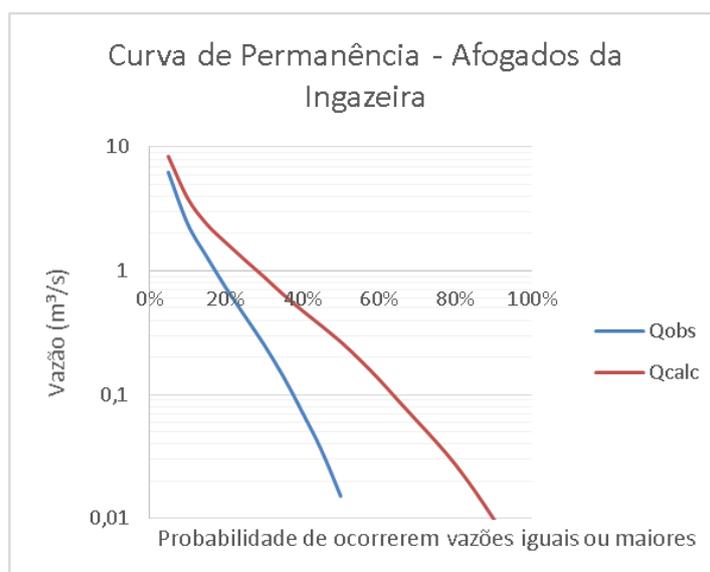
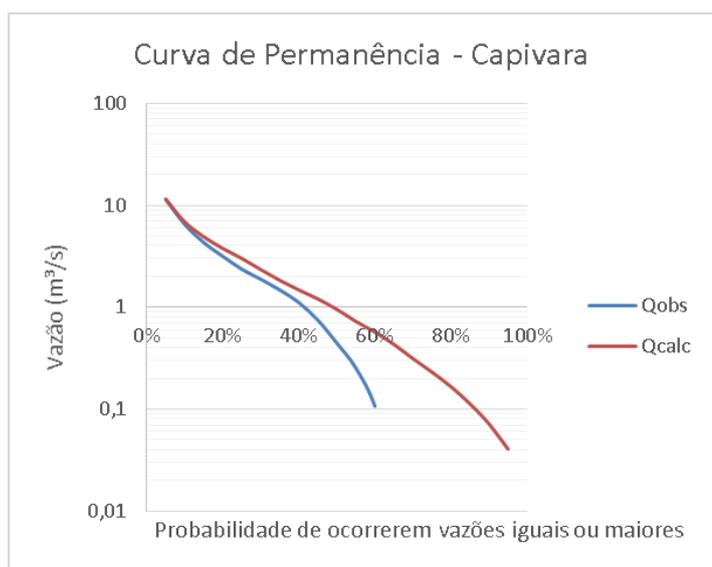
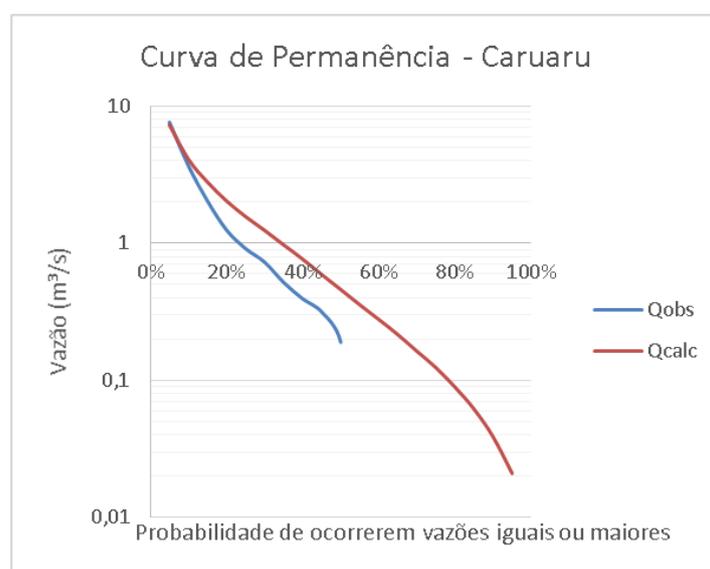
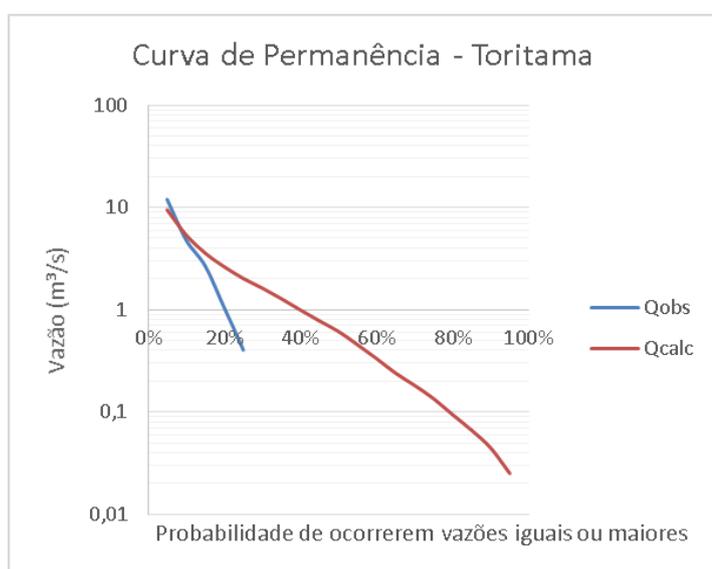
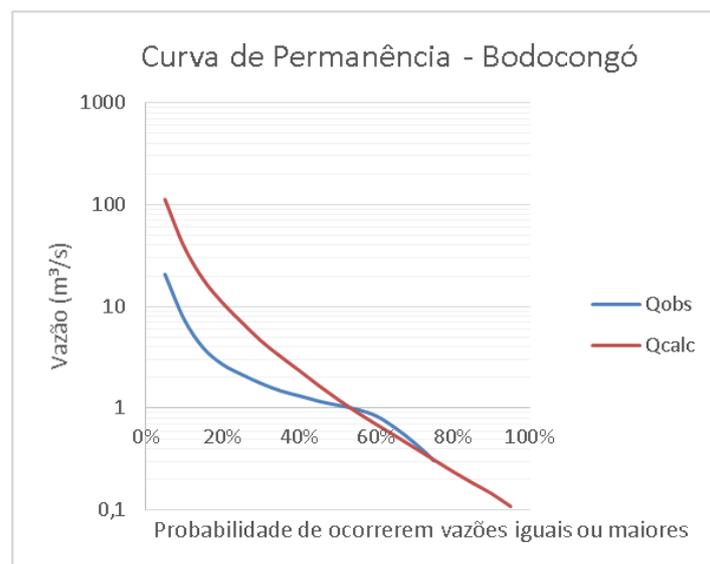
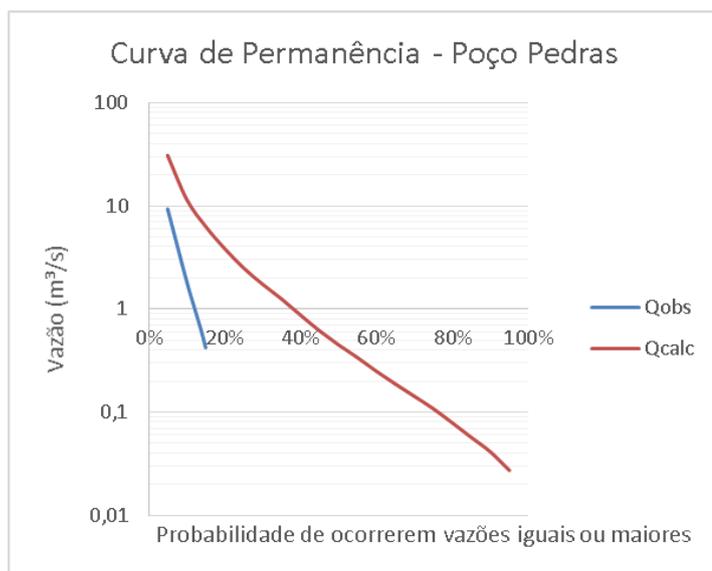


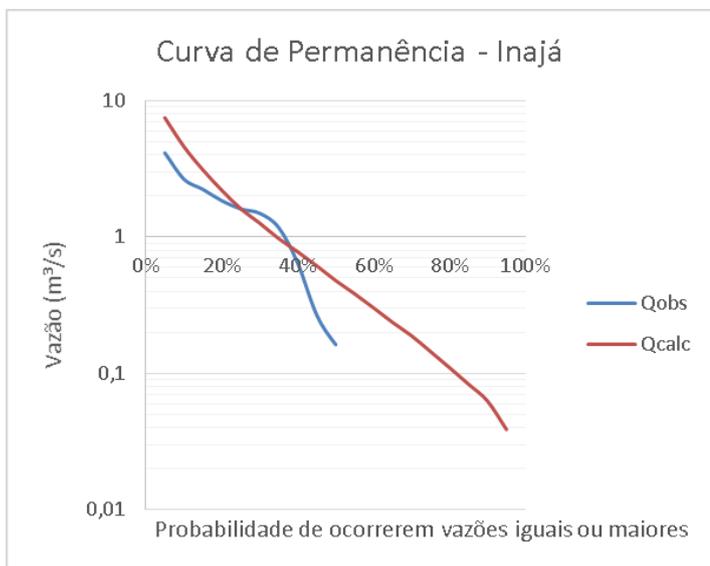
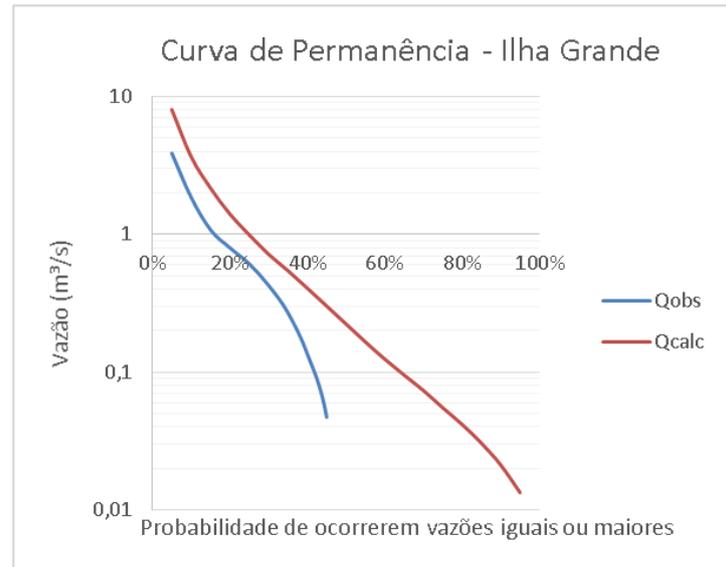
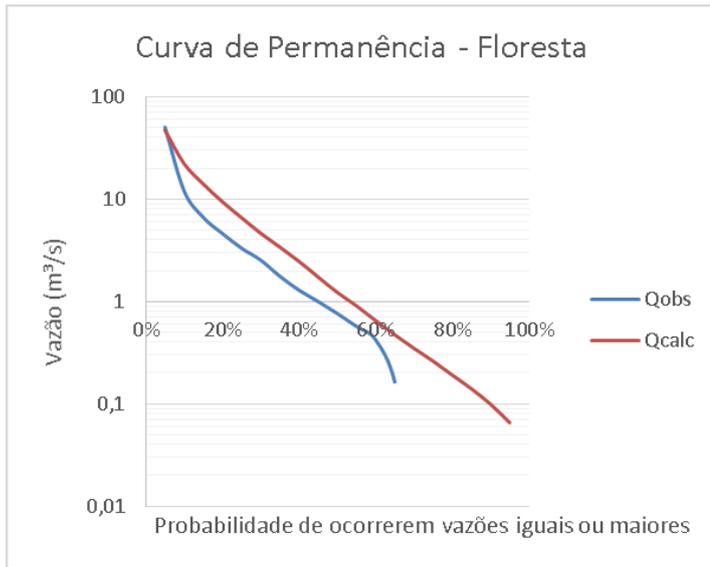












**ANEXO A – ALGORITMO MATRIZ\_ACCESS\_INPUT.PY**

```
import time
import pyodbc
import pandas as pd
import datetime
from datetime import date
import calendar

ini = time.time()

diretorio_resultados = input("Insira o caminho da pasta em que o código está
inserido: (Ex: diretorio_resultados = 'C:/Programasteste/':"")
caminhoestacoes = input("Insira o nome do arquivo que contém as estações com
sua terminação (ex: estacoes.csv):")
estacoes = pd.read_csv(caminhoestacoes)
#print(estacoes)

#MS Access Database connection
caminhoaccess = input("Insira o nome do banco de dados em access com sua
terminação (Ex: BcoNordeste.mdb) :")

conn = pyodbc.connect(r'Driver={Microsoft Access Driver (*.mdb, *.accdb)};DBQ='+
diretorio_resultados + caminhoaccess)
cursor = conn.cursor()

pasta_input = input("Insira o nome da pasta que deseja extrair do banco de dados:
(Ex: Chuvas):")
#leitura da pasta que contém as chuvas no access
pasta = "SELECT * FROM Chuvas"
```

```
year_i,month_i,day_i = input("Insira a data inicial da matriz (Ex: 1968, 6, 1):").split(",")
year_f,month_f,day_f = input("Insira a data final da matriz (Ex: 2018, 1, 1):").split(",")
```

```
year_i = int(year_i)
month_i = int(month_i)
day_i = int(day_i)
year_f = int(year_f)
month_f = int(month_f)
day_f = int(day_f)
```

```
#guarda a pasta escolhida e transforma em um dataframe pandas
dataf = pd.read_sql(pasta,conn)
#print(dataf)
```

```
print("Aguarde um momento. Processando os dados.")
```

```
# matriz final Indices: datas; Colunas: códigos das estações; Valores: quantidade de
chuva
```

```
matriz_completa = pd.DataFrame()
```

```
for row in range(len(estacoes)):
```

```
    nestacao = estacoes.iloc[row,0]
    #print(nestacao)
```

```
    dadoschuvas = dataf.loc[dataf['EstacaoCodigo'] == nestacao,
'Chuva01':'Chuva31']
```

```
    #print(dadoschuvas)
```

```
    datas = dataf.loc[dataf['EstacaoCodigo'] == nestacao, 'Data']
```

```
    dados = pd.concat([datas , dadoschuvas],axis=1,sort=True)
```

```
    #print(dados)
```

```
dados['Data'] = dados['Data'].apply(lambda x: datetime.date(x.year,x.month,x.day))
#print(dados['Data'])

nLinhas = dados.shape[0] # numero de meses, um para cada linha

#print(nLinhas)

matriz = pd.DataFrame(columns=[nestacao])

#print(matriz)

# para cada mês é selecionado o registro de chuva para cada dia
for indice in range(nLinhas):

    day = dados.values[indice][0].day
    month = dados.values[indice][0].month
    year = dados.values[indice][0].year
    # monthsize quantidade de dias do mês selecionado
    weekday, monthsize = calendar.monthrange(year, month)

    for dia in range(day, monthsize + 1):
        data = date(year, month, dia)
        matriz.loc[data] = dados.iloc[indice].values[dia]

matriz.index.name = 'data'

# concatena as matrizes
matriz_completa = pd.concat([matriz_completa, matriz], axis=1, sort=True)

# dá nome para a coluna que representa o índice (no caso a coluna de datas)
matriz_completa.index.name = 'Data'

# print (matriz_completa)
```

```
# pega o primeiro valor do índice (no caso, a primeira data)
dia_inicio = matriz_completa.index[0]

# pega o último valor do índice (no caso, a última data)
dia_fim = matriz_completa.index[-1]

# pega apenas a coluna 'data' do arquivo que se deseja uniformizar e converte o tipo
para datetime
matriz_completa.index = pd.to_datetime(matriz_completa.index)

# cria um intervalo de tempo
datelist = pd.date_range(start=dia_inicio, end=dia_fim)

# transforma o datelist em um dataframe
inter_datas = pd.DataFrame(data=datelist, columns=['data'])

# uniformiza a matriz de dados (dias corridos)
matriz_completa_uni = pd.merge(inter_datas, matriz_completa, how='left',
left_on='data', right_index=True)

matriz_completa_uni.to_csv(diretorio_resultados + '/matriz_chuva_completa.csv',
index=False)
print("matriz de chuva completa salva com sucesso em", diretorio_resultados)
# transforma a coluna data em índice
matriz_completa_uni.set_index('data', inplace=True)

matriz_completa_uni.loc[date(year_i, month_i, day_i):
date(year_f, month_f, day_f)].to_csv(diretorio_resultados + '/matriz_chuva.csv')
print("matriz de chuva delimitada salva com sucesso em", diretorio_resultados)
fim = time.time()

print("Tempo de execução do código (em segundos):", fim-ini)
print("Fim.")
```

## ANEXO B – ALGORITMO MATRIZ\_ACCESS\_VAZOES.PY

```

import time
import pyodbc
import pandas as pd
import datetime
from datetime import date
import calendar

ini = time.time()

diretorio_resultados = input("Insira o caminho da pasta em que o código está
inserido: (Ex: diretorio_resultados = 'C:/Programasteste/':"
caminhoestacoes = input("Insira o nome do arquivo que contém as estações com
sua terminação (ex: estacoes.csv):")
estacoes = pd.read_csv(caminhoestacoes)
#print(estacoes)

#MS Access Database connection
caminhoaccess = input("Insira o nome do banco de dados em access com sua
terminação (Ex: BcoNordeste.mdb) :")

conn = pyodbc.connect(r'Driver={Microsoft Access Driver (*.mdb, *.accdb)};DBQ='+
diretorio_resultados + caminhoaccess)
cursor = conn.cursor()

pasta_input = input("Insira o nome da pasta que deseja extrair do banco de dados:
(Ex: Vazoes):")
#leitura da pasta que contém as chuvas no access
pasta = "SELECT * FROM Vazoes"

year_i,month_i,day_i = input("Insira a data inicial da matriz (Ex: 1968, 6, 1):").split(",")
year_f,month_f,day_f = input("Insira a data final da matriz (Ex: 2018, 1, 1):").split(",")

```

```
year_i = int(year_i)
month_i = int(month_i)
day_i = int(day_i)
year_f = int(year_f)
month_f = int(month_f)
day_f = int(day_f)

#guarda a pasta escolhida e transforma em um dataframe pandas
dataf = pd.read_sql(pasta,conn)
#print(dataf)

print("Aguarde um momento. Processando os dados.")
# matriz final Indices: datas; Colunas: códigos das estações; Valores: quantidade de
chuva
matriz_completa = pd.DataFrame()

for row in range(len(estacoes)):

    nestacao = estacoes.iloc[row,0]
    #print(nestacao)

    dadoschuvas = dataf.loc[dataf['EstacaoCodigo'] == nestacao, 'Vazao01':'Vazao31']

    #print(dadoschuvas)

    datas = dataf.loc[dataf['EstacaoCodigo'] == nestacao, 'Data']

    dados = pd.concat([datas , dadoschuvas],axis=1,sort=True)

    #print(dados)

    dados['Data'] = dados['Data'].apply(lambda x: datetime.date(x.year,x.month,x.day))
    #print(dados['Data'])
```

```
nLinhas = dados.shape[0] # numero de meses, um para cada linha

#print(nLinhas)

matriz = pd.DataFrame(columns=[nestacao])

#print(matriz)

# para cada mês é selecionado o registro de chuva para cada dia
for indice in range(nLinhas):

    day = dados.values[indice][0].day
    month = dados.values[indice][0].month
    year = dados.values[indice][0].year
    # monthsize quantidade de dias do mês selecionado
    weekday, monthsize = calendar.monthrange(year, month)

    for dia in range(day, monthsize + 1):
        data = date(year, month, dia)
        matriz.loc[data] = dados.iloc[indice].values[dia]

matriz.index.name = 'data'

# concatena as matrizes
matriz_completa = pd.concat([matriz_completa, matriz], axis=1, sort=True)

# dá nome para a coluna que representa o índice (no caso a coluna de datas)
matriz_completa.index.name = 'Data'

# print (matriz_completa)

# pega o primeiro valor do índice (no caso, a primeira data)
dia_inicio = matriz_completa.index[0]
```

```
# pega o último valor do índice (no caso, a última data)
dia_fim = matriz_completa.index[-1]

# pega apenas a coluna 'data' do arquivo que se deseja uniformizar e converte o tipo
para datetime
matriz_completa.index = pd.to_datetime(matriz_completa.index)

# cria um intervalo de tempo
datelist = pd.date_range(start=dia_inicio, end=dia_fim)

# transforma o datelist em um dataframe
inter_datas = pd.DataFrame(data=datelist, columns=['data'])

# uniformiza a matriz de dados (dias corridos)
matriz_completa_uni = pd.merge(inter_datas, matriz_completa, how='left',
left_on='data', right_index=True)

matriz_completa_uni.to_csv(diretorio_resultados + '/matriz_vazao_completa.csv',
index=False)
print("matriz de vazao completa salva com sucesso em", diretorio_resultados)
# transforma a coluna data em índice
matriz_completa_uni.set_index('data', inplace=True)

matriz_completa_uni.loc[date(year_i,month_i,day_i):
date(year_f,month_f,day_f)].to_csv(diretorio_resultados + '/matriz_vazao.csv')
print("matriz de vazao delimitada salva com sucesso em", diretorio_resultados)
fim = time.time()

print("Tempo de execução do código (em segundos):",fim-ini)
print("Fim.")
```

### ANEXO C – ALGORITMO CALCULA\_INTERVALO\_DADOS.PY

```

import math
import pandas as pd
from datetime import date
import datetime
import calendar
import os
from scipy.spatial.distance import squareform, pdist

#nome do arquivo que contem a matriz de chuva que se deseja preencher
nome_arquivo = "matriz_chuva_completa.csv"
# diretorio onde a matriz do item anterior está salva
diretorio_entradas =
'C:\\Users\\User\\Desktop\\Geoprocessamento\\DISSERTACAO\\Thiessen_e_Chuva
Media\\3708400_govDix\\Tratamento_Dados2\\Dados'
# diretorio para salvar a matriz preenchida
diretorio_resultados =
'C:\\Users\\User\\Desktop\\Geoprocessamento\\DISSERTACAO\\Thiessen_e_Chuva
Media\\3708400_govDix\\Tratamento_Dados2\\Dados'

dados = pd.read_csv(diretorio_entradas+'/' + nome_arquivo, delimiter=',', decimal='.')
#dados = dados.sort_values(by='data', ascending=True)

#print(dados)
print("\nSTART -> ', pd.to_datetime(dados.iloc[0]['data'], format='%Y-%m-%d',
errors='ignore'))
dates_quant = 0
for i in range(dados.shape[0]-1):
    dates_quant += 1
    actual_date = pd.to_datetime(dados.iloc[i]['data'], format='%Y-%m-%d',
errors='ignore')
    predict_date = actual_date + datetime.timedelta(days=1)

```

```
next_date = pd.to_datetime(dados.iloc[i+1]['data'], format='%Y-%m-%d',
errors='ignore')

if(predict_date != next_date):
    print('END -> ', actual_date, 'Dias : ', dates_quant)
    print('\nSTART -> ', next_date)
    dates_quant = 0

print('END -> ', pd.to_datetime(dados.iloc[dados.shape[0]-1]['data'], format='%Y-%m-%d', errors='ignore'))

#print(i, ' : ', actual_date, ' : ', predict_date, ' : ', (predict_date == next_date))
```

**ANEXO D – ALGORITMO UNIFORMIZAR\_SERIE.PY**

```
import pandas as pd
from datetime import date
import calendar
import os, fnmatch

# diretorio com os arquivos CSV das estações (resultados)
diretorio_estacoes =
'C:\\Users\\User\\Desktop\\AULA\\aula_16_e_17_setembro\\Tratamento_Dados\\Dad
os'
# diretorio para salvar a matriz gerada (resultados)
diretorio_resultados =
'C:\\Users\\User\\Desktop\\AULA\\aula_16_e_17_setembro\\Tratamento_Dados\\Dad
os'
#nome do arquivo que se deseja uniformizar
arquivo = 'matriz_chuva_completa.csv'

dado_ant = pd.read_csv(diretorio_estacoes+'/'+arquivo)

#pega apenas a coluna 'data' do arquivo que se deseja univormizar e converte o tipo
para datetime
dado_ant['data']= pd.to_datetime(dado_ant.iloc[ :,0], format='%Y-%m-%d',
errors='ignore')

#cria um intervalo de tempo (intervalo de tempo que se deseja uniformizar) obs:
formato da data mês/dia/ano
datelist = pd.date_range(start = '1/1/1933', end = '1/31/1989')

inter_datas = pd.DataFrame(data = datelist, columns = ['data'])
```

```
#print (inter_dadas)
```

```
matriz_completa_uni = pd.merge(inter_dadas,dado_ant, how = 'left')
```

```
print (matriz_completa_uni)
```

```
matriz_completa_uni.to_csv('matriz_completa_uni.csv',index= False)
```

**ANEXO E- CHUVA\_MEDIA.PY**

```
import math
import numpy as np
import pandas as pd
import os

#nome do arquivo que contem os dados de chuva
arquivo_chuvas = "matriz_chuva_completa.csv"
#nome do arquivo que contém as areas
arquivo_areas = "area.csv"
# diretorio onde os arquivos de chuva e matriz estão salvos
diretorio_entradas =
'C:\\Users\\User\\Desktop\\Geoprocessamento\\DISSERTACAO\\Thiessen_e_Chuva
Media\\3708400_govDix\\Chuva_Media3\\dados'
# diretorio para salvar a chuva media
diretorio_resultados =
'C:\\Users\\User\\Desktop\\Geoprocessamento\\DISSERTACAO\\Thiessen_e_Chuva
Media\\3708400_govDix\\Chuva_Media3\\resultados'

dados_chuvas = pd.read_csv(diretorio_entradas+'/'+arquivo_chuvas, delimiter=';',
decimal=',')
dados_areas = pd.read_csv(diretorio_entradas+'/'+arquivo_areas, delimiter=';',
decimal=',')
chuvas_areas = dados_chuvas

#alterar o nome da primeira coluna
chuvas_areas.columns.values[0] = 'Data'
#definindo a coluna data como índice
chuvas_areas.set_index('Data', inplace=True)

print(chuvas_areas)
```

```

print(range(chuvas_areas.shape[0]))
print(range(dados_areas.shape[0]))

dados_areas = dados_areas[ ['Codigo','Area'] ]
chuvas_areas['chuva_media'] = " "
print(chuvas_areas)
for i in range(chuvas_areas.shape[0]):
    area_total = 0.0
    chuva = 0.0
    print(i)
    for j in range(dados_areas.shape[0]):
        #codigo = str(int(dados_areas.iloc[j]['Codigo']))
        if np.isnan(chuvas_areas.iloc[i,j]) == True:
            pass
        else:
            area = float(dados_areas.iloc[j]['Area'])
            area_total += area
            #print(codigo, area)
            chuva += chuvas_areas.iloc[i,j] * area

    if area_total == 0.0:
        area_total=1.0
    chuvas_areas.iloc[i,dados_areas.shape[0]] = chuva/area_total
"""for i in range(chuvas_areas.shape[0]):
    area_total = 0.0
    chuva = 0.0
    print(i)
    for j in range(dados_areas.shape[0]):
        #codigo = str(int(dados_areas.iloc[j]['Codigo']))
        if np.isnan(chuvas_areas.iloc[i,j]) == True:
            pass
        else:
            area = float(dados_areas.iloc[j]['Area'])

```

```

        area_total += area
        #print(codigo, area)
        chuva += chuvas_areas.iloc[i,j] * area

print(area_total)
if area_total == 0.0:
    area_total=1.0
chuvas_areas.iloc[i,dados_areas.shape[0]] = chuva/area_total'''

'''for i in range(dados_areas.shape[0]):
    codigo = str(int(dados_areas.iloc[i]['Codigo']))
    if np.isnan(chuvas_areas.loc[:,codigo]) == True:
        pass
    else:
        area = float(dados_areas.iloc[i]['Area'])
        area_total += area
        print(codigo, area)
        chuvas_areas.loc[:,codigo] *= area'''

#print("Area Total: ", area_total)

#chuvas_areas.loc[:, 'chuva_media'] /= area_total

#print(chuvas_areas)

chuvas_areas.to_csv(diretorio_resultados+'precipitacao_media2.csv', decimal=',',
index=True)

```