



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

CAIO SOARES ROSA

**OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DOS
MUNICÍPIOS DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DOS SERTÕES DE CRATEÚS**

CRATEÚS

2019

CAIO SOARES ROSA

OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DOS
MUNICÍPIOS DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DOS SERTÕES DE CRATEÚS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alan Michell Barros
Alexandre.

CRATEÚS - CE

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- R694o Rosa, Caio Soares.
Operação de reservatórios do sistema de abastecimento dos municípios da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús / Caio Soares Rosa. – 2019.
99 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre.
1. Modelagem hidrológica. 2. Abastecimento humano. 3. SMAP. 4. LabSid AcquaNet. I. Título.
CDD 620
-

CAIO SOARES ROSA

OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DOS
MUNICÍPIOS DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DOS SERTÕES DE CRATEÚS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Civil.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Ms. Tatiane Lima Batista
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Ms. Janine Brandão de Farias Mesquita
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me guiado mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, Maria Luzineide e Manoel Valneir, que sempre me deram todo suporte em minhas escolhas.

A minha irmã, Alana Rosa (*in memoriam*), que sempre foi uma fonte de inspiração, me fazendo sempre querer me superar.

Aos meus familiares, que sempre acreditaram no meu potencial.

Aos meus amigos, os quais sempre estiveram dispostos a ajudar, independente do momento e que sem os mesmos essa fase não seria tão engrandecedora.

Ao meu orientador, professor Alan Michell, pelas inúmeras horas de boas conversas e orientações.

RESUMO

A luta contra a escassez de recurso hídrico é constante na realidade do semiárido do Nordeste brasileiro. Tendo em vista isso, houve a construção de diversos reservatórios nos mais diversos locais com a finalidade de reter esse recurso para o uso posterior nos períodos de estiagem. Para que esse recurso seja distribuído da forma mais eficiente para o sistema, é necessário que sejam feitos estudos acerca da alocação e operação dos reservatórios que o compõem. Neste trabalho o enfoque ocorreu na operação visando a avaliação do sistema quanto ao uso para abastecimento humano, sendo feita a avaliação para os cenários de demandas atuais e futuras para os municípios. O estudo foi localizado nos Sertões de Crateús, com os reservatórios de abastecimento humano dos municípios, totalizando sete reservatórios no estudo para quatro municípios. A metodologia utilizada foi subdividida em duas etapas, a primeira foi o cálculo das vazões pseudo-históricas afluentes aos reservatórios, utilizando a metodologia de transformação de chuva – vazão por meio do SMAP, a segunda etapa, consistiu na operação dos reservatórios utilizando o sistema de suporte a decisão LabSid AcquaNet, onde foram avaliados os comportamentos dos reservatórios e dos possíveis desabastecimentos para a região. Os resultados obtidos para a calibração do modelo chuva – vazão demonstraram grande ajuste na captação da variação histórica de vazões, gerando vazões afluentes pseudo-históricas aos reservatórios que se mostraram representativas quando avaliadas em conjunto com a evolução volumétrica dos reservatórios. Para os resultados da operação dos reservatórios foi possível avaliar e compreender o comportamento dos mesmos, demonstrando as fragilidades do sistema e intermitências para as demandas.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica. Abastecimento humano. SMAP. LabSid AcquaNet.

ABSTRACT

The fight against the scarcity of water resources is constant in the reality of the semi-arid northeast of Brazil, in view of this, there was the creation of several reservoirs in the most diverse places in order to retain this resource for later use in the periods of drought. In order for this resource to be distributed in the most efficient way to the system, studies must be done about the allocation and operation of the reservoirs that compose it. In this work, the focus occurred in the operation aimed at evaluating the system regarding the use for human supply, and the evaluation for the scenarios of current and future demands for the municipalities was made. The study was located in the Sertões de Crateús, with the human supply reservoirs of the municipalities, totaling seven reservoirs in the study for four municipalities. The methodology used was subdivided into two stages, the first was the calculation of pseudo-historical flows affluent to reservoirs, using the rain – flow processing methodology through SMAP, the second stage, consisted of the operation of the reservoirs using the decision support system LabSid AcquaNet, where the behaviors of reservoirs and possible shortages for the region were evaluated. The results obtained for the calibration of the rain - flow model demonstrated great adjustment in the capture of historical variation of flows, generating pseudohistoric affluent flows to reservoirs that were representative when evaluated together volumetric evolution of reservoirs. For the results of the operation of the reservoirs it was possible to evaluate and understand their behavior, demonstrating the weaknesses of the system and bursts for the demands.

Keywords: Hydrological modeling. Human supply. SMAP. LabSid AcquaNet.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Representação esquemática do modelo SMAP mensal. | 23 |
| Figura 2 - Sertões de Crateús..... | 25 |
| Figura 3 - Altitudes da região dos Sertões de Crateús. | 27 |
| Figura 4 - Região Hidrológica dos Sertões de Crateús..... | 29 |
| Figura 5 - Bacia do Açude Carnaubal..... | 31 |
| Figura 6 - Bacia da Barragem do Batalhão. | 33 |
| Figura 7 - Bacia do Açude Flor do Campo..... | 36 |
| Figura 8 - Bacia do Açude Jaburu II..... | 38 |
| Figura 9 - Bacia do Açude Barra Velha. | 41 |
| Figura 10 - Bacia do Açude Cupim. | 42 |
| Figura 11 - Bacia do Açude Colina..... | 44 |
| Figura 12 - Fluxograma de atividades. | 48 |
| Figura 13 - Disposição espacial das estações em estudo..... | 52 |
| Figura 14 - Thiessen para a bacia da estação fluviométrica. | 54 |
| Figura 15 - Bacias incrementais dos reservatórios. | 55 |
| Figura 16 - Modelo esquemático do sistema de reservatórios dos Sertões de Crateús. | 58 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 - Evolução do volume armazenado do açude Carnaubal. | 30 |
| Gráfico 2 - CAV do Açude Carnaubal. | 32 |
| Gráfico 3 - CAV da Barragem do Batalhão. | 34 |
| Gráfico 4 - Evolução do volume armazenado na Barragem do Batalhão. | 34 |
| Gráfico 5 - CAV Açude Flor do Campo. | 35 |
| Gráfico 6 - Evolução do volume armazenado no Açude Flor do Campo. | 37 |
| Gráfico 7 - Evolução do volume armazenado no Açude Jaburu II. | 39 |
| Gráfico 8 - CAV Açude Jaburu II. | 39 |
| Gráfico 9 - Evolução do volume armazenado no Açude Barra Velha. | 40 |
| Gráfico 10 - CAV Açude Barra Velha. | 40 |
| Gráfico 11 - Evolução do volume armazenado no Açude Cupim. | 43 |
| Gráfico 12 - CAV Açude Cupim. | 43 |
| Gráfico 13 - Evolução do volume armazenado no Açude Colina. | 45 |
| Gráfico 14 - CAV do Açude Colina. | 45 |
| Gráfico 15 - Precipitação média anual para a Região Hidrológica dos Sertões de Crateús. | 46 |
| Gráfico 16 - Evaporação para a Região Hidrológica dos Sertões de Crateús. | 46 |
| Gráfico 17 - Evapotranspiração potencial para estações em estudo. | 47 |
| Gráfico 18 - Resposta da calibração do modelo chuva-vazão. | 61 |
| Gráfico 19 - Resultados estatísticos das vazões calculadas. | 62 |
| Gráfico 20 - Resultados estatísticos para as vazões afluentes calculadas para o Açude Carnaubal. | 63 |
| Gráfico 21 - Série pseudo-histórica de vazão para o Açude Carnaubal. | 63 |
| Gráfico 22 - Resultados estatísticos para as vazões afluentes calculadas para a Barragem do Batalhão. | 64 |
| Gráfico 23 - Série pseudo-histórica de vazão para a Barragem do Batalhão. | 64 |
| Gráfico 24 - Série pseudo-histórica de vazão para o Açude Flor do Campo. | 65 |
| Gráfico 25 - Resultados estatísticos para as vazões afluentes calculadas para o Açude Flor do Campo. | 66 |
| Gráfico 26 - Série pseudo-histórica de vazões para o Açude Jaburu II. | 66 |
| Gráfico 27 - Resultados estatísticos para as vazões afluentes calculadas para o Açude Jaburu II. | 67 |
| Gráfico 28 - Série pseudo-histórica de vazão para o Açude Barra Velha. | 67 |

| | |
|---|----|
| Gráfico 29 - Resultados estatísticos para as vazões afluentes calculadas para o Açude Barra Velha. | 68 |
| Gráfico 30 - Série pseudo-histórica de vazão para o Açude Cupim. | 69 |
| Gráfico 31 - Resultados estatísticos para as vazões afluentes calculadas para o Açude Cupim. | 69 |
| Gráfico 32 - Resultados estatísticos para as vazões afluentes calculadas para o Açude Colina. | 70 |
| Gráfico 33 - Série pseudo-histórica de vazão para o Açude Colina. | 70 |
| Gráfico 34 - Evolução do volume do Açude Carnaubal com abastecimento único. | 72 |
| Gráfico 35 - Evolução do volume do Açude Carnaubal com abastecimento compartilhado. ... | 75 |
| Gráfico 36 - Evolução do volume da Barragem do Batalhão com abastecimento único. | 77 |
| Gráfico 37 - Evolução do volume da Barragem do Batalhão com abastecimento compartilhado. | 80 |
| Gráfico 38 - Evolução do volume do Açude Flor do Campo. | 82 |
| Gráfico 39 - Evolução do volume do Açude Jaburu II. | 85 |
| Gráfico 40 - Evolução do volume do Açude Barra Velha. | 87 |
| Gráfico 41 - Evolução do volume do Açude Cupim. | 89 |
| Gráfico 42 - Evolução do volume do Açude Colina. | 92 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - População dos municípios dos Sertões de Crateús. | 26 |
| Tabela 2 - Capacidade dos reservatórios dos Sertões de Crateús. | 28 |
| Tabela 3 - Estações utilizadas. | 49 |
| Tabela 4 - Evapotranspiração para estações em milímetros. | 53 |
| Tabela 5 - Projeção da população. | 58 |
| Tabela 6 - Demandas de água em m ³ /s por município. | 58 |
| Tabela 7 - Parâmetros calibrados para estação fluviométrica 34750000. | 60 |
| Tabela 8 - Resultado para funções-objetivos. | 61 |
| Tabela 9 - Intervalos para níveis dos reservatórios. | 71 |
| Tabela 10 - Frequência de volume por nível do Açude Carnaubal para abastecimento único. | 73 |
| Tabela 11 - Tempo para recuperação do volume para Açude Carnaubal com abastecimento único. | 73 |
| Tabela 12 - Frequência de transição entre níveis para o Açude Carnaubal com abastecimento único. | 74 |
| Tabela 13 - Frequência de volume por nível para o Açude Carnaubal com abastecimento compartilhado. | 76 |
| Tabela 14 - Meses para recuperação do volume para Açude Carnaubal com abastecimento compartilhado. | 76 |
| Tabela 15 - Frequência em porcentagem de transição entre níveis para o Açude Carnaubal com abastecimento compartilhado. | 76 |
| Tabela 16 - Frequência de volume por nível da Barragem do Batalhão para abastecimento único. | 78 |
| Tabela 17 - Tempo para recuperação do volume para a Barragem do Batalhão com abastecimento único. | 78 |
| Tabela 18 - Frequência de transição entre níveis para a Barragem do Batalhão com abastecimento único. | 79 |
| Tabela 19 - Frequência de volume por nível da Barragem do Batalhão para abastecimento compartilhado. | 80 |
| Tabela 20 - Tempo para recuperação do volume para a Barragem do Batalhão com abastecimento compartilhado. | 80 |
| Tabela 21 - Frequência de transição entre níveis para a Barragem do Batalhão com | |

| | |
|---|----|
| abastecimento compartilhado. | 81 |
| Tabela 22 - Desabastecimento para o município de Crateús. | 82 |
| Tabela 23 - Frequência de volume por nível do Açude Flor do Campo. | 83 |
| Tabela 24 - Tempo para recuperação do volume do Açude Flor do Campo. | 83 |
| Tabela 25 - Frequência de transição entre níveis do Açude Flor do Campo. | 84 |
| Tabela 26 - Desabastecimento para o município de Novo Oriente. | 84 |
| Tabela 27 - Frequência de volume por nível do Açude Jaburu II. | 86 |
| Tabela 28 - Tempo para recuperação do volume do Açude Jaburu II. | 86 |
| Tabela 29 - Frequência de transição entre níveis do Jaburu II. | 86 |
| Tabela 30 - Frequência de volume por nível do Açude Barra Velha. | 88 |
| Tabela 31 - Tempo para recuperação do volume do Açude Barra Velha. | 88 |
| Tabela 32 - Frequência de transição entre níveis do Açude Barra Velha. | 88 |
| Tabela 33 - Frequência de volume por nível do Açude Cupim. | 90 |
| Tabela 34 - Tempo para recuperação do volume para Açude Cupim. | 90 |
| Tabela 35 - Frequência de transição entre níveis para o Açude Cupim. | 90 |
| Tabela 36 - Desabastecimento para o município de Independência. | 91 |
| Tabela 37 - Frequência de volume por nível do Açude Colina. | 93 |
| Tabela 38 - Tempo para recuperação do volume do Açude Colina. | 93 |
| Tabela 39 - Frequência de transição entre níveis do Açude Colina. | 93 |
| Tabela 40 - Desabastecimento para o município de Quiterianópolis. | 94 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 Contextualização..... | 13 |
| 1.2 Justificativa | 15 |
| 1.3 Delimitação..... | 15 |
| 1.4 Objetivos..... | 16 |
| 1.5 Roteiro Temático..... | 16 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 17 |
| 2.1 Alocação de Água..... | 17 |
| 2.2 Operação de Reservatórios | 18 |
| 2.3 Labsid Acquanet 2013 | 20 |
| 2.4 Modelo Chuva – Vazão: <i>Soil Moisture Accounting Procedure</i> (SMAP)..... | 22 |
| 3 ÁREA DE ESTUDO | 25 |
| 3.1 Caracterização Geográfica | 25 |
| 3.2 Caracterização dos Reservatórios Artificiais da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús..... | 27 |
| 3.2.1 Açude Carnaubal | 29 |
| 3.2.2 Barragem Batalhão | 32 |
| 3.2.3 Açude Flor do Campo..... | 35 |
| 3.2.4 Açude Jaburu II..... | 37 |
| 3.2.5 Açude Barra Velha..... | 39 |
| 3.2.6 Açude Cupim..... | 41 |
| 3.2.7 Açude Colina | 43 |
| 3.3 Caracterização Climática da Região..... | 46 |
| 4 METODOLOGIA..... | 48 |
| 4.1 Levantamento de Dados..... | 49 |
| 4.1.1 Dados Climáticos | 49 |

| | |
|---|-----------|
| 4.1.2 Dados Fluviométricos | 51 |
| 4.1.3 Dados dos Reservatórios | 51 |
| 4.2 Modelagem do Sistema Chuva – Vazão (SMAP) | 53 |
| 4.2.1 Séries de Precipitação por Bacia | 53 |
| 4.2.2 Séries de Evapotranspiração por Bacia..... | 53 |
| 4.2.3 Calibração dos Parâmetros para Estação Fluviométrica | 55 |
| 4.2.4 Criação de Série Sintética para Reservatórios..... | 57 |
| 4.3 Modelagem do Sistema de Reservatórios | 57 |
| 4.3.1 Reservatórios..... | 57 |
| 4.3.2 Demandas | 57 |
| 4.3.3 Simulações | 58 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 60 |
| 5.1 Modelo Chuva-Vazão | 60 |
| 5.1.1 Calibração da Estação Fluviométrica..... | 60 |
| 5.1.2 Cálculo das Séries Pseudo-Históricas | 62 |
| 5.2 Operação de Reservatórios | 71 |
| 5.2.1 Crateús..... | 71 |
| 5.2.2 Novo Oriente | 82 |
| 5.2.3 Independência | 85 |
| 5.2.4 Quiterianópolis | 91 |
| 6 CONCLUSÃO..... | 95 |
| REFERÊNCIAS | 97 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A região Nordeste Brasileira (NEB), que possui em seu território uma área total de 1.542 mil km² e uma população estimada de aproximadamente 57 milhões de habitantes IBGE (2019), possui uma elevada vulnerabilidade em seus recursos hídricos. Na última década, o NEB passou por uma seca de grandes proporções entre os anos de 2011 e 2017, deixando graves marcas na população regional, agricultura e comércio.

O estado do Ceará, assim como outros estados nordestinos, possui um conjunto de características que juntas tornam a situação de caráter preocupante. Com áreas do estado exibindo marcas nítidas de desertificação, como é o caso dos sertões dos Inhamuns e do médio Jaguaribe, (CEARÁ, 2015).

Além de seu solo em grande parte constituído de maciço cristalino, sendo este encontrado a uma pequena profundidade, não possibilitando a existência de aquíferos na região e elevadas temperaturas, que podem chegar a valores entre 33 e 35 graus e condições climáticas que acarretam em uma sazonalidade do período chuvoso, tendo precipitações que podem variar de 125 à 300 mm nos meses de janeiro à abril e de 0 à 25 mm entre os meses de junho à novembro, marcando de forma clara a quadra chuvosa da região cearense e demonstrando assim a grande discrepância de precipitação ao longo dos meses do ano (INMET, 2019).

Apesar de um regime pluviométrico considerado constante, tendo, portanto, uma elevada probabilidade de as chuvas seguirem um mesmo padrão, ao serem observadas séries históricas para as precipitações, é possível notar também a existência dessa variação ao longo dos anos, intercalando períodos de maiores precipitações com períodos menores.

Assim como grande parte do NEB, o Ceará, tem um regime pluviométrico que varia entre 500 e 850 mm/ano em sua região semiárida e de 1000 à 1700 mm/ano nas regiões serranas e de praia. No entanto, a alta evaporação que chega a 2700mm/ano na região semiárida e 1500mm/ano nas regiões serranas e de praias, combinada com a inconstância das chuvas faz com que o déficit do sistema seja justificado (CEARÁ, 2015).

Por possuir em seu território, grande parte dos rios com caráter intermitente, devido ao tipo de solo presente que impossibilita um escoamento de base suficiente para perenizar os rios existentes, a utilização de reservatórios superficiais artificiais se tornou a forma mais comum de acúmulo de grandes volumes de água no estado. Dessa forma, tornaram-se transportadores de água no tempo devido a essa característica.

Tendo em vista essa situação, a necessidade de criação de reservatórios artificiais culminou na política de açudagem estadual. Segundo SGEE (2016) em 1886 começou a construção do açude Cedro, tendo a sua conclusão no ano 1906 e sendo o primeiro de uma série de reservatórios construídos para o combate da seca, tendo o número de reservatórios ampliado a cada novo ciclo de seca. Essas obras foram as principais ações governamentais, efetuadas pela Inspeção Federal de Obras Contra a Seca (IFOCS), até em 1945 o órgão se transformar no atual Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS). Até o ano de 1988 foram construídas 72 barragens no estado cearense. Os de reservatórios privados, sendo estes normalmente de pequeno porte, possuem características intra-anual, são em sua maioria capazes de transportar água suficiente apenas para abastecer os períodos de seca, cobrindo, portanto, apenas a sazonalidade dentro do ano e sendo utilizados em sua maioria para irrigações e dessedentação animal. Os reservatórios estratégicos, que possuem uma capacidade de armazenamento suficiente para suprir a variabilidade interanual, são os utilizados para o abastecimento das cidades, sendo capazes de suportar períodos maiores de seca ao longo dos anos.

Na região hidrográfica dos sertões de Crateús, que conta com um total de quatro municípios, Crateús, Independência, Novo Oriente e Quiterianópolis, com uma população estimada de 146 mil habitantes e uma área aproximada de 3 mil km² de acordo com IPECE (2017), o cenário não é diferente. Apesar de possuir rios de grande importância para a região cortando os municípios, a qualidade e o curto período do ano em que esses rios possuem água faz com que seja necessário a utilização de reservatórios. Para o abastecimento da cidade de Crateús é utilizado um sistema com dois reservatórios, Batalhão e Carnaubal, sendo o açude Carnaubal o principal responsável pelo abastecimento. A cidade de Independência conta com um total de três açudes, sendo estes Barra Velha, Cupim e Jaburu II, seguindo respectivamente essa ordem de prioridade para o abastecimento da cidade. Os municípios de Novo Oriente e Quiterianópolis possuem apenas um reservatório cada, Flor do Campo e Colina, respectivamente.

Para a região, a seca foi ainda mais severa do que para os demais locais do estado. O sistema de abastecimento que em 2009 contava com 99,63% da sua capacidade de armazenagem, reduziu para apenas 0,61% no ano de 2015, segundo Ceará (2015), tendo este como o ponto crítico para a região. Neste ponto, a necessidade de busca por uma solução que garantisse o abastecimento foi imprescindível, culminando na transposição de água por meio de adutoras.

1.2 Justificativa

Os municípios da região hidrológica dos sertões de Crateús passaram por um longo período de estiagem, tendo vivenciado uma grande redução no volume de seus reservatórios. O sistema que contava com 55% da capacidade total em 2010, no ano de 2015 possuía apenas 2,25%. Dentre os municípios, Crateús, por possuir a maior população entre os demais, foi o que mais sofreu com o período.

O município de Crateús passou por um longo período de estiagem. Nesse período os reservatórios de abastecimento do município, Batalhão e Carnaubal, que segundo os dados disponíveis da COGERH possuem respectivamente 1,64 hm³ e 73,20 hm³, sofreram com a falta de aporte hídrico, resultando no colapso do sistema e em uma severa crise de abastecimento.

Com isso, a solução emergencial encontrada foi a busca por água em outras regiões. Em um primeiro momento, essa água veio do reservatório Flor do Campo, localizado no município de Novo Oriente, com capacidade de 105 hm³ e a 38 km do açude Carnaubal. Essa primeira transposição foi feita diretamente pelo leito do rio Poti.

Entretanto, esta solução mostrou-se ineficiente. Devido ao longo período de estiagem, o leito do rio encontrava-se totalmente seco, o que tornou as perdas por infiltração no solo elevadas, fazendo com que o volume que entrou efetivamente no Carnaubal fosse muito inferior ao volume necessário para o funcionamento ideal do sistema, resultando em uma nova necessidade de busca por fonte de abastecimento.

A nova fonte foi encontrada no açude Araras, reservatório localizado no município de Varjota com capacidade de 859,53 hm³ através de aproximadamente 150 km de Adutora de Montagem Rápida (AMR). A vazão advinda do açude Araras conseguiu suprir a necessidade para a regularização do sistema, apesar de antes a população ter sofrido com de falta de abastecimento e necessidade de racionamento.

Dessa forma, é possível perceber a necessidade de maiores estudos acerca do comportamento dos reservatórios, de tal forma que seja possível identificar suas fragilidades, criar um cenário com uma maior quantidade de dados disponíveis para uma melhor tomada de decisão para o sistema, controlando suas demandas, as prioridades de abastecimento ou verificando a necessidade de ampliação do sistema.

1.3 Delimitação

Este trabalho está delimitado na Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús, compreendendo os reservatórios que abastecem os municípios de Crateús, Independência,

Novo Oriente e Quiterianópolis. Sendo, portanto, os reservatórios Barra Velha, Batalhão, Carnaubal, Colina, Cupim, Flor do Campo e Jaburu II.

Para o presente estudo de operação de reservatórios, os dados coletados referentes aos reservatórios e suas demandas serão obtidos com a COGERH e as precipitações com a FUNCEME. Será utilizado o software LabSid AcquaNet 2013 focado em operações de reservatórios para efetuar as simulações e cenarios.

1.4 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal o estudo da operação dos reservatórios de abastecimento urbano da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús.

Os objetivos específicos são:

- Calibrar o SMAP para a estação fluviométrica Fazenda Boa Esperança (Código ANA – 34750000);
- Gerar as vazões pseudo-históricas afluentes para os reservatórios em estudo;
- Modelar o hidrossistema dos reservatórios de abastecimento dos municípios;
- Simular a operação do sistema existente para as demandas atuais e cenários futuros;
- Avaliar o comportamento volumétrico dos reservatórios;
- Analisar a frequência de desabastecimento municipal;

1.5 Roteiro Temático

O trabalho em questão está subdividido em cinco seções. A primeira seção é constituída da contextualização, da justificativa do tema, da delimitação espacial do estudo e de seus objetivos. A seção subsequente é composta pelo referencial teórico do estudo, apontando os pontos mais importantes para o entendimento da área de estudo e da operação de reservatórios.

Na terceira seção é exposta a metodologia necessária para o estudo, tendo os passos necessários para o seu desenvolvimento e logo em seguida, na quarta seção são apresentados os resultados obtidos. Por fim, as conclusões tiradas no presente trabalho podem ser vistas na quinta e última seção.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A presente seção irá tratar de todo o acervo teórico necessário para o entendimento deste trabalho, contendo os conteúdos necessários para a caracterização morfoclimática da região em estudo, dos seus reservatórios artificiais e da operação de reservatórios.

2.1 Alocação de Água

Segundo Roa-Garcia (2014), alocação de água refere-se as regras e procedimentos através dos quais o acesso a água, para uso individual ou coletivo, é decidido em relação a sua disponibilidade. Quando o recurso se torna escasso devido ao aumento das demandas ou a variabilidade da precipitação, as regras e procedimentos de alocação tornam-se ainda mais importantes para evitar conflitos.

Uma forma de combater os conflitos por água é utilizando dos objetivos da alocação, tal qual são apresentados no trabalho de Speed *et. al.* (2013). Esses objetivos estão divididos em cinco, os quais são mostrados abaixo:

- 1) Equidade da divisão do recurso, tendo em vista a grande quantidade de usuários aos quais devem ser abastecidos, esse recurso deve ser dividido de forma a suprir as necessidades tanto para diferentes regiões quanto para diferentes usos;
- 2) Proteção ambiental: a alocação tem como dever proteger o meio ambiente, mantendo o recurso de forma que seja possível a manutenção dos sistemas e processos naturais que dela necessitam;
- 3) Prioridades para o desenvolvimento: a alocação deve ocorrer de forma a dar suporte para o desenvolvimento local para os setores econômico e social;
- 4) Balanceamento entre as demandas e disponibilidade: por se tratar de um bem com uma recarga do recurso variável ao longo do tempo, a alocação tem como dever balancear a liberação do recurso, de forma a evitar desabastecimento nos períodos críticos para o sistema;
- 5) Uso eficiente do recurso: a alocação tem como objetivo tratar o recurso de forma a ampliar a sua eficiência. Por se tratar de um recurso natural, seu volume é finito, mas a sua necessidade é sempre crescente, tornando imprescindível o uso eficiente do recurso disponível.

Apesar de ser o primeiro objetivo demonstrado, a divisão justa na alocação não é um fenômeno simples, diversos são os usos aos quais necessitam de água e por ser um recurso

que não é limitado apenas a uma região política, esse processo de negociação pode tornar-se complexo e demorado para chegar em uma solução viável para ambos. Para o mesmo autor, esses conflitos podem ser resolvidos com a distribuição da alocação por um dos três métodos citados pelo mesmo, sendo os métodos focados na divisão do recurso com base na divisão proporcional, usos existentes ou futuros usos. A divisão proporcional é feita de tal forma que cada região receba recurso com base na quantidade de população a ser abastecida, ou de acordo com a bacia local. A divisão baseada no uso existente ocorre de forma a suprir os usos históricos ou o atual nível de produtividade, já para a divisão de acordo com os usos futuros, o principal fator é a projeção de crescimento local para a região.

Com o tempo, notou-se que não apenas o acúmulo do recurso era de fundamental importância, mas o estudo de formas de melhorar o sistema de alocação desse volume também era crucial para um sistema mais eficiente. A correta alocação de água fomenta o crescimento econômico local, como é mostrado por Speed *et. al.* (2013) e esse fator quando bem utilizado e em conjunto com todos os usuários do sistema abre espaço para um crescimento mútuo em todos os setores locais.

Conforme art. 1 da Lei nº 9.433/97, a água é um bem de domínio público e com valor econômico agregado, devido a isso, é necessário o controle do uso desse recurso por parte do governo. Esse controle é feito por meio das outorgas, apresentado no art. 11, onde é expresso que as outorgas têm como objetivo o controle quantitativo e qualitativo do uso de água, e é necessário o pedido de outorga para diversos tipos de uso, seja ele de captação em corpo d'água ou em aquífero subterrâneo, lançamento de esgoto em corpo d'água e aproveitamento dos potenciais hidrelétricos. Nos casos em que são considerados insignificantes esses usos, a outorga não é necessária.

2.2 Operação de Reservatórios

A operação de reservatórios consiste na determinação de forma ordenada do armazenamento e liberação de recurso, de forma que possa suprir cada um dos diversos usos, segundo Cid (2017). Entretanto, devido à grande dificuldade para a correta operação de reservatórios com alto grau de complexidade, a necessidade do desenvolvimento de modelos computacionais capazes de superar esses problemas ficou evidente. Já na década de 80 é tratada sobre essa necessidade no trabalho de Yakowitz (1982), com os avanços da capacidade computacional, ocorreu a possibilidade do aprimoramento dos sistemas, de forma a reproduzir a operação de sistemas com um grande número de reservatórios e usos, sem demandar maior esforço para o operador.

No entanto, apesar do avanço tecnológico existente, é necessário a escolha adequada do modelo que será utilizado na operação do reservatório. Conforme apresentado por Yeh (1985), a metodologia deve ser escolhida para cada sistema, levando em consideração as características do mesmo. Ainda pelo mesmo autor, é dito que os volumes máximos e mínimos armazenados, as dimensões das tubulações ou outros equipamentos e a equação de balanço de massa são as principais restrições dos sistemas, para atingir os seus objetivos.

Para que o sistema alcance sua meta, é necessário entender que a operação de reservatórios é uma decisão sob incertezas (BRANDÃO, 2004), tendo diversos dados como uma incerteza para o sistema. Entre essas incertezas estão as vazões afluentes aos reservatórios, que podem ser geradas de formas sintéticas. Esse modelo segue a hipótese de que os parâmetros para a criação dessas séries sintéticas se mantêm ao longo do tempo. Outra incerteza com alto impacto na operação de reservatórios é a geometria do mesmo. Esse fator é observado por meio da curva de cota – área – volume (CAV) do reservatório, entretanto, a CAV projetada para o reservatório e a real muitas vezes não são iguais, essa diferença se agrava com o passar dos anos, devido ao processo de assoreamento do reservatório.

Ao tomar um sistema de reservatórios e gerar um modelo de simulação, deve-se ter em mente que a operação utilizada segue regras de operação pré-estabelecidas pelos usuários, sendo essas regras a base do funcionamento do sistema. As prioridades dadas para a ordem de abastecimento das demandas e liberação de vazão são dois casos de regras de operação de fundamental importância para a operação consistente do sistema real.

Já os fenômenos que compõem essa simulação, são tratados com as suas devidas equações que o regem, sendo, portanto, uma equação de balanço de massa, na qual as saídas do sistema são as vazões efluentes, os volumes vertidos e a evaporação do reservatório e as entradas são as vazões afluentes. Devido a esses fatos, vê-se como uma desvantagem em sistemas complexos a necessidade da definição de regras operacionais por parte do operador. A equação de balanço de massa pode ser vista na equação 1 abaixo.

$$Vol_f = Vol_i + (V_{af} - V_{ef}) * K - Vol_{vert} - Evap * Área \quad (1)$$

Em que, Vol_f é o volume final do mês em hm^3 , situado entre o volume máximo e mínimo do reservatório, Vol_i é o volume inicial do mês em hm^3 , também situado entre o volume máximo e mínimo do reservatório, V_{af} é a vazão mensal afluente do reservatório em m^3/s , V_{ef} é a vazão mensal efluente do reservatório em m^3/s , K é a constante de transformação de vazão para volume, Vol_{vert} é o volume vertido pelo reservatório em hm^3 , essa parcela só possui valor diferente de zero quando o reservatório ultrapassa sua capacidade máxima, $Evap$ é a evaporação mensal do sistema em mm e $Área$ é a dimensão do espelho d'água no mês em questão em km^2 .

Dessa forma, para que seja possível alcançar o melhor resultado operacional, é imprescindível o uso de metodologias para otimização do sistema. A princípio eram utilizadas metodologias de tentativa e erro, causando grandes transtornos no processo. Com esse fato, o uso de recursos computacionais para otimização do sistema tornou-se indispensável, fazendo com que seja possível, de forma facilitada para o operador, atingir o modelo ótimo do sistema.

2.3 Labsid Acquanet 2013

O LabSid AcquaNet é um software desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LabSid / USP), com o intuito de ser um modelo de rede de fluxos para simulação de bacias hidrográficas. Originalmente, o software foi desenvolvido pelo LabSid sob a denominação de MODSIM, e teve seu desenvolvimento com enfoque na operação de bacias complexas por meio do balanço de massa e o algoritmo *Out-of-Kilter* para otimização (ALBANO, 2004).

O software tem como possibilidade a execução de simulações de duas formas específicas: a Simulação Contínua, que consiste em uma simulação contínua no tempo e o Planejamento Tático, que é feito de forma estatística com um horizonte máximo cinco anos. Dessa forma, o software tem a capacidade de simular desde sistemas simples com apenas um único reservatório, até sistemas de alta complexidade, como é o caso do sistema de transposição de águas do rio São Francisco, possuindo uma série de demandas a serem atendidas e reservatórios a serem operados.

O AcquaNet, por ser um sistema de suporte a decisão pode ser utilizado para diversos fins, dentre eles estão os módulos de alocação de água, que podem ser observado nos trabalhos de Aragão (2008), Feitosa (2013), Medeiros, Medeiros e Maia (2015), Cid (2017), Billerbeck (2018); o módulo de irrigação, que pode ser visto no trabalho de Carvalho *et. al.* (2008); o módulo de qualidade de água, que foi utilizado no trabalho de Chagas (2009), no trabalho de Livele (2015) é mostrado o uso dos recursos do software para análises econômicas na alocação de água. Dessa forma, é possível perceber a grande gama de trabalhos e as diversas possibilidades de usos para o LabSid AcquaNet, sendo um software capaz de simular de forma satisfatória os aspectos dos fenômenos envolvidos.

Neste trabalho, o foco será no módulo de alocação de água, onde suas principais características são apresentadas a seguir, de acordo com o apresentado no manual de usuário do software.

O software conta com dois modos de simulação, sendo eles a simulação contínua e o planejamento tático. Para a simulação contínua, o fator determinante é a duração total de anos

da simulação, de forma que o modelo possa calcular continuamente cada ano até atingir a duração total. Os valores para o primeiro ano são utilizados como valores iniciais, de forma que os anos seguintes usem os valores do ano anterior como valor inicial até atingir a quantidade de anos total da simulação. Assim, é possível observar o comportamento dos reservatórios dado uma série de vazões e demandas.

Na segunda forma, o planejamento tático, o número total de anos e o horizonte de simulação são valores cruciais, os valores iniciais fornecidos pelos usuários são utilizados para calcular até a quantidade de anos do horizonte de simulação. Em seguida, o cálculo é feito iniciando do segundo ano e assim por diante. Sendo assim, não mais existe apenas uma série única para a operação dos reservatórios, torna-se agora um conjunto de cenários igualmente possíveis, sendo possível a utilização de probabilidades para as respostas acerca do volume do reservatório ao longo dos anos e das demandas.

Para que esse processo seja possível, é necessário a introdução de uma série de dados. Para o reservatório são necessários os dados referentes a curva de cota, área e volume, os volumes máximo, mínimo e o volume inicial do reservatório, além dos valores de evaporação mensal e da vazão natural.

Para o canal, rio ou adutora responsável pelo deslocamento do recurso, são necessários os dados de capacidade máxima, mínima e de seu coeficiente de perda. No local de demanda os dados de entrada são a série de demandas ao longo do tempo e possíveis séries de vazão natural do local. Com esses dados devidamente preenchidos é possível iniciar o processo de cálculos do software.

O software possui diversas saídas de resultados, que são divididas em quatro grandes classes de resultados: os referentes aos reservatórios, as demandas, aos nós de passagem e aos links, que servem como interligações entre os reservatórios e as demandas, ou entre outros reservatórios, podendo ser atribuídas as características em casos de rios ou adutoras. Para os reservatórios é possível retirar os resultados de volumes acumulados ao longo do tempo, as vazões de entrada e saída do reservatório e o volume de água evaporado.

Nas demandas, é possível avaliar as demandas necessárias e os déficits nas mesmas, assim como as vazões de entrada e saída destes elementos. Os elementos de nós de passagem e de links é possível avaliar as vazões as quais estão passando por aqueles elementos.

Para todos os elementos descritos acima, o programa possui duas formas de representação dos resultados, sendo elas em formato de tabela e gráfico, podendo ambos serem exportados para outros softwares.

2.4 Modelo Chuva – Vazão: *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP)

Modelos de transformação de chuva em vazão são modelos que tentam modelar de forma mais real possível esse fenômeno hidrológico, entretanto, a complexa realidade desse processo faz com que sejam necessárias diversas aproximações para que seja possível a modelagem. Entretanto, essas aproximações necessárias trazem um conjunto de incertezas a essas técnicas. O trabalho de O'Donnell e Canedo (1980 apud Freitas; Porto, 1990), cita que as principais incertezas dessa metodologia são referentes aos registros hidrometeorológicos da bacia em estudo, da estrutura do modelo chuva-vazão e da calibração do modelo.

A primeira dessas incertezas está relacionada com a confiabilidade dos dados de precipitação e evapotranspiração. Por terem como forma de coleta a observação por um operador, esses erros são considerados erros de medição. Por se tratar de uma malha de pontos com seus valores extrapolados para toda a área da bacia induzem a erros principalmente nos casos de bacias com má distribuição dos pontos de medição, sendo esses os erros referentes a espacialidade dos dados. O trabalho de Xu e Vandewiele (1994) apontam os erros causados por esses fatores na inserção de dados para modelos de chuva-vazão mensal.

A segunda incerteza, trata do modelo, por se tratar de uma modelagem matemática para um fenômeno natural, é necessário a simplificação de alguns fenômenos, quando se trata da modelagem de transformação de chuva em vazão, muitos são os modelos existentes, cada um com suas próprias metodologias e aproximações, entretanto para todos os casos, o processo de infiltração e percolação no solo é ainda um processo complicado e que implica em resultados sem as aproximações esperadas, conforme expresso por Freitas e Porto (1990).

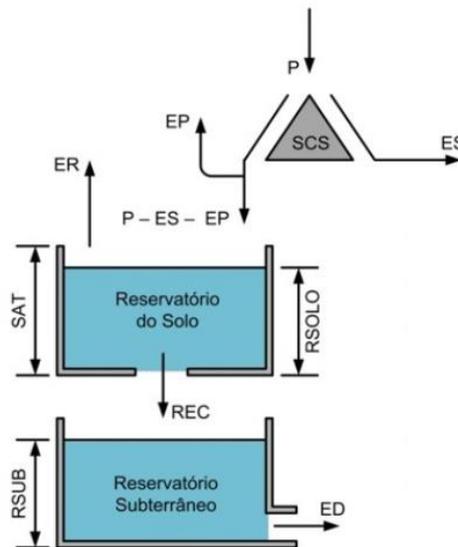
Contudo, não apenas o solo é um ponto fraco da modelagem. Para o modelo *Soil Moisture Accounting Procedure*, o SMAP, o modelo hidrológico é tratado como uma série de reservatórios, com transferências entre si, para o modelo mensal do SMAP, apenas dois reservatórios são considerados, o reservatório representando o acúmulo de água no solo e outro representando o armazenamento subterrâneo, tendo em vista que o reservatório de acúmulo superficial para o passo mensal não possui influência. O modelo SMAP apresentado por Lopes, Braga e Conejo em 1981, apresentava a representação diária do modelo, com o avanço dos estudos, as versões horárias e mensais foram introduzidas ao modelo. Segundo Estácio, Souza Filho e Rocha (2019), por ser um modelo de simples utilização, o modelo SMAP com passo mensal possui como entrada a evapotranspiração apresentada em forma de média mensal e o comportamento da bacia é considerado um comportamento único para toda a região, esses

processos que são utilizados como simplificações para que seja possível a representação matemática dos fenômenos naturais trazem incertezas para o processo, mas, não o invalidam.

A última incerteza mostrada no trabalho de O'Donnel e Canedo (1980 *apud* Freitas; Porto, 1990), é a incerteza referente a calibração do modelo. Essa incerteza é mostrada no trabalho de Estácio, Souza Filho e Rocha (2019) por ser “[...] inviável medir diretamente os parâmetros do modelo, seja pelo caráter teórico dos equacionamentos ou pela variabilidade espacial e temporal do comportamento da bacia.”.

A Figura 1 mostra o modelo esquemático do SMAP mensal. Para esta representação tem-se que $R_{solo}(i)$ é o armazenamento no reservatório do solo no mês i , $R_{sub}(i)$ é o armazenamento no reservatório subterrâneo no mês i , P é a precipitação média da bacia no mês i , E_s é o escoamento superficial direto da bacia ao longo do mês i , E_r é a evapotranspiração real na bacia ao longo do mês i , E_p é a evapotranspiração potencial na bacia ao longo do mês i , REC é a transferência entre o solo e o reservatório subterrâneo ao longo do mês i e ED é o escoamento de base da bacia ao longo do mês i . Todas as variáveis acima sendo em milímetros.

Figura 1 - Representação esquemática do modelo SMAP mensal.



Fonte: Lopes, Braga e Conejo, 1981.

Dessa forma, a atualização mensal dos reservatórios é feita de acordo com as equações 2 e 3.

$$R_{solo}(i + 1) = R_{solo}(i) + P - E_r - E_s - REC \quad (2)$$

$$R_{sub}(i + 1) = REC - ED \quad (3)$$

Para o modelo SMAP, seis são os parâmetros necessários para sua calibração, quatro parâmetros referentes as características da bacia e dois de inicialização. Têm-se que Sat é a capacidade máxima de armazenamento do solo em mm, sendo expressa pela saturação, PES é o resultado da precipitação subtraída da parcela transferida ao escoamento superficial esse parâmetro é um valor adimensional, Crec é o coeficiente de recarga do solo sendo um valor adimensional, K é a constante de recessão do reservatório subterrâneo, sendo expresso em mês⁻¹, Tuin é a taxa de umidade inicial do solo e Ebin é o escoamento de base inicial.

Sabendo R_{solo} e Sat, a taxa de umidade do solo no mês (T_u) pode ser expressa pela equação 4:

$$T_u = \frac{R_{solo}}{Sat} \quad (4)$$

Com o conhecimento da taxa de umidade obtida na equação 4, é possível calcular o valor de E_r da bacia por meio da equação 5:

$$E_r = T_u * E_p \quad (5)$$

O valor do REC, que aparece nas equações 2 e 3, é obtido por meio da equação 6:

$$REC = R_{solo} - Crec * T_u^4 \quad (6)$$

O valor de E_s pode ser calculado a partir da equação 7, com base na precipitação e na taxa de umidade:

$$E_s = P * T_u^{PES} \quad (7)$$

Para os casos em que o valor de R_{solo} é superior ao valor de Sat, o excedente é adicionado ao valor de E_s .

O escoamento de base do solo é dado conforme a equação 8:

$$E_d = R_{sub} * \left[1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{K}} \right] \quad (8)$$

A vazão efluente da bacia (Q) é obtida conforme a equação 9, onde Ad é a área da bacia em km².

$$Q = \frac{(E_d + E_s) * Ad}{2630} \quad (9)$$

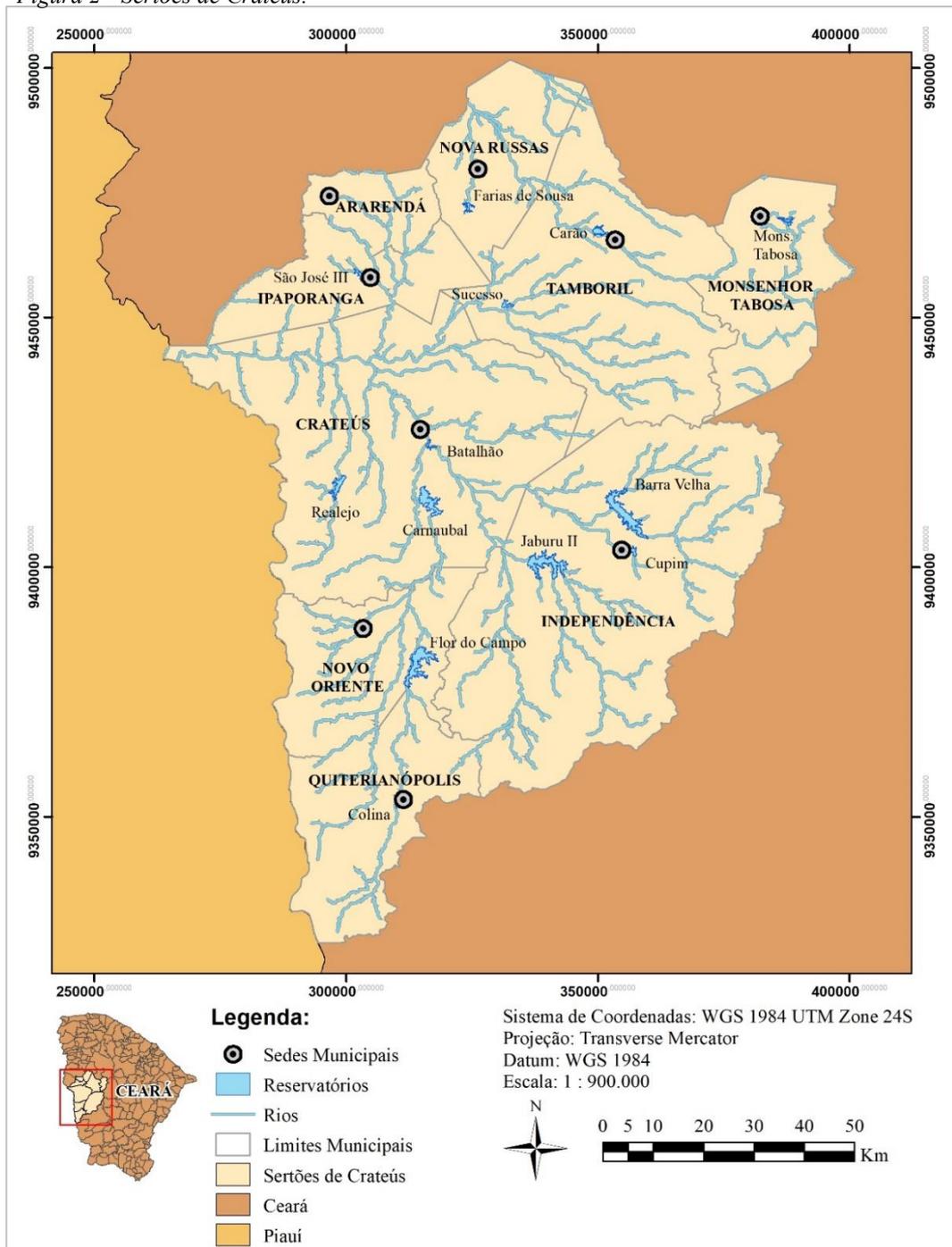
Entretanto, como é mostrado por Rocha, Souza Filho e Estácio (2019), dos quatro primeiros parâmetros, que são referentes as características da bacia, apenas dois possuem necessidade de serem calibrados, Sat e PES, os valores de Crec para as bacias do estado do Ceará possuem valor zero, esse valor está de acordo com o encontrado no trabalho de Alexandre (2005). Já para o parâmetro K, o modelo não possui sensibilidade para sua alteração.

3 ÁREA DE ESTUDO

3.1 Caracterização Geográfica

Localizada na região oeste do estado do Ceará, a região econômica dos Sertões de Crateús é composta por um total de nove municípios e tem um total de 12,82 mil quilômetros quadrados (IPECE, 2017). Na Figura 2 é possível observar os municípios que constituem essa região e a localização de seus principais reservatórios.

Figura 2 - Sertões de Crateús.



Fonte: Autoria própria (2019).

Abaixo, na Tabela 1 é possível ver a população de cada uma dessas localidades.

Tabela 1 - População dos municípios dos Sertões de Crateús.

| Município | População (Censo 2010) |
|---------------------------|-----------------------------------|
| Crateús | 72.812 |
| Independência | 25.573 |
| Novo Oriente | 27.453 |
| Quiterianópolis | 19.921 |
| Tamboril | 25.451 |
| Ipaporanga | 11.343 |
| Ararendá | 10.491 |
| Nova Russas | 30.965 |
| Monsenhor Tabosa | 16.705 |
| Sertões de Crateús | 240.714 |

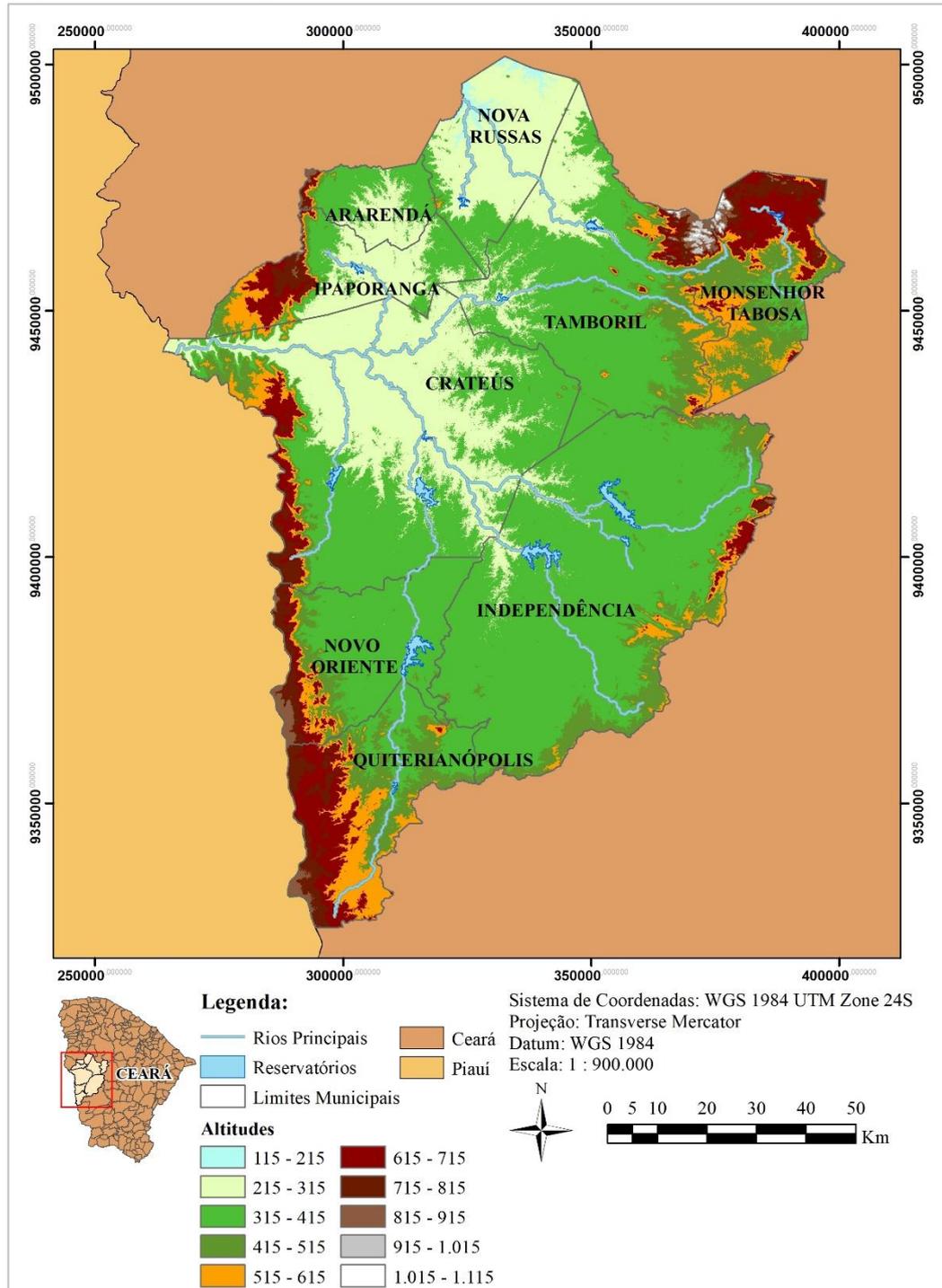
Fonte: IPECE (2018).

Como é possível observar na Tabela 1, a região possui no total aproximadamente 241 mil habitantes, segundo os dados do Perfil Municipal de 2017 do (IPECE,2018a; IPECE,2018b; IPECE,2018c; IPECE,2018d), com Censo Demográfico de 2010 realizado pelo IBGE.

Analisando as altitudes apresentadas na Figura 3, é possível perceber que grande parte da região dos Sertões de Crateús encontra-se entre as altitudes de 215 e 415 metros, pegando, portanto, duas classes de classificação. Nas zonas extremas, são encontradas as maiores altitudes da região, onde os valores ficam entre 615 e 915 metros e uma pequena parcela na divisa entre as cidades de Tamboril e Monsenhor Tabosa que atinge altitudes entre 915 e 1115 metros.

Desta forma, comparando a Figura 3, com a Figura 4, é possível notar que as águas dessa região correm em direção ao município de Crateús, onde segue seu curso em direção ao estado do Piauí.

Figura 3 - Altitudes da região dos Sertões de Crateús.



Fonte: Autoria própria (2019).

3.2 Caracterização dos Reservatórios Artificiais da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús

A região possui um total de 9 reservatórios artificiais principais, que possuem a função de abastecimento dos centros urbanos e de suas localidades. Na Figura 4 é possível observar a localização desses reservatórios. Dentre eles, pode-se citar o Carnaubal e Batalhão

responsáveis pelo abastecimento de Crateús; o Flor do Campo, localizado em Novo Oriente; Colina da cidade de Quiterianópolis e os açudes Jaburu II, Cupim e Barra Velha da cidade de Independência, sendo estes os reservatórios com enfoque nesse estudo. A Tabela 2 mostra a capacidade dos mesmos.

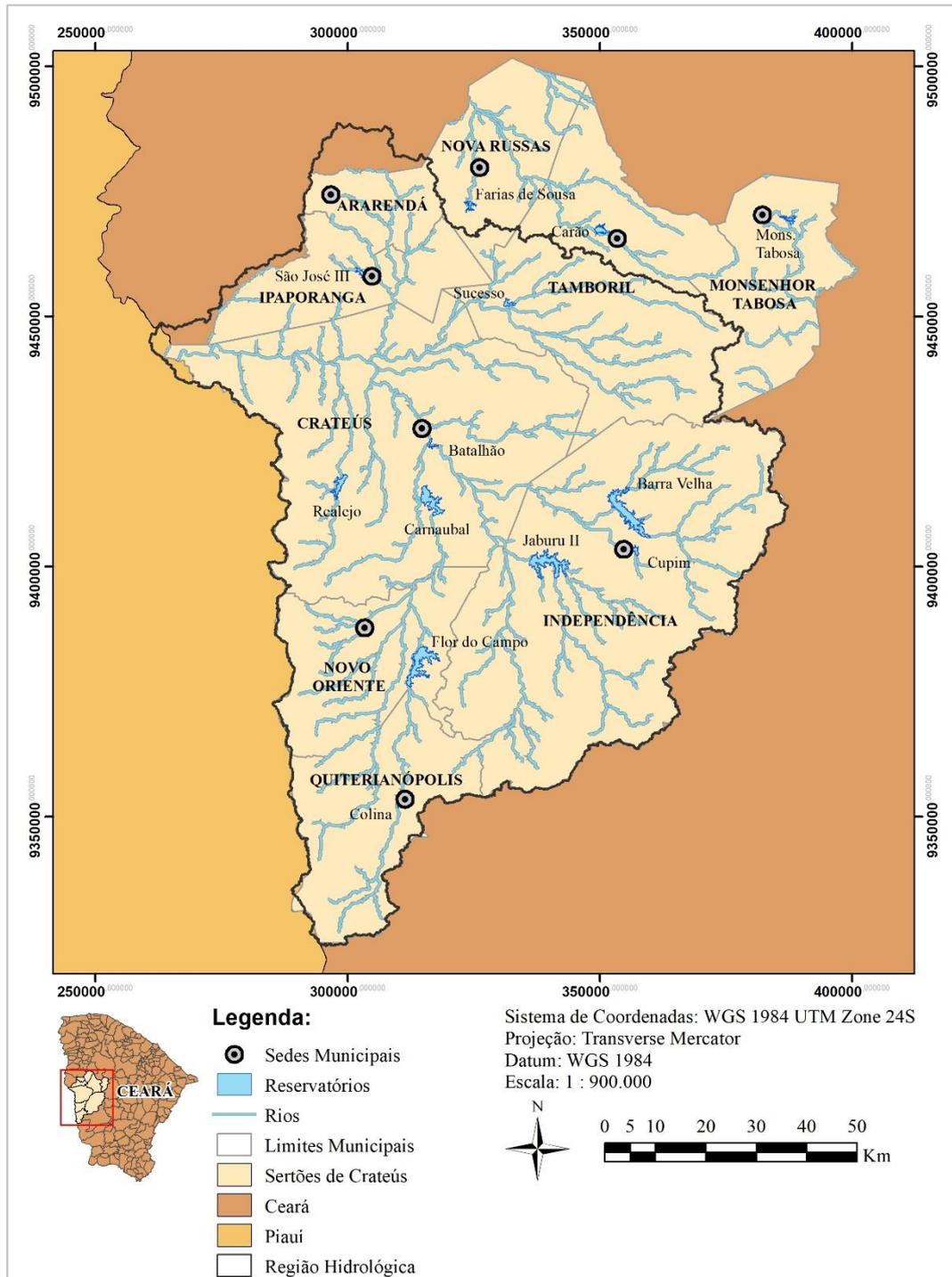
Tabela 2 - Capacidade dos reservatórios dos Sertões de Crateús.

| Reservatório | Município | Capacidade Máxima (hm³) | Capacidade Mínima (hm³) |
|---------------------|------------------|---|---|
| Carnaubal | Crateús | 73,20 | 0,00 |
| Batalhão | Crateús | 1,64 | 0,06 |
| Flor do Campo | Novo Oriente | 105,00 | 0,00 |
| Jaburu II | Independência | 101,64 | 0,00 |
| Barra Velha | Independência | 99,56 | 0,00 |
| Cupim | Independência | 4,60 | 0,00 |
| Colina | Quiterianópolis | 4,30 | 0,00 |

Fonte: COGERH 2019.

Abaixo serão apresentadas as características destes reservatórios, desde os seus principais usos segundo a COGERH, como também suas características físicas, como curva cota, área e volume e evolução do volume armazenado ao longo dos anos.

Figura 4 - Região Hidrológica dos Sertões de Crateús.



Fonte: Autoria própria (2019).

3.2.1 Açude Carnaubal

Localizado ao sul da cidade de Crateús, com as coordenadas de longitude 314.915 e de latitude 9.416.085, o açude Carnaubal é o principal reservatório do município, teve sua construção finalizada no ano de 1990 sendo responsável atualmente por quase a totalidade do

abastecimento local (COGERH, 2019). Como é possível observar na Tabela 2, a sua capacidade é de 73,20 hectômetros cúbicos, sendo apenas o quarto maior reservatório da região. Sua bacia pode ser observada na Figura 5, que possui uma área de 2059,2 quilômetros quadrados. O reservatório está situado no Rio Poti, sendo este o segundo principal rio da região.

Segundo dados da COGERH, este reservatório é utilizado para um total de oito atividades, sendo elas: usos públicos por concessionárias, dessedentação animal, usos domésticos locais, recreação, irrigação, pesca artesanal, indústria e agricultura de vazante.

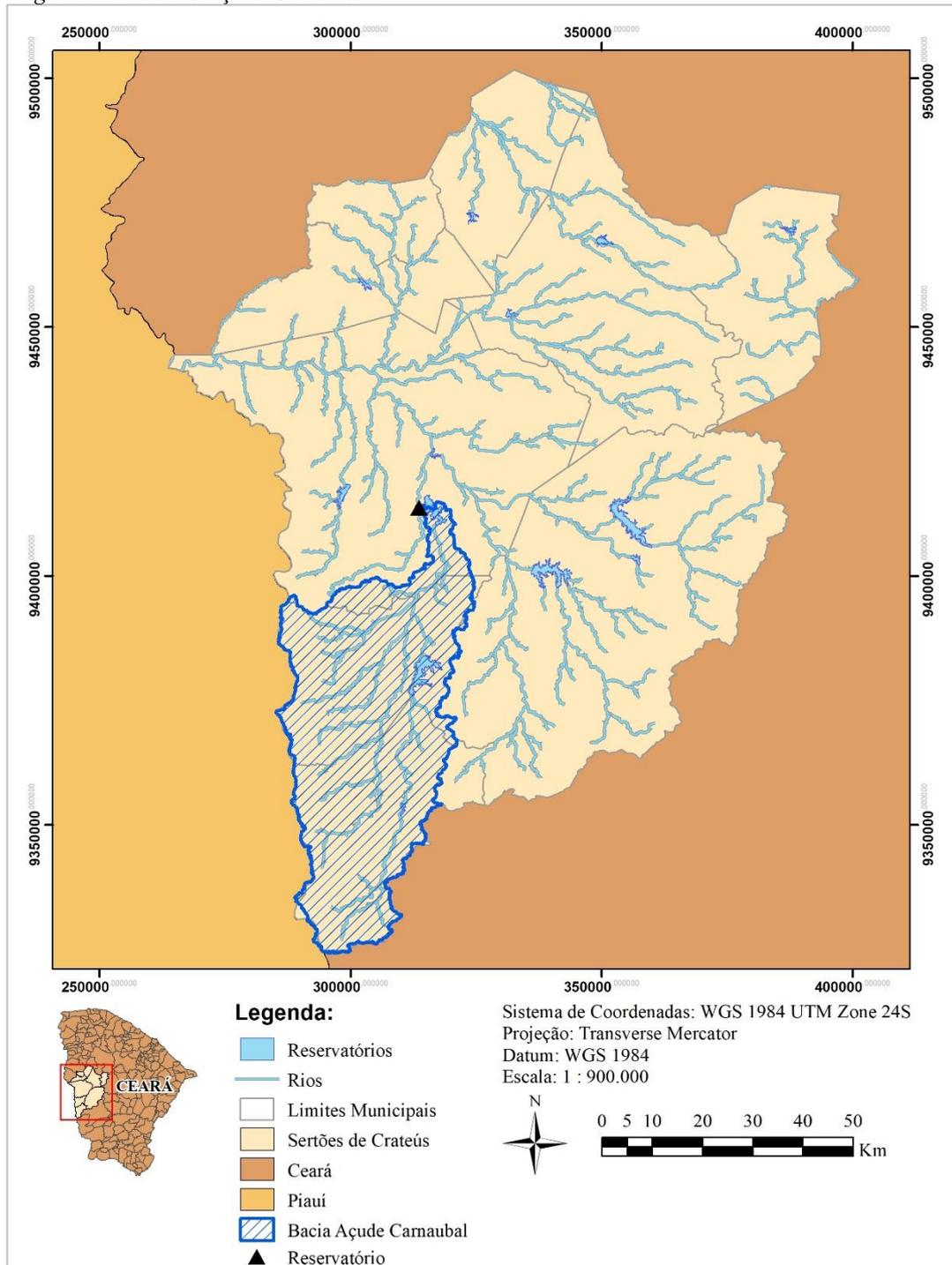
No Gráfico 1 localizado a seguir é possível notar a evolução do volume do reservatório ao longo de 15 anos, tendo como a última década um período crítico em que apenas no ano de 2018 voltou-se a ter uma recarga do volume.

Gráfico 1 - Evolução do volume armazenado do açude Carnaubal.



Fonte: Adaptado de COGERH/FUNCEME (2019).

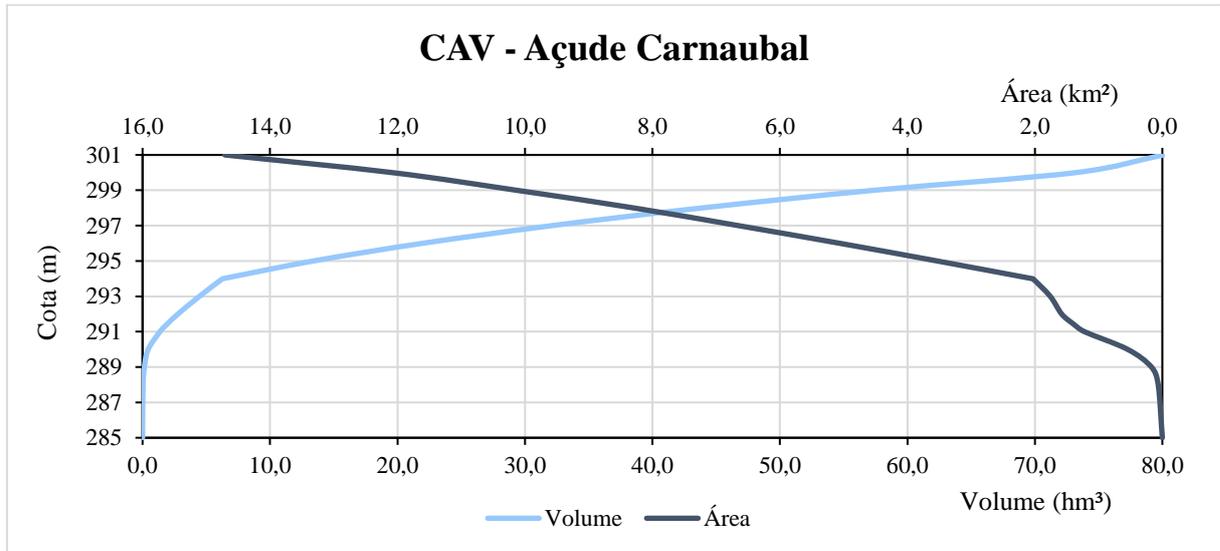
Figura 5 - Bacia do Açude Carnaubal.



Fonte: Autoria própria (2019).

No Gráfico 2, é possível analisar a curva de cota – área – volume (CAV) do reservatório, sendo possível observar que para o volume máximo do reservatório, o espelho de água do mesmo conta com uma área de 12,08 quilômetros quadrados de extensão.

Gráfico 2 - CAV do Açude Carnaubal.

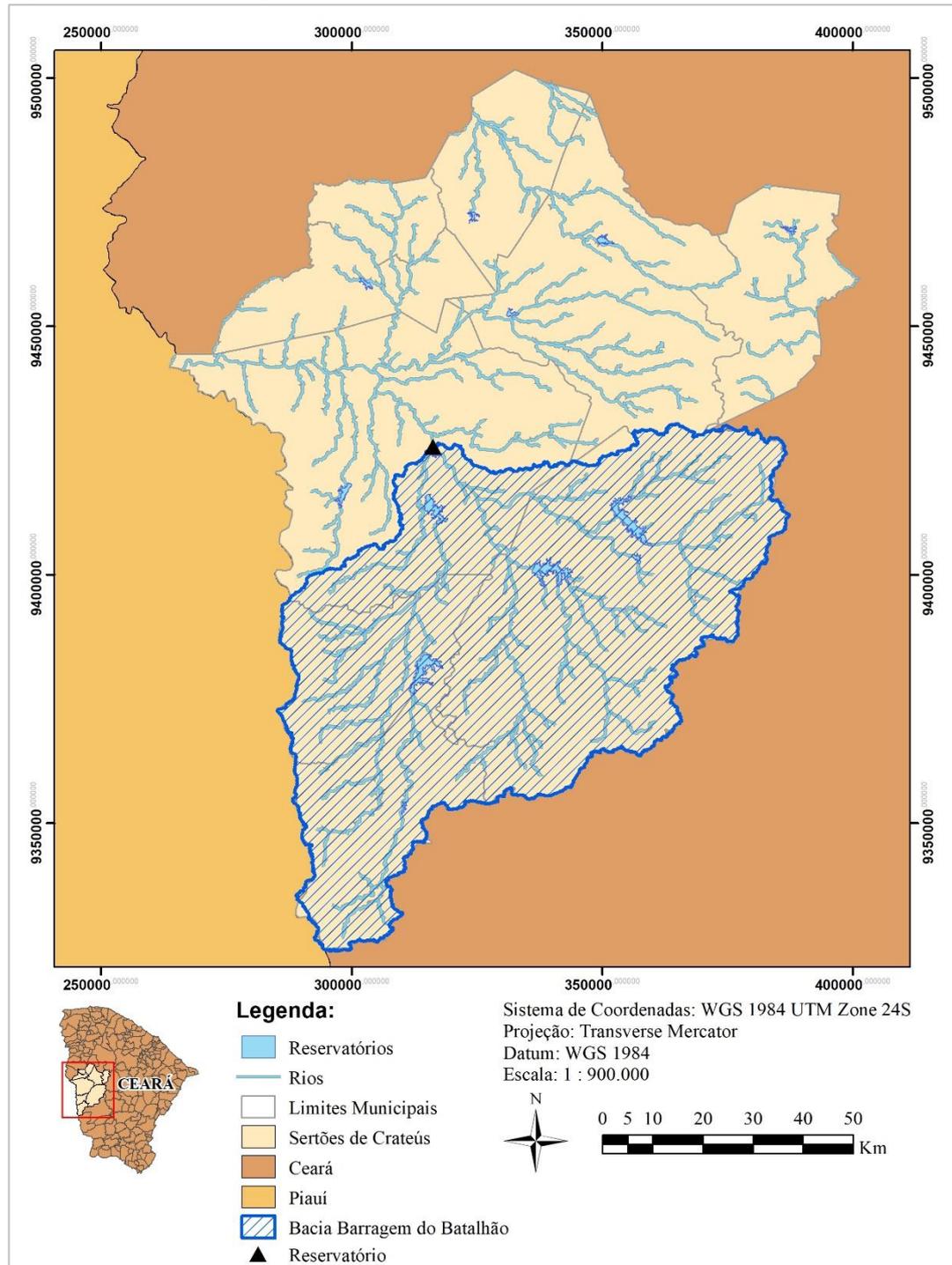


Fonte: Adaptado de COGERH (2019).

3.2.2 Barragem Batalhão

Situada dentro da sede municipal de Crateús, a barragem do Batalhão foi construída a princípio apenas para abastecimento do contingente militar que se instalava na cidade, entretanto, após casos de crise hídrica teve sua capacidade ampliada com intuito de abastecer também a população urbana. Segundo os dados da COGERH, a barragem possui uma capacidade de 1,64 hectômetros cúbicos, no entanto, essa capacidade encontra-se reduzida em decorrência do acúmulo de sedimentos. A barragem do Batalhão conta com uma área de bacia de 5959,40 quilômetros quadrados e é situada no encontro entre o Riacho do Meio, principal rio da região, e o rio Poti, segundo maior rio, a disposição da área dessa bacia pode ser observada na figura 6. A montante desse reservatório encontra-se os reservatórios Carnaubal, Jaburu II, Barra Velha e Cupim, a jusante dele, não possuem reservatórios, de tal forma que a água vertida pelo mesmo escoar em direção ao estado do Piauí. Atualmente esse sistema tem como principal uso servir de barragem de nível para a captação de água.

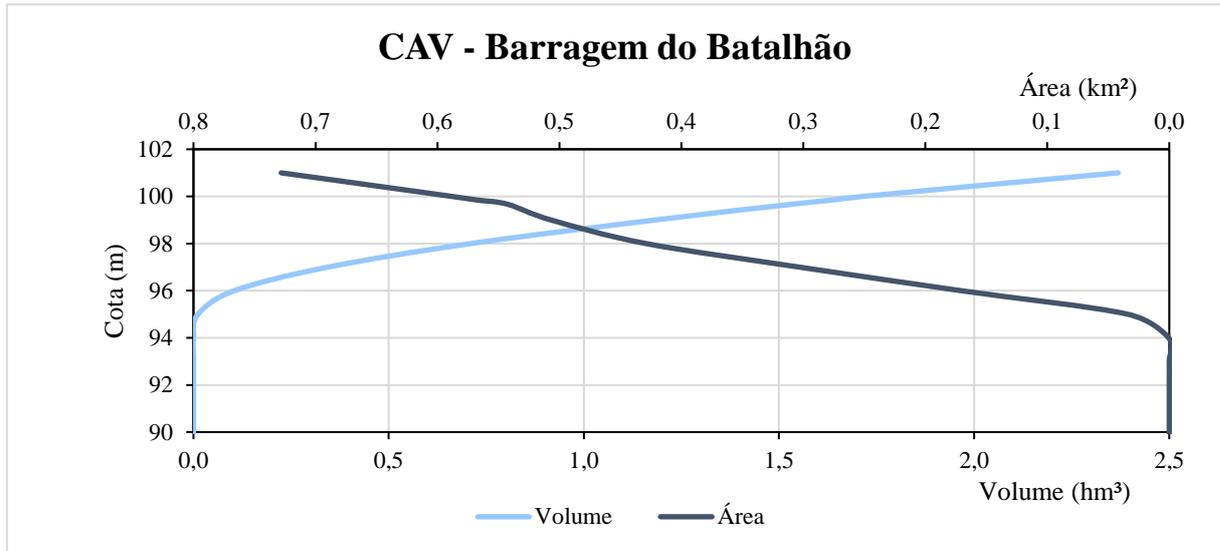
Figura 6 - Bacia da Barragem do Batalhão.



Fonte: Autoria própria (2019).

No Gráfico 3, é possível observar a CAV da barragem do Batalhão, onde se observa uma área de espelho d'água de 0,568 quilômetros quadrados para o volume máximo suportado pelo reservatório.

Gráfico 3 - CAV da Barragem do Batalhão.



Fonte: Adaptado de COGERH (2019).

Como pode ser visto no Gráfico 4, para a Barragem do Batalhão os dados existentes têm início apenas no ano de 2013 e como já foi retratado, esse reservatório atualmente tem sido apenas uma barragem de nível, dessa forma, o seu volume não é representativo para o funcionamento correto do sistema.

Gráfico 4 - Evolução do volume armazenado na Barragem do Batalhão.



Fonte: Adaptado de COGERH/FUNCEME (2019).

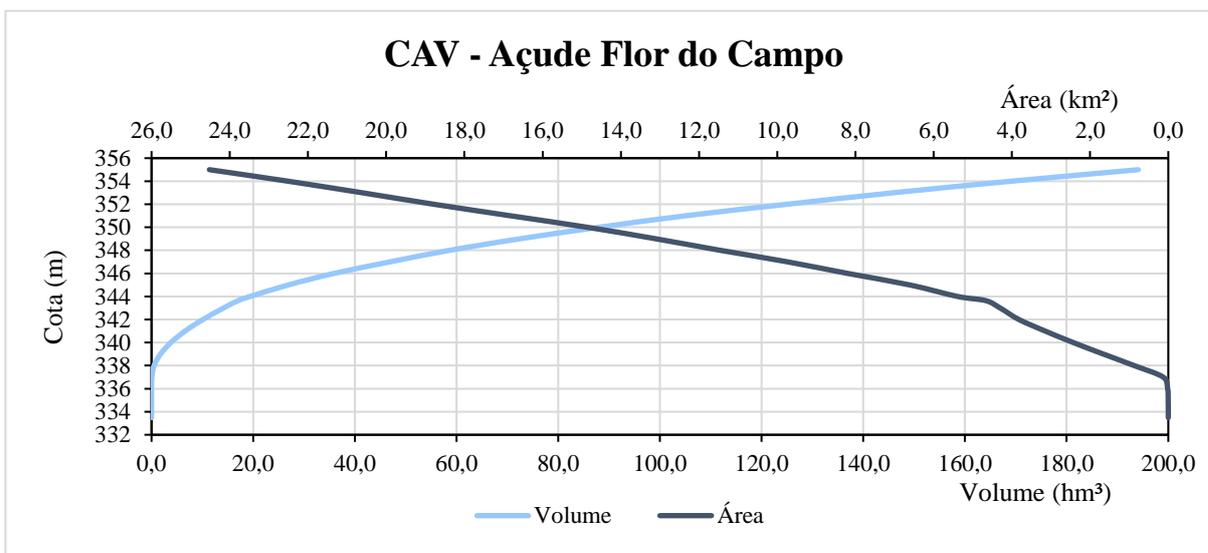
3.2.3 Açude Flor do Campo

Localizado no município de Novo Oriente e com coordenadas 314.377 de longitude e 9.383.891 de latitude, o açude Flor do Campo é o responsável pelo abastecimento do município aonde se localiza, sendo o segundo maior reservatório dos Sertões de Crateús, contando com uma capacidade de 105 hectômetros cúbicos (COGERH, 2019). A área total de sua bacia é de 653,8 quilômetros quadrados, o reservatório foi concluído no ano de 1999 e é situado no Rio Poti, como pode ser visto na Figura 7. Possui a montante, o reservatório Colina e a jusante o reservatório Carnaubal.

Os usos para esse reservatório são usos públicos por concessionárias, dessedentação animal, usos domésticos locais, recreação, irrigação, pesca artesanal, balneário e agricultura de vazante

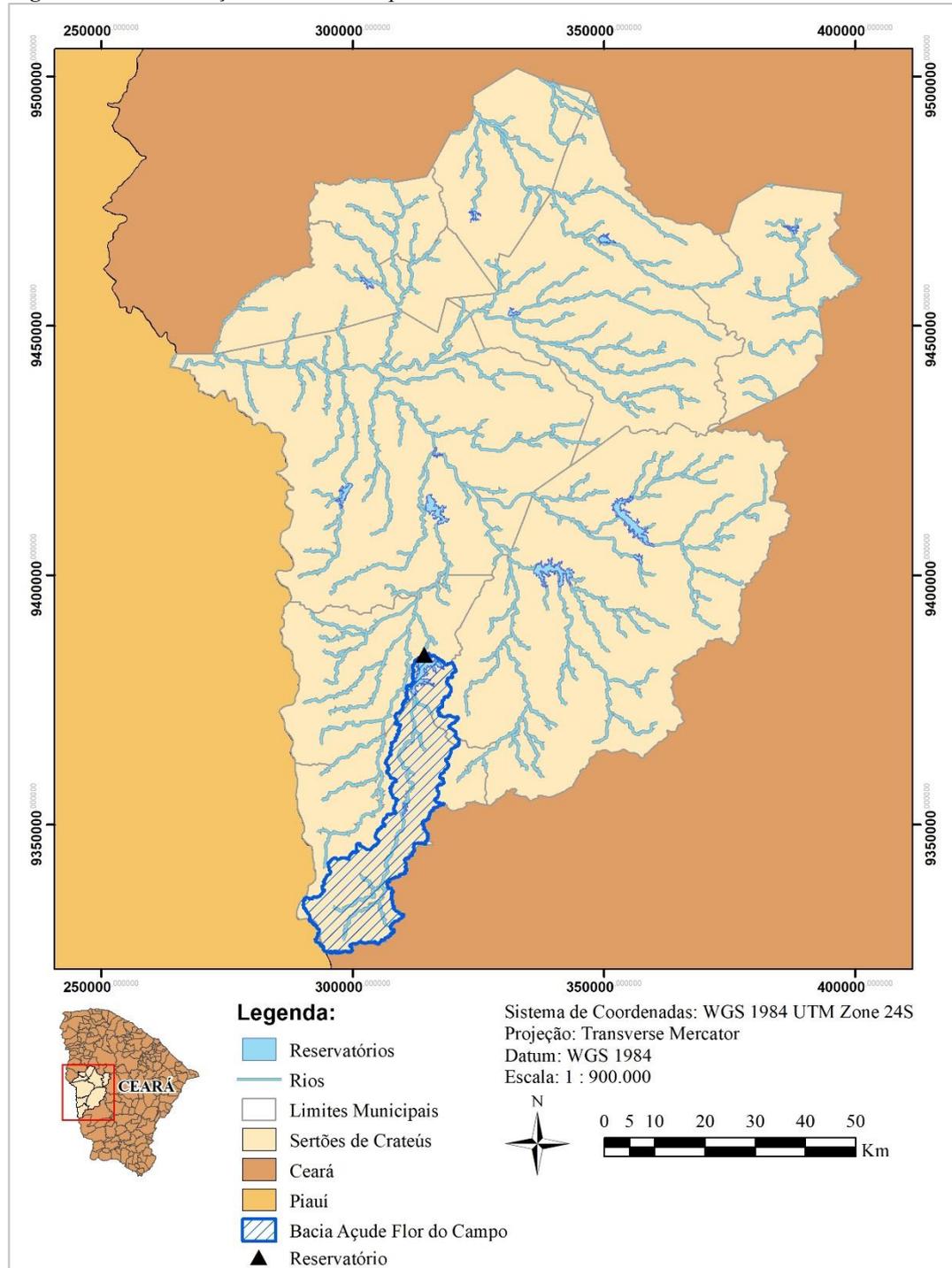
A CAV do mesmo pode ser observada no Gráfico 5, onde em sua capacidade máxima conta com uma área de espelho d'água de 16,82 quilômetros quadrados.

Gráfico 5 - CAV Açude Flor do Campo.



Fonte: Adaptado de COGERH (2019).

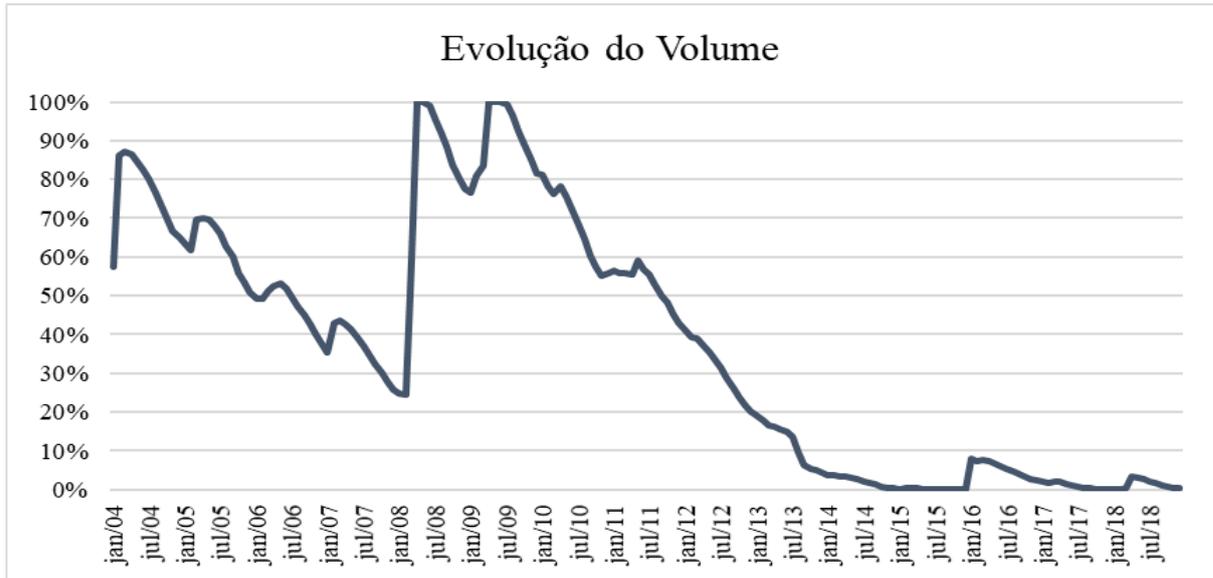
Figura 7 - Bacia do Açude Flor do Campo.



Fonte: Autoria própria (2019).

No Gráfico 6, é possível ver a evolução do volume armazenado para o açude Flor do Campo nos últimos 15 anos.

Gráfico 6 - Evolução do volume armazenado no Açude Flor do Campo.



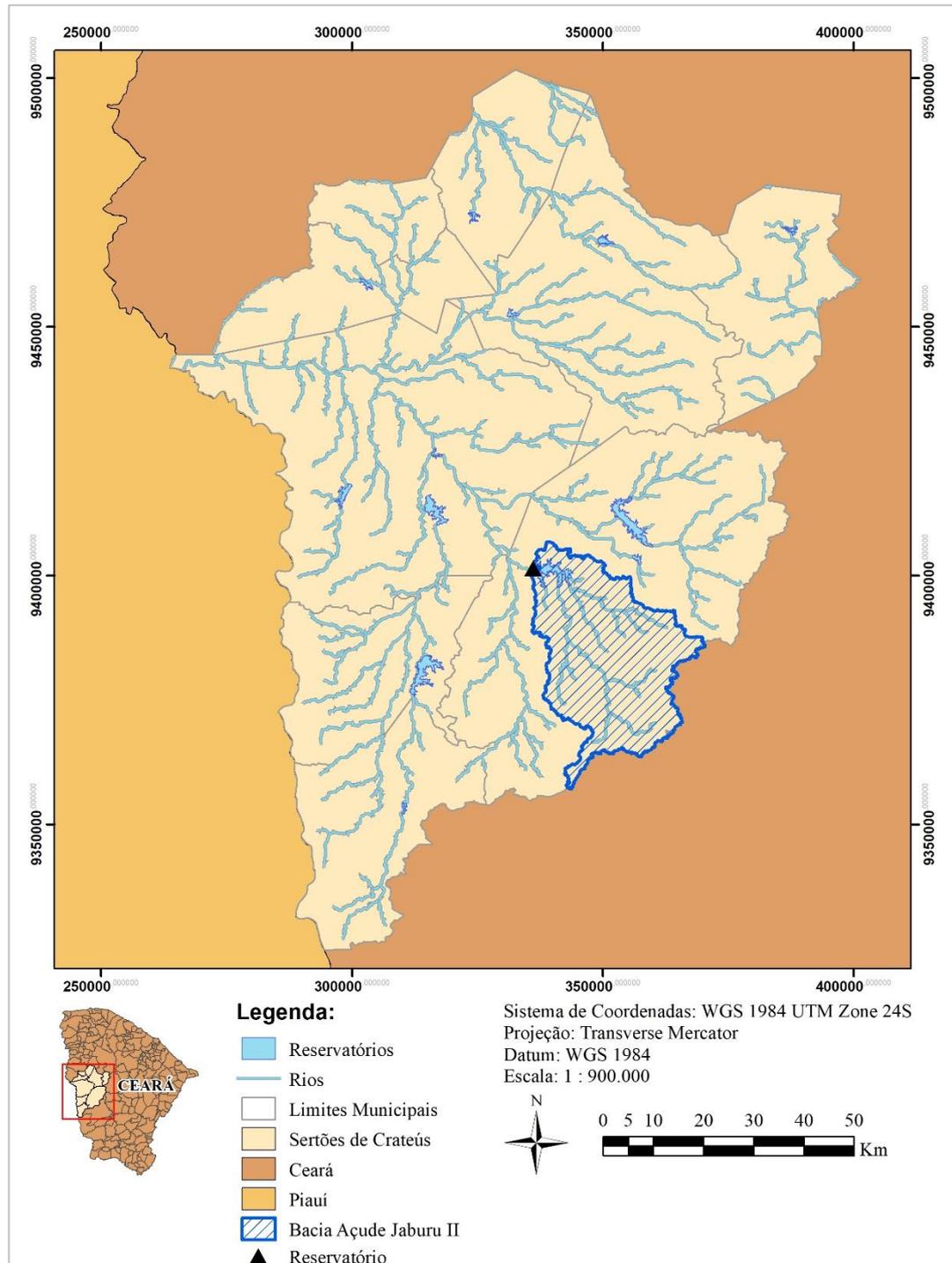
Fonte: Adaptado de COGERH/FUNCEME (2019).

3.2.4 Açude Jaburu II

Localiza-se no município de Independência, com coordenadas 336.035 de longitude e 9.401.073 de latitude, o açude Jaburu II é o açude de maior capacidade do sistema, com um total de 116 hectômetros cúbicos, sendo este um dos responsáveis pelo abastecimento do município (COGERH, 2019). Possuindo uma área de bacia de 910,9 quilômetros quadrados, o reservatório teve a sua construção concluída em 1984 e é situado no Riacho Jaburu, como é possível observar na Figura 8.

Os usos para esse reservatório são usos públicos por concessionárias, dessedentação animal, usos domésticos locais, recreação, irrigação, pesca artesanal e agricultura de vazante.

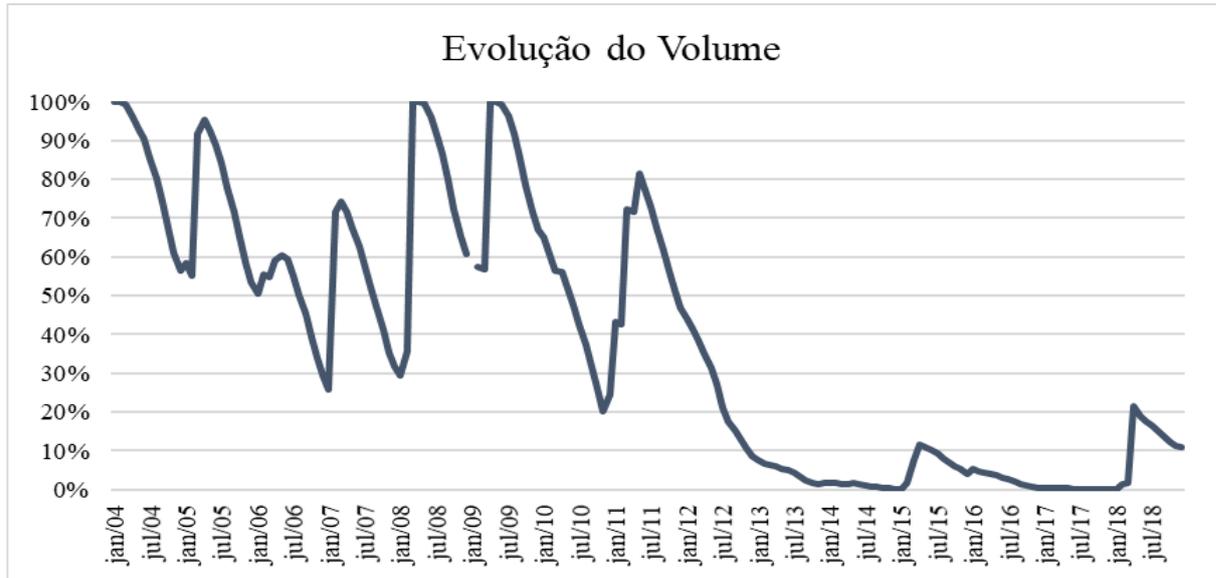
Figura 8 - Bacia do Açude Jaburu II.



Fonte: Autoria própria (2019).

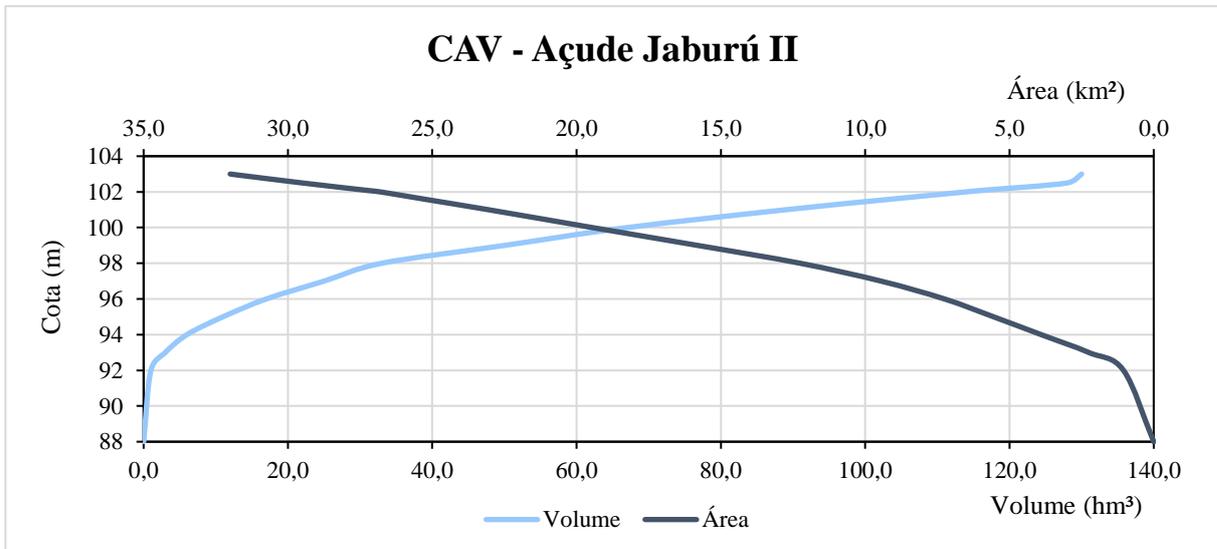
Abaixo é demonstrado no Gráfico 7 a evolução do volume armazenado no açude Jaburu II, nos últimos 15 anos. No Gráfico 8 é possível ver a CAV do reservatório Jaburu II, onde em sua capacidade máxima possui um espelho d'água de 21,65 quilômetros quadrados.

Gráfico 7 - Evolução do volume armazenado no Açude Jaburu II.



Fonte: Adaptado de COGERH/FUNCEME (2019).

Gráfico 8 - CAV Açude Jaburu II.



Fonte: Adaptado de COGERH (2019).

3.2.5 Açude Barra Velha

Localizado no município de Independência, com longitude 353.013 e latitude 9.411.686, o açude Barra Velha possui a terceira maior capacidade do sistema, tendo 99,50 hectômetros cúbicos de capacidade volumétrica (COGERH, 2019). O reservatório possui uma área de bacia de 997,2 quilômetros quadrado, que pode ser visto na Figura 9 e se encontra no Riacho do Meio, principal rio da região e teve sua conclusão no ano de 1999. Tendo apenas a barragem do Batalhão a sua jusante.

As atividades em que seu recurso é utilizado são usos públicos por concessionárias, dessedentação animal, usos domésticos locais, recreação, irrigação, pesca artesanal, indústria e agricultura de vazante.

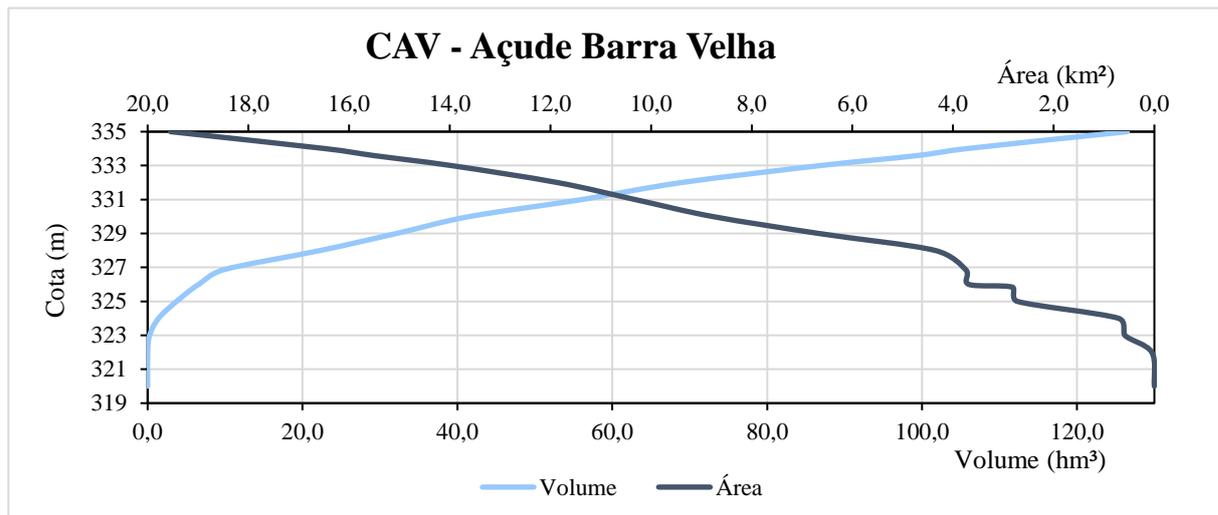
No Gráfico 9, vê-se a evolução do volume armazenado no açude Barra Velha para os últimos 15 anos. E no Gráfico 10 é possível observar a CAV do reservatório, que possui uma área de espelho de 15,53 quilômetros quadrados em seu volume máximo.

Gráfico 9 - Evolução do volume armazenado no Açude Barra Velha.



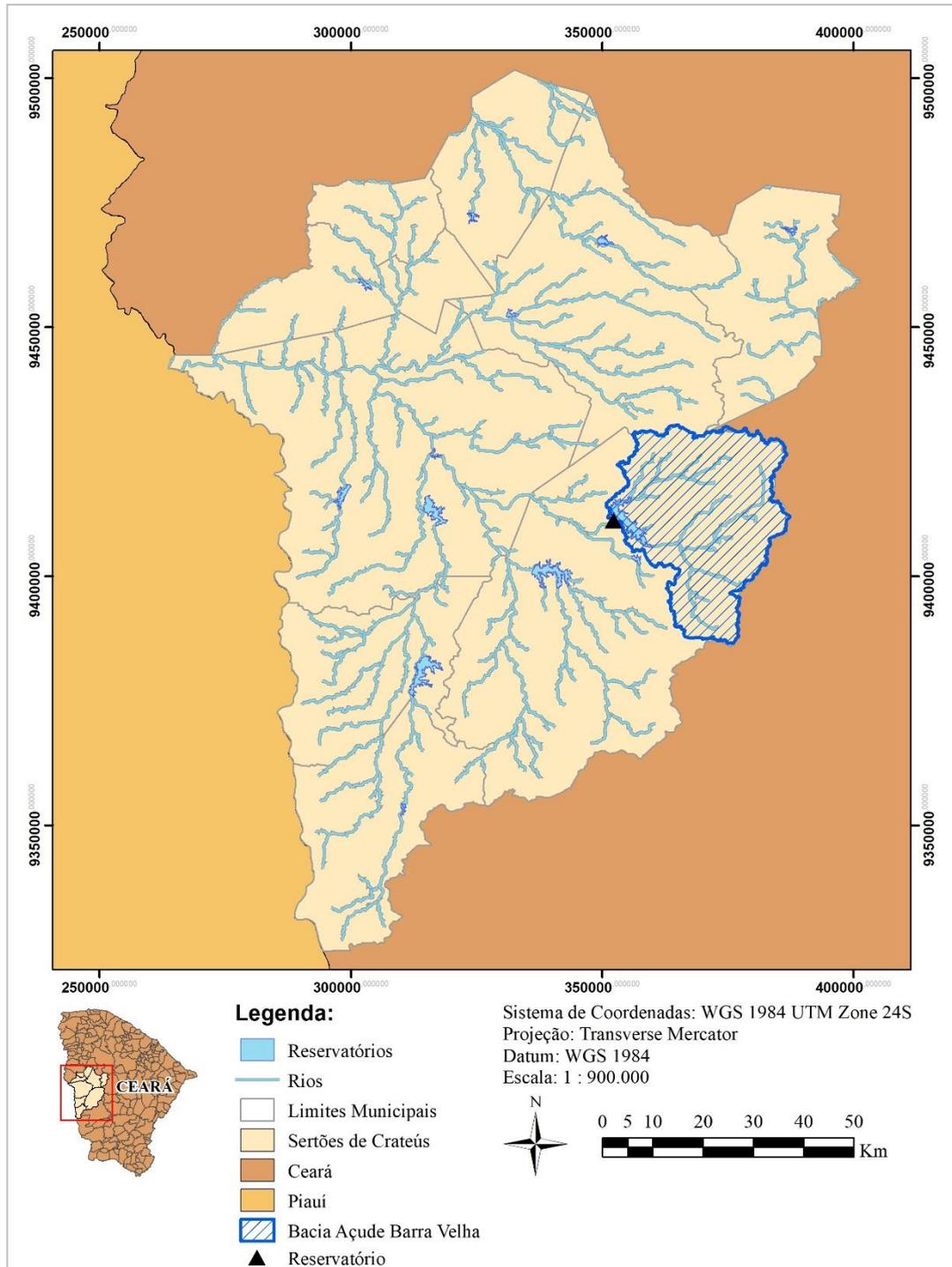
Fonte: Adaptado de COGERH/FUNCEME (2019).

Gráfico 10 - CAV Açude Barra Velha.



Fonte: Adaptado de COGERH (2019).

Figura 9 - Bacia do Açude Barra Velha.



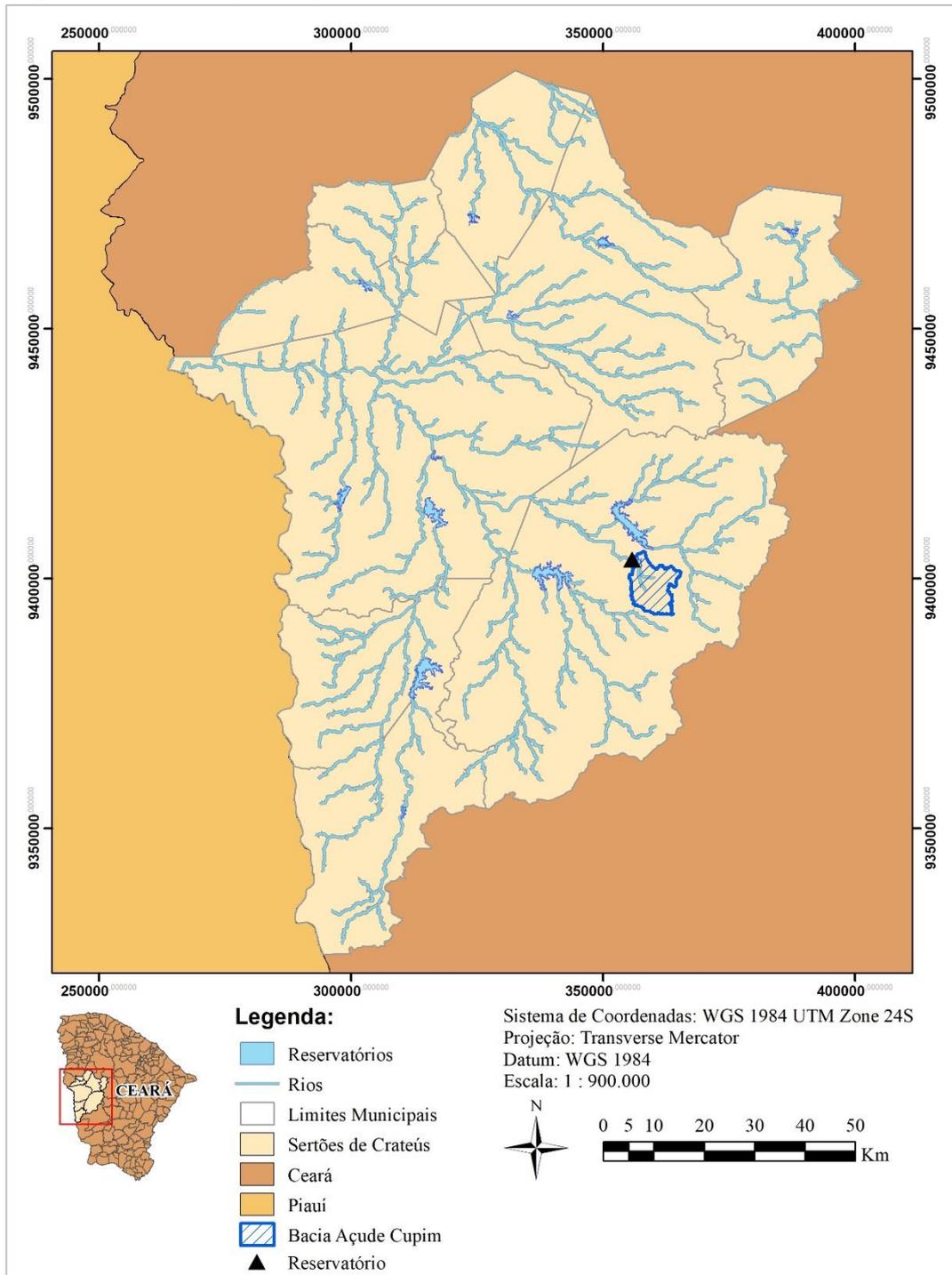
Fonte: Autoria própria (2019).

3.2.6 Açude Cupim

Situado no município de Independência, e segundo as informações de COGERH (2019), está localizado com longitude 355.950 e latitude 9.403.693, o açude Cupim conta com uma capacidade de 4,6 hectômetros cúbicos em seu volume máximo e é utilizado como fonte de abastecimento para o município no qual está localizado no período em que o açude Barra

Velha, principal reservatório da localidade, não pode suprir a demanda total do local. A bacia do reservatório conta com apenas 80 quilômetros quadrados de extensão, podendo ser observada na Figura 10, sendo a menor dentre os reservatórios do estudado.

Figura 10 - Bacia do Açude Cupim.

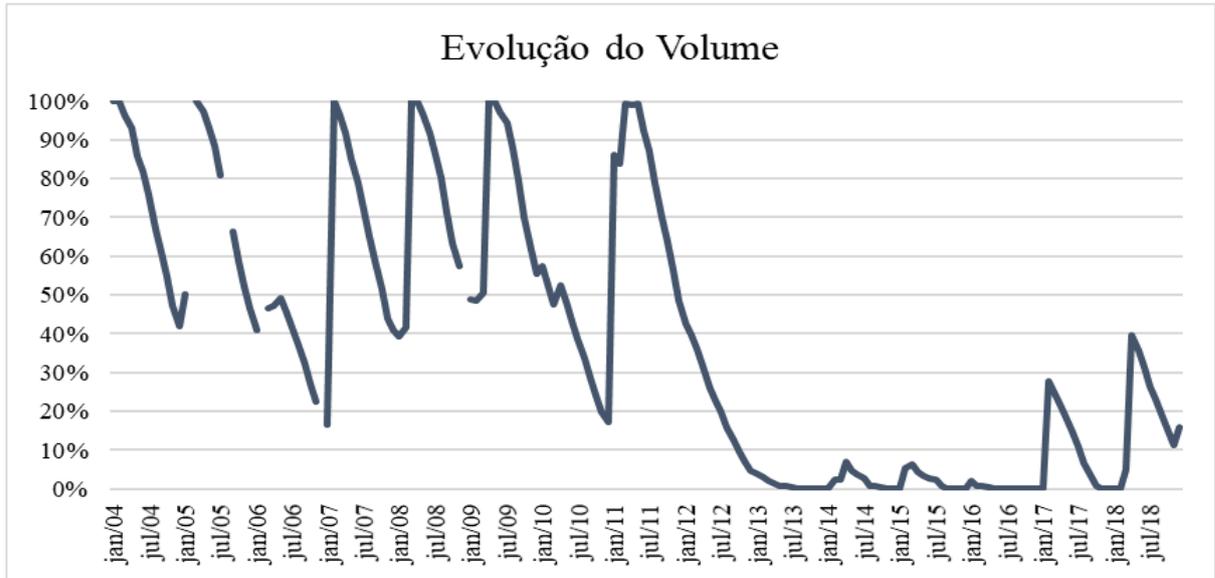


Fonte: Autoria própria (2019).

O reservatório encontra-se no rio Cupim, e possui apenas a barragem do Batalhão a sua jusante. Os usos para esse reservatório são dessedentação animal, usos domésticos locais,

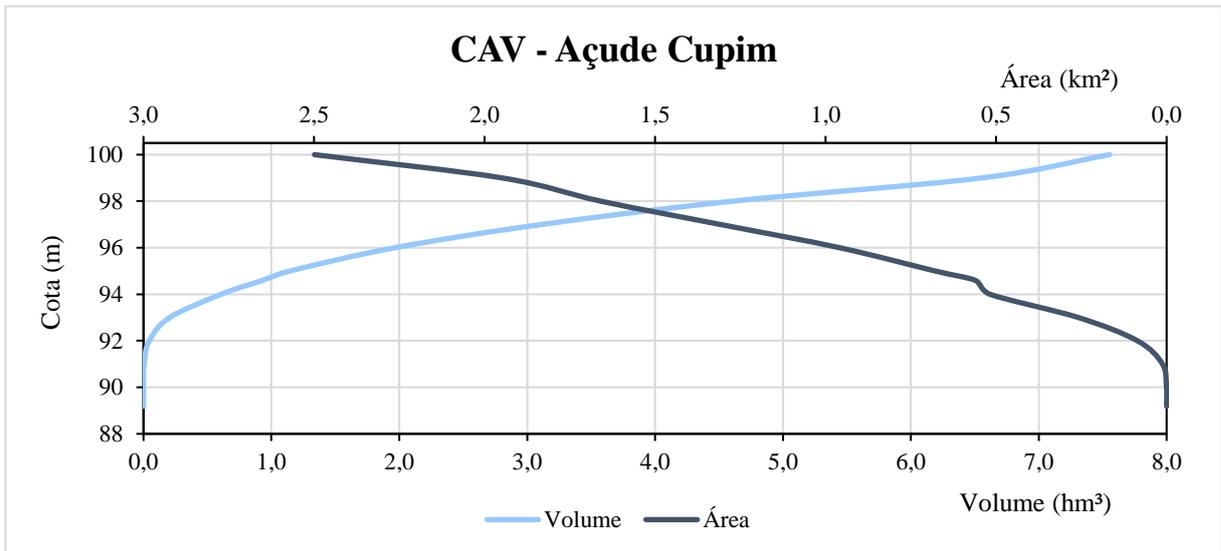
recreação, irrigação, pesca artesanal, e balneário, nos Gráficos 11 e 12 são mostrados, respectivamente, a evolução dos volumes ao longo dos últimos 15 anos e da CAV do reservatório, onde para o volume de acumulação máximo o reservatório possui 1,66 quilômetros quadrados de espelho d'água.

Gráfico 11 - Evolução do volume armazenado no Açude Cupim.



Fonte: Adaptado de COGERH/FUNCEME (2019).

Gráfico 12 - CAV Açude Cupim.



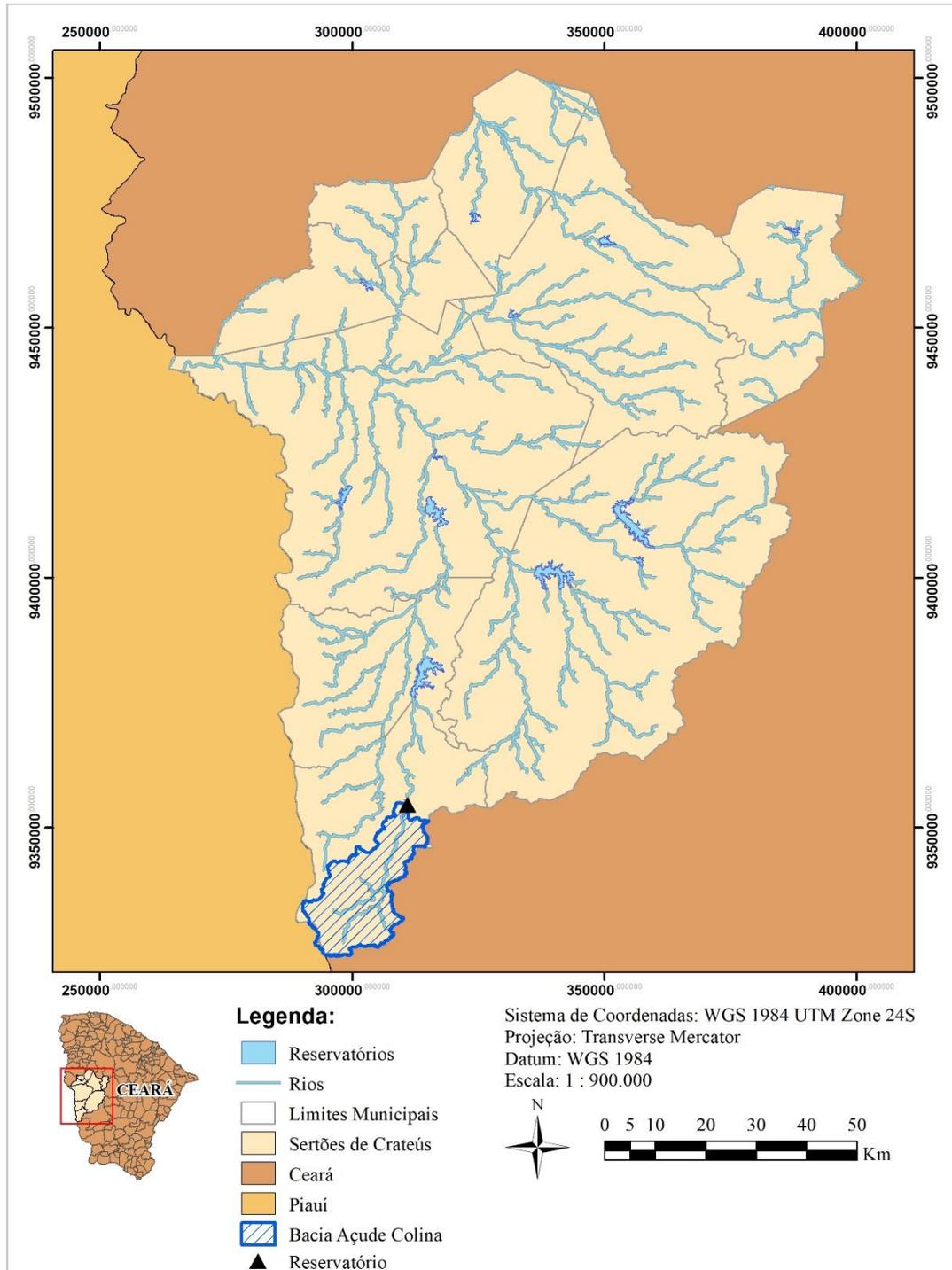
Fonte: Adaptado de COGERH (2019).

3.2.7 Açude Colina

Situado no município de Quiterianópolis, com longitude 310.526 e latitude 9.354.177, o açude Colina conta com um volume de acumulação total de 4,3 hectômetros

cúbicos (COGERH, 2019). Conta com uma área de bacia total de 360,20 quilômetros quadrados, os quais podem ser observados na Figura 11. O reservatório possui apenas o açude Flor do Campo a sua jusante, não possuindo reservatórios a montante e encontra-se no Rio Poti, segundo principal rio da região.

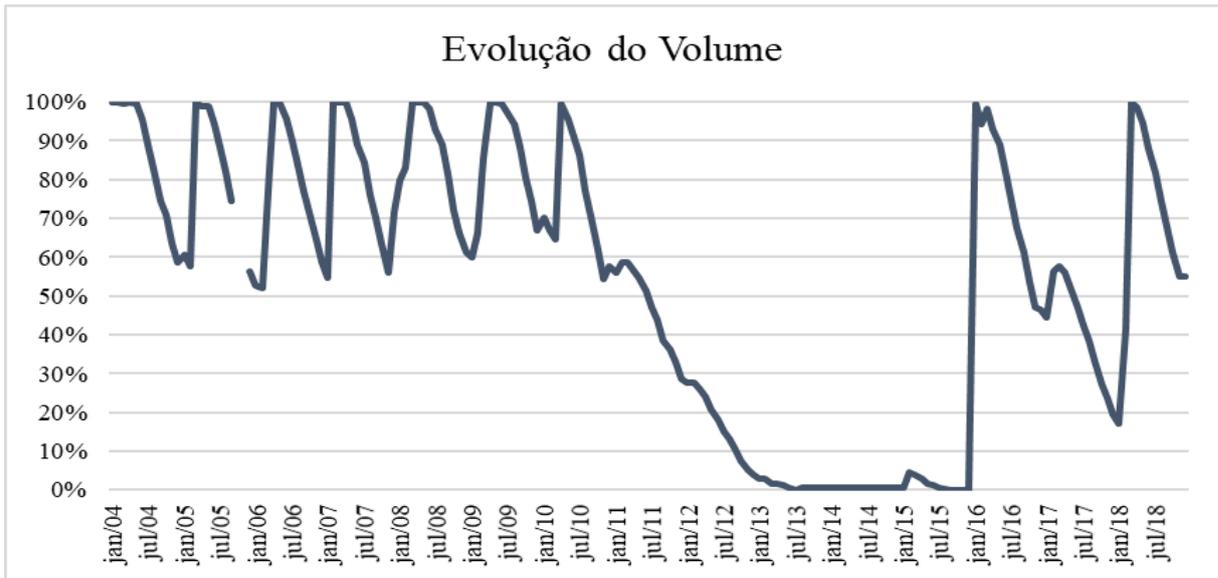
Figura 11 - Bacia do Açude Colina.



Fonte: Autoria própria (2019).

Em se tratando do reservatório responsável pelo abastecimento da cidade de Quiterianópolis, é possível ver que os demais usos do reservatório são usos públicos por concessionárias, dessedentação animal, usos domésticos locais, recreação, pesca artesanal e agricultura de vazante., assim como é possível ver a evolução do volume do reservatório no Gráfico 13 e da CAV do mesmo no Gráfico 14.

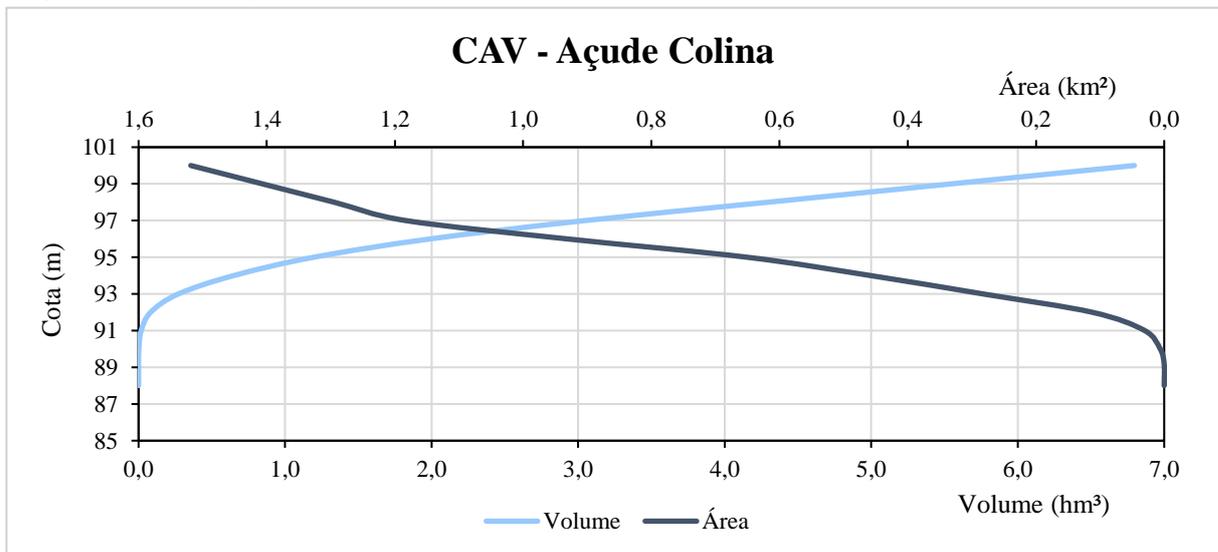
Gráfico 13 - Evolução do volume armazenado no Açude Colina.



Fonte: Adaptado de COGERH/FUNCEME (2019).

No Gráfico 14 é possível avaliar a CAV do reservatório e nota-se que para a capacidade máxima do reservatório, a área de espelho d’água do reservatório é de 1,29 quilômetros quadrados.

Gráfico 14 - CAV do Açude Colina.

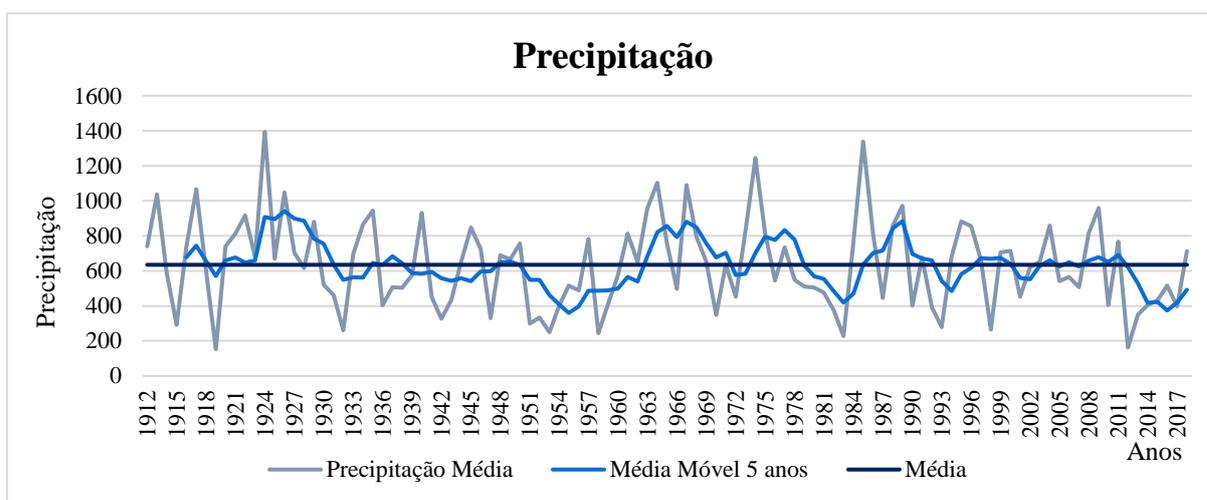


Fonte: Adaptado de COGERH (2019).

3.3 Caracterização Climática da Região

Em se tratando de uma região semiárida, com baixos níveis de precipitação anual, como é possível observar no Gráfico 15, a evolução da precipitação ao longo dos anos ao se comparar a série anual de precipitação média para a Região Hidrológica dos Sertões de Crateús com a média, é possível perceber que houve um decréscimo na precipitação ao longo das décadas, sendo ainda mais marcante esse decréscimo ao avaliar a média móvel de 5 anos, onde após o ano de 2011 a precipitação sempre esteve abaixo da média para a região.

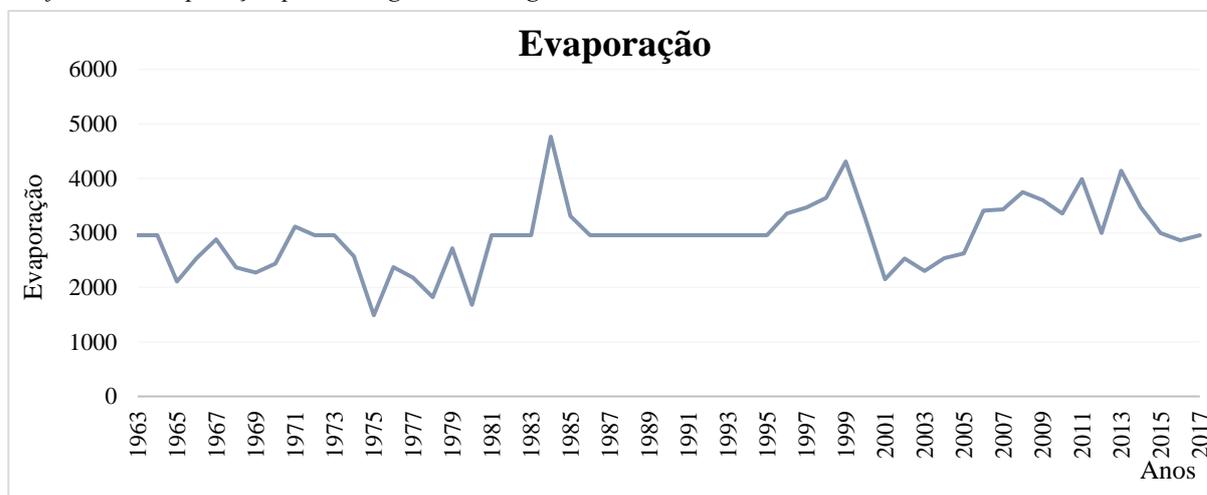
Gráfico 15 - Precipitação média anual para a Região Hidrológica dos Sertões de Crateús.



Fonte: Autoria própria (2019).

Quanto a evaporação, é possível observar no Gráfico 16 que para a região, a evaporação chega a níveis entre 1500 milímetros por ano e 4800 milímetros por ano, tendo uma média de aproximadamente 3000 milímetros por ano, sendo esse o valor utilizado para preencher o período com falhas na série.

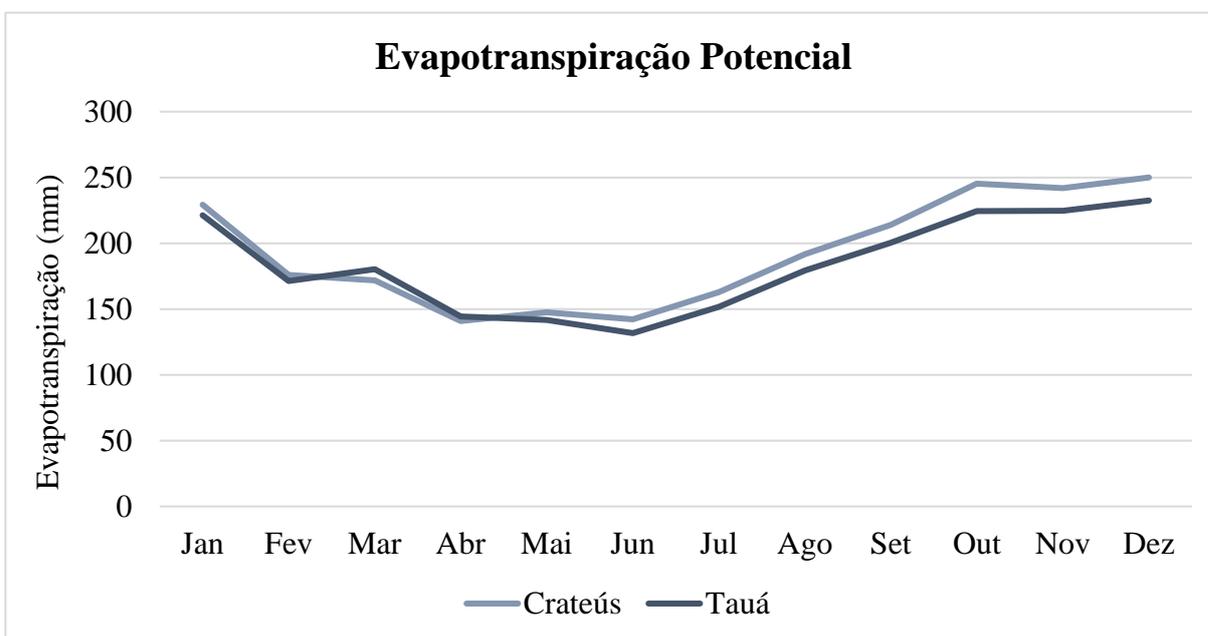
Gráfico 16 - Evaporação para a Região Hidrológica dos Sertões de Crateús.



Fonte: Autoria própria com dados da Funceme e INMET (2019).

Para a evapotranspiração potencial da região, o INMET apresenta as Normais Climatológicas para os anos de 1981 a 2010 que é apresentada no Gráfico 17, onde é visto que para as estações de Crateús e Tauá, ambas possuem o mesmo comportamento, no qual a evapotranspiração para os meses de março a junho encontra-se nos menores níveis, isso ocorre devido ao período chuvoso da região. Para o período de julho a dezembro, a evapotranspiração encontra-se em ascensão, na qual possui valor máximo no mês de dezembro, com aproximadamente 230 mm/mês (INMET, 2019).

Gráfico 17 - Evapotranspiração potencial para estações em estudo.

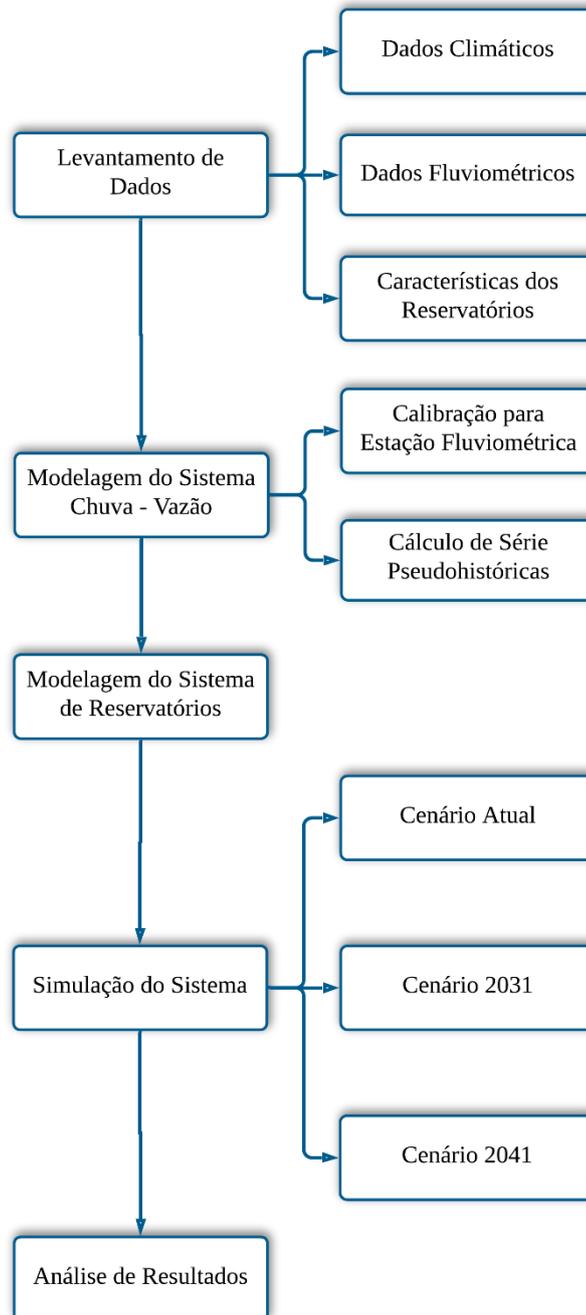


Fonte: Autoria própria com dados do INMET (2019).

4 METODOLOGIA

A presente seção apresenta as fases necessárias para a produção do trabalho em questão, sendo estas mostradas no fluxograma da Figura 12.

Figura 12 - Fluxograma de atividades.



Fonte: Autoria própria (2019).

Se trata de uma pesquisa quantitativa, sendo de caráter descritivo e explicativo, com uma coleta de dados diretamente dos órgãos responsáveis, COGERH para os dados dos reservatórios e demandas, Funceme para dados pluviométricos e fluviométricos e INMET para os dados de evaporação, sendo os três últimos utilizados posteriormente como dados de entrada para a transformação de chuva-vazão por meio do SMAP, onde as vazões serão calibradas para a estação fluviométrica Fazenda Boa Esperança (Código ANA – 34750000) e cálculo da série pseudo-histórica para os reservatórios do estudo. Estas séries sintéticas decorrentes dessa etapa alimentarão o software LabSid AcquaNet 2013, onde será feita a modelagem do sistema, os cenários e a sua simulação.

4.1 Levantamento de Dados

O levantamento de dados ocorreu em três segmentos: o levantamento de dados climáticos, o levantamento de dados fluviométricos e o levantamento de dados dos reservatórios em estudo. Estes levantamentos serão apresentados nos sub tópicos 4.1.1 ao 4.1.3.

4.1.1 Dados Climáticos

O levantamento de dados climáticos consistiu na escolha das estações a serem utilizadas. As séries de precipitação e evaporação foram obtidas com a Funceme, as estações utilizadas no estudo são apresentadas na Tabela 3, na sequência foi necessário a organização de seus dados de forma diária e mensal para a precipitação.

Tabela 3 - Estações utilizadas.

| Cód. Estação | Nome do Posto | Tipo de Estação | Cód. Estação | Nome do Posto | Tipo de Estação |
|---------------------|----------------------|------------------------|---------------------|----------------------|------------------------|
| 640037 | Baixio | Precipitação | 440003 | Curatis | Precipitação |
| 640041 | Algodões | Precipitação | 440068 | Curatis | Precipitação |
| 540052 | Quiterianópolis | Precipitação | 440020 | Sucesso | Precipitação |
| 540002 | Coutinho | Precipitação | 440055 | Ipaporanga | Precipitação |
| 540042 | Cruz | Precipitação | 440007 | Tamboril | Precipitação |
| 540041 | Monteiro | Precipitação | 440080 | Açude Carão | Precipitação |
| 540030 | Iapi | Precipitação | 440060 | Canindezinho | Precipitação |
| 540033 | Várzea Grande | Precipitação | 440044 | Ararenda | Precipitação |
| 540115 | Muquem | Precipitação | 440017 | Nova Russas | Precipitação |
| 540113 | Fazenda Realeza | Precipitação | 440045 | Santo Antônio | Precipitação |
| 540007 | Iapi | Precipitação | 440001 | S. João das Lontras | Precipitação |
| 540005 | Tranqueiras | Precipitação | 440004 | Carnaubal | Precipitação |
| 540038 | Cach. Do Fogo | Precipitação | 440005 | Croatá | Precipitação |
| 540003 | Novo Oriente | Precipitação | 440018 | Poranga | Precipitação |

| Cód. Estação | Nome do Posto | Tipo de Estação | Cód. Estação | Nome do Posto | Tipo de Estação |
|---------------------|----------------------|------------------------|---------------------|----------------------|------------------------|
| 540054 | Cam. da Cachoeira | Precipitação | 440023 | Guaraciaba do Norte | Precipitação |
| 540040 | Emaus | Precipitação | 440047 | Croatá | Precipitação |
| 540036 | Jandrangoeira | Precipitação | 440048 | Sítio Várzea Redonda | Precipitação |
| 540108 | Desejo | Precipitação | 440050 | Picada | Precipitação |
| 540032 | Monte Sinai | Precipitação | 440051 | Limoeiro | Precipitação |
| 540024 | Monte Nebo | Precipitação | 440057 | Matriz | Precipitação |
| 540031 | Jaburu | Precipitação | 440058 | América | Precipitação |
| 540027 | Vila Sto Antônio | Precipitação | 440072 | São José | Precipitação |
| 540019 | Independência | Precipitação | 440074 | Morrinhos Novos | Precipitação |
| 540016 | Independência | Precipitação | 440075 | Croatá | Precipitação |
| 540035 | Recife | Precipitação | 441005 | Pedro II | Precipitação |
| 540111 | Fazenda Gracinha | Precipitação | 441015 | Santa Tereza | Precipitação |
| 540028 | Tucuns | Precipitação | 441014 | Saudoso | Precipitação |
| 540034 | Ematuba | Precipitação | 539021 | Rch. do Banabuiu | Precipitação |
| 540020 | Aeroporto (Crateús) | Precipitação | 540045 | Santa Tereza | Precipitação |
| 540000 | Crateús | Precipitação | 540047 | Bom Jesus | Precipitação |
| 540026 | Irapuã | Precipitação | 540048 | São João Do Trissi | Precipitação |
| 540025 | Morro Alegre | Precipitação | 540112 | Faz. Belo Horizonte | Precipitação |
| 540039 | Barreiros | Precipitação | 541002 | Faz. Boa Esperança | Precipitação |
| 540044 | Oliveira | Precipitação | 541013 | Oiticica | Precipitação |
| 540043 | Logradouro | Precipitação | 441016 | Santana | Precipitação |
| 540107 | Poti | Precipitação | 82583 | Crateús | Evaporação |
| 540023 | Ibiapaba | Precipitação | 82683 | Tauá | Evaporação |
| 540029 | Santa Terezinha | Precipitação | 34750000 | Faz. Boa Esperança | Vazão |

Fonte: Autoria própria (2019).

Foram levantados um total de 89 estações, sendo 86 pluviométricas, 2 de evaporação e 1 fluviométrica. As estações pluviométricas passaram por processo de verificação da quantidade de informações da estação e se haviam estações com mesma localização. Para os casos em que existia mais de uma estação com mesma coordenada e período de funcionamento diferente, foram criadas estações com a união dos dados, criando estações equivalentes.

Após esse período de verificação, restaram na área de estudo as 73 estações pluviométricas presentes na Tabela 3, destas, 48 estão localizadas na área dos Sertões de Crateús, as demais estações encontram-se espalhadas ao longo da área da bacia hidrológica da estação fluviométrica 34750000.

Apesar das variações entre os períodos de funcionamento das estações coletadas, o período nos quais possuem dados vão de 1910 até o ano de 2019, entretanto, no presente

trabalho os dados de precipitação para as futuras etapas serão utilizados de janeiro de 1912 a dezembro de 2018.

Para as estações de evaporação, os dados foram coletados da rede de dados do INMET, possuindo apenas duas estações com influência dentro da área de estudo, as mesmas são mostradas na Tabela 3. Para essas estações, não existe uma série contínua de dados, os mesmos vão de 1963 a 1984 e de 1995 a 2017. Entretanto, o período de dados é suficiente para a criação de uma série de médias mensais.

A Figura 13 apresenta a disposição espacial das estações em relação a área de estudo e a bacia da estação fluviométrica.

4.1.2 Dados Fluviométricos

O levantamento de dados fluviométricos ocorreu diretamente da base de dados da Agência Nacional de Águas, ANA, para a região, existe apenas uma estação com medição de vazão, Fazenda Boa Esperança (Código ANA – 34750000), esta estação está situada no rio Poti e compreende um total de 19.174 km², englobando toda a bacia hidrológica dos Sertões de Crateús e a região ao norte da bacia em estudo. Os dados de vazão existentes vão do ano de 1964 a 2018 e os mesmos foram ajustados de forma a criar uma série mensal.

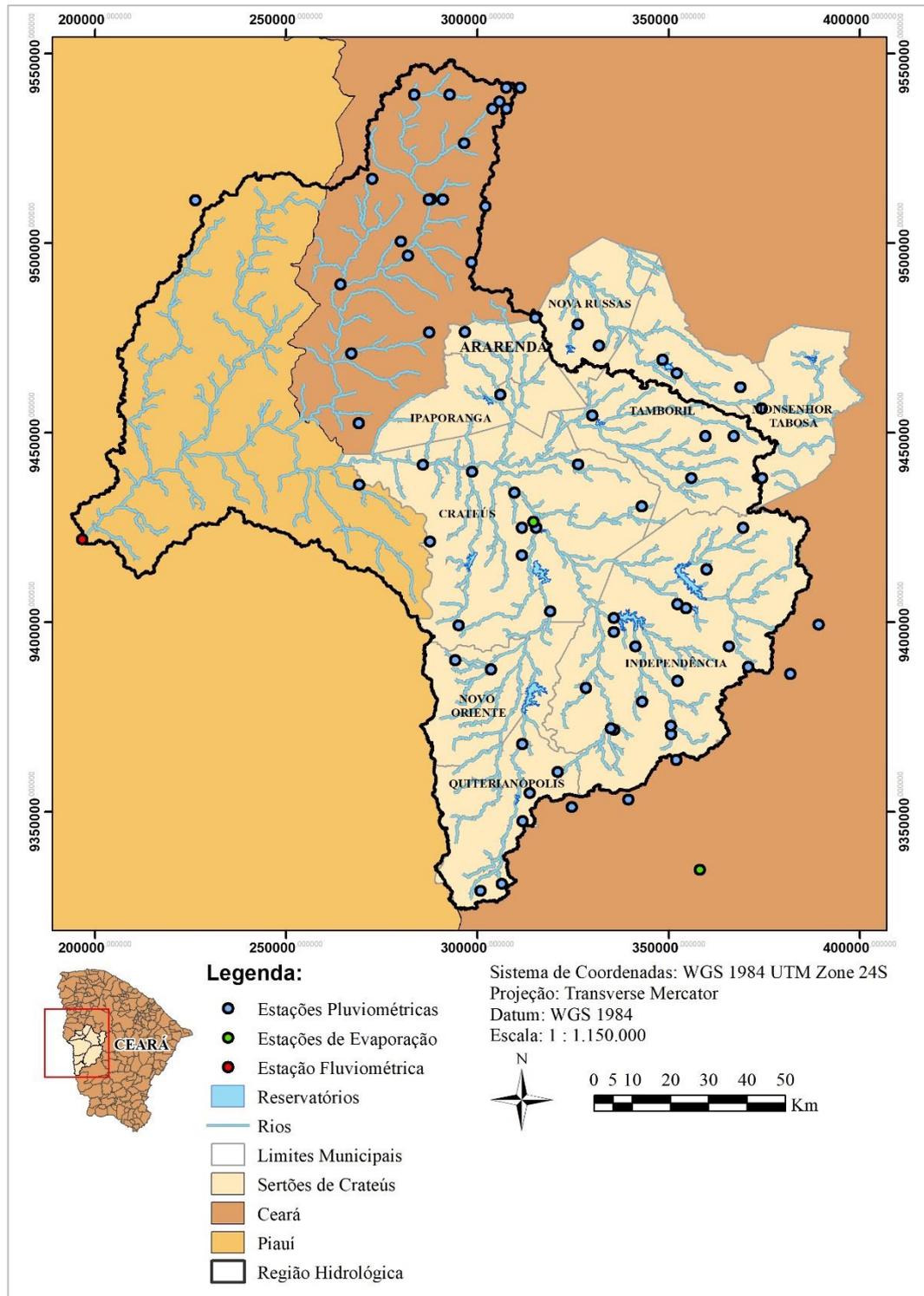
4.1.3 Dados dos Reservatórios

O levantamento de dados dos reservatórios ocorreu em conjunto com a COGERH, os dados levantados foram, curvas cota – área – volume (CAV), capacidade máxima e mínima dos reservatórios e as vazões de saída dos reservatórios para abastecimento das sedes municipais.

Os dados de CAV obtidos foram os dados originais de projeto, dessa forma, por se tratar dos valores projetados, essas CAV's podem apresentar diferenças da realidade, tanto por questões construtivas dos reservatórios, quanto por assoreamento dos mesmos. As CAV's podem ser observadas dos tópicos 3.2.1 ao 3.2.7.

Para os volumes máximos e mínimos dos reservatórios, os mesmos são apresentados na Tabela 2.

Figura 13 - Disposição espacial das estações em estudo.



Fonte: Autoria própria (2019).

4.2 Modelagem do Sistema Chuva – Vazão (SMAP)

Esta seção tem como objetivos demonstrar os passos para a modelagem do sistema chuva – vazão, a mesma possui quatro subseções que contam com os passos necessários, desde a criação de séries de precipitações para a bacia até a calibração de seus parâmetros.

4.2.1 Séries de Precipitação por Bacia

Para o processo de modelagem do sistema é necessário primeiramente a criação de uma série de precipitação média para toda a bacia. Nessa etapa, as séries das estações que possuem influência na bacia são selecionadas e utilizando de um código de programação feito com base na linguagem R, o Thiessen diário e mensal é gerado e resulta em uma resposta de série única e continua no tempo.

Na criação destas séries, as mesmas foram geradas a partir das bacias incrementais dos açudes, portanto, em casos que um reservatório possui outros reservatórios a montante, as áreas da bacia dos reservatórios a montante são descontadas. Dessa forma, a série de precipitação representa apenas a parcela que chega efetivamente ao reservatório em questão, não contabilizando as precipitações que ficaram retidas nos demais reservatórios. Na Figura 14 é demonstrado o resultado do Thiessen para a bacia da estação fluviométrica. O mesmo processo foi repetido para as demais bacias, onde é possível notar a criação de áreas de influência para as estações. Na Figura 15, são apresentadas as bacias incrementais dos reservatórios presentes no estudo.

4.2.2 Séries de Evapotranspiração por Bacia

A evapotranspiração média para as estações de Crateús e Tauá foram obtidas do trabalho de UFC/COGERH (2013). Essas evapotranspirações, assim como para a precipitação, necessitam da criação de uma série para a bacia, entretanto, devido à dificuldade de aquisição de dados referentes a esse fenômeno climático, causado pela pequena quantidade de estações capazes de mensurar a evapotranspiração local, a série será constituída apenas por duas estações. As médias utilizadas para as estações estão expostas na Tabela 4.

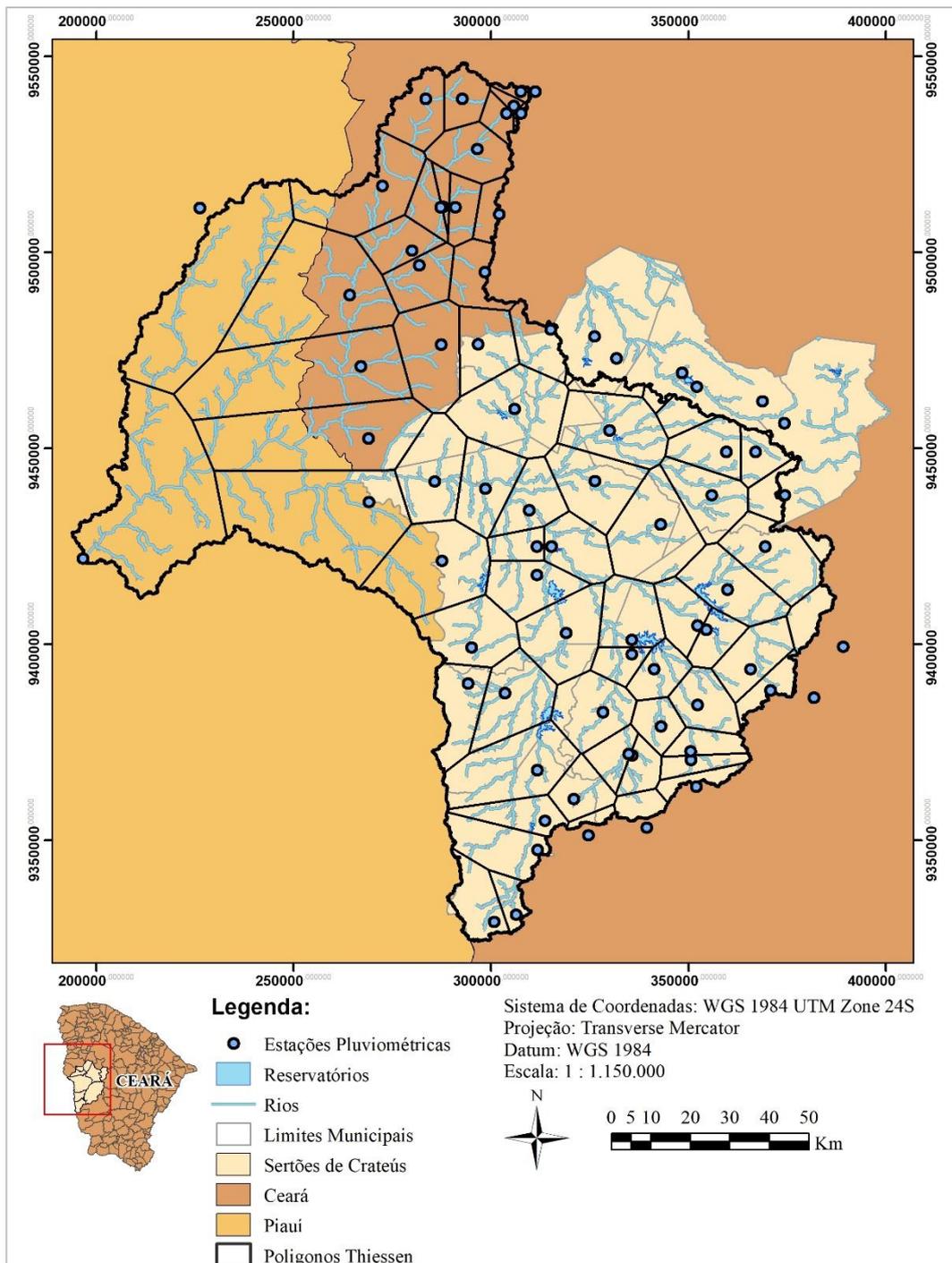
Tabela 4 - Evapotranspiração para estações em milímetros.

| | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Crateús | 199 | 151 | 130 | 118 | 121 | 132 | 148 | 171 | 184 | 203 | 201 | 203 |
| Tauá | 197 | 151 | 147 | 135 | 123 | 120 | 141 | 160 | 175 | 186 | 195 | 199 |

Fonte: UFC/COGERH (2013).

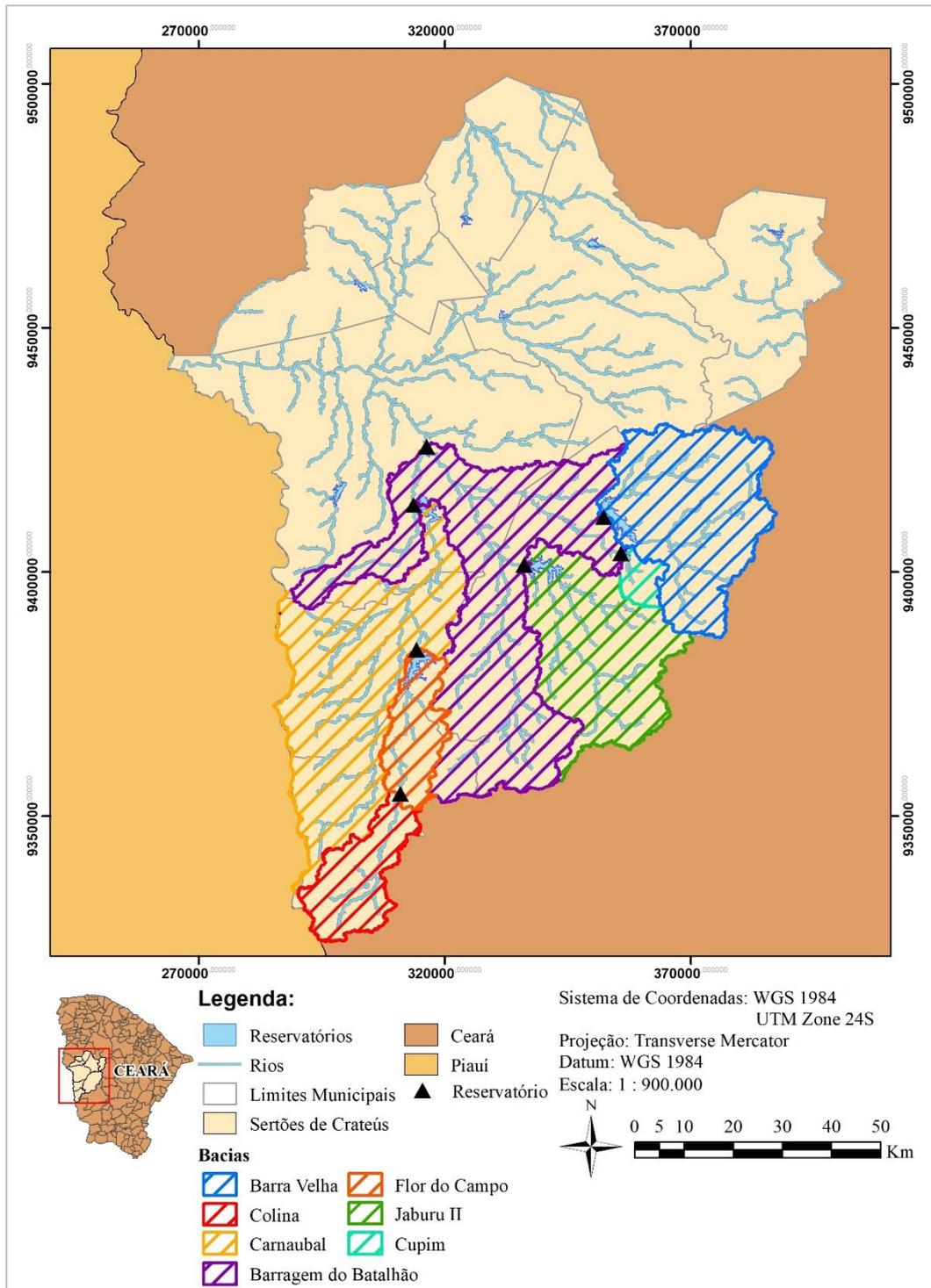
A etapa seguinte é a criação da série para as bacias incrementais com base na metodologia do Thiessen. Com essa metodologia será gerado para cada uma das bacias uma série de evapotranspiração, de forma semelhante a utilizada para a precipitação, sendo assim, apesar de cada uma das estações possuir apenas uma série de dados, ao ser utilizado a metodologia do Thiessen, cada uma das bacias incrementais apresentadas na Figura 15 terá uma série única de evaporação de acordo com a influência da estação sobre a bacia.

Figura 14 - Thiessen para a bacia da estação fluviométrica.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 15 - Bacias incrementais dos reservatórios.



Fonte: Autoria própria (2019).

4.2.3 Calibração dos Parâmetros para Estação Fluviométrica

Por se tratar de um modelo, é inviável a medição real dos parâmetros da bacia, tendo em vista essa inviabilidade é necessário a utilização de uma calibração automática.

Sendo um modelo com seis parâmetros, Sat, PES, Crec, K, Ebin e Tuin, encontrar um valor para esses parâmetros torna-se uma tarefa árdua, mesmo com as aproximações e estudos existentes que mostram que dos seis parâmetros apenas os dois primeiros precisem ser calibrados, essa tarefa ainda se torna um desafio.

Por ser improvável que seja encontrado um valor único para os parâmetros que crie uma série sintética de vazões e que essa série represente com exatidão as vazões observadas, é necessário a incorporação de uma metodologia de medição. Diversas são as metodologias existentes atualmente, as principais são aprimoramentos da formulação de Nash e Sutcliffe (1970), que pode ser vista na equação 10:

$$Nash = 1 - \frac{\sum(Q_{calc} - Q_{obs})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (10)$$

A equação proposta em seu trabalho tem como peso principal o foco nas altas vazões, entretanto, diversos outros tipos de Nash foram apresentados com os anos, dentre essas outras metodologias, existem funções-objetivos com tendência em amenizar os efeitos sazonais, outras com prioridade em vazões baixas, além daqueles que amenizam as altas vazões. Para este trabalho, uma das funções-objetivos utilizadas foi a metodologia original de Nash demonstrada na equação 10.

A segunda função-objetivo utilizada foi o Erro Absoluto, nessa metodologia, o peso se dá na diferença entre as vazões observadas e calculadas, portanto, nessa função os pesos para todas as vazões tornam-se iguais. A formulação para o erro absoluto pode ser vista na equação 11.

$$Erro\ ABS = \sum Abs|Q_{calc} - Q_{obs}| \quad (11)$$

A terceira função-objetivo é conhecida como Raiz do Erro Quadrado Médio ou RMSE, essa formulação assim como o Erro Absoluto, tem enfoque na diferença entre as vazões observadas e calculadas, sem diferenciar onde se dá essa diferença. A equação 12 mostra a equação completa.

$$RMSE = \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{calc})^2}{N} \quad (12)$$

Com a definição das funções-objetivos a serem utilizadas, o processo iniciou-se com a calibração das funções, ajustando uma por vez, iniciando pelo valor de Nash, em seguida do Erro Absoluto e por fim do RMSE. O processo foi repetido para uma série de valores iniciais dos parâmetros até que os resultados se estabilizassem.

4.2.4 Criação de Série Sintética para Reservatórios

Com a calibração dos parâmetros efetuada para a estação fluviométrica e as séries de precipitação e evapotranspiração criadas para as bacias incrementais dos reservatórios, os dados para a criação das séries sintéticas estão completos.

Após essa etapa, é possível a criação das séries sintéticas de vazão para todo o período nos quais existam valores de precipitação e evaporação, tendo a oportunidade de criar séries de vazões de 1912 a 2018.

4.3 Modelagem do Sistema de Reservatórios

A modelagem do sistema de reservatórios se deu por meio do sistema de suporte a decisão LabSid AcquaNet 2013, onde foram modelados os reservatórios do sistema, as demandas e as interligações entre reservatórios e demandas.

4.3.1 Reservatórios

Para a modelagem dos reservatórios foram utilizados os dados levantados de acordo com o tópico 4.1, sendo esses dados as CAV's dos reservatórios, as capacidades máximas e mínimas e utilizado 80% da evaporação total para os mesmos, além das vazões afluentes aos reservatórios, que foram obtidas de acordo com o tópico 4.2.

4.3.2 Demandas

As demandas obtidas foram modeladas de acordo com os dois tipos de usos existentes para os reservatórios, sendo eles, abastecimento humano e outros usos. Essas demandas foram obtidas diretamente com o órgão responsável pelos reservatórios. Para esse estudo, foram criados três cenários, sendo um com as demandas atuais e dois de projeção de demandas, essas projeções são para os anos de 2031 e 2041.

Os dados de projeções populacionais utilizados para a atualização das demandas foram obtidos do projeto Malha D'Água, projeto esse desenvolvido pela Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará. A Tabela 5 mostra os dados populacionais do estudo e na Tabela 6 as demandas atualizadas com base na população apresentada nas projeções. Essas atualizações foram feitas com base no per capita calculado para cada município, onde as novas demandas foram calculadas mantendo o valor per capita como constante e atualizando apenas o valor da população.

Tabela 5 - Projeção da população.

| | 2031 | 2041 |
|------------------------|--------|--------|
| Crateús | 68.381 | 76.009 |
| Independência | 17.389 | 21.197 |
| Novo Oriente | 21.568 | 26.291 |
| Quiterianópolis | 9.556 | 11.649 |

Fonte: Ceará (2017).

Tabela 6 - Demandas de água em m³/s por município.

| | 2019 | | 2031 | | 2041 | |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | AH | OU | AH | OU | AH | OU |
| Crateús | 0,135 | 0,005 | 0,157 | 0,005 | 0,175 | 0,005 |
| Independência | 0,035 | 0,005 | 0,047 | 0,005 | 0,057 | 0,005 |
| Novo Oriente | 0,045 | 0,005 | 0,059 | 0,005 | 0,071 | 0,005 |
| Quiterianópolis | 0,017 | 0,003 | 0,020 | 0,003 | 0,025 | 0,003 |

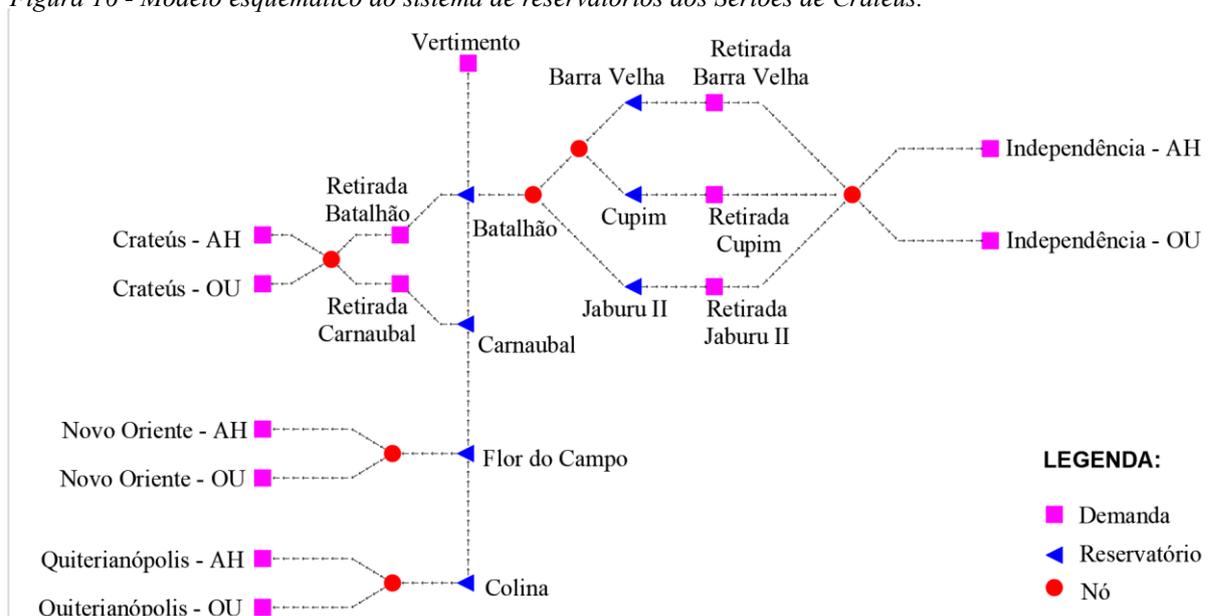
Fonte: Autoria própria (2019).

4.3.3 Simulações

As simulações do sistema ocorreram com o modelo de simulação contínua e com o método de calibração do software LabSid Acquanet 2013, para essas simulações foram utilizados um total de 107 anos, com o período indo de 1912 a 2018.

O sistema esquemático elaborado para as simulações pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 - Modelo esquemático do sistema de reservatórios dos Sertões de Crateús.



O esquema foi feito de forma a reproduzir as duas demandas para cada município, para isso, foram utilizados nós e nos casos em que existe mais de um reservatório no município que pode abastecer-lo, foram criadas demandas de retirada, essas demandas tem como função escolher o reservatório no qual será retirado prioritariamente o volume para abastecimento, assim como fracionar a retirada.

Com o sistema elaborado, as simulações foram efetuadas para os cinco anos de estudo, conforme os cenários apresentados nas demandas. E para o abastecimento do município de Crateús foi considerado duas possibilidades, abastecimento total pelo Açude Carnaubal e abastecimento compartilhado entre o Açude Carnaubal e a Barragem do Batalhão, sendo 75% e 25%, respectivamente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção irá tratar sobre os resultados obtidos nas etapas apresentadas na seção de metodologia, sendo elas a calibração do modelo chuva-vazão, o cálculo das séries pseudo-históricas e da operação dos reservatórios, além de discutir os resultados obtidos.

5.1 Modelo Chuva-Vazão

Para o modelo chuva-vazão serão apresentados os resultados para a calibração do sistema, para o cálculo das séries pseudo-históricas organizadas por reservatório e da operação dos reservatórios do sistema, sendo apresentado para esta última etapa os resultados para todos os cenários.

5.1.1 Calibração da Estação Fluviométrica

Após as séries de tentativas de calibração da estação fluviométrica, obteve-se como melhor resultado de calibração a série presente no Gráfico 18. Esta série foi resultado da calibração dos parâmetros por meio da maximização da função-objetivo de Nash, com o período de calibração entre os anos de 1965 e 1987, esse período utilizado teve como justificativa ser o período anterior a construção dos maiores reservatórios da região, de forma a obter as vazões naturais para a região. Como resultado dessa calibração, tem-se os parâmetros apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros calibrados para estação fluviométrica 34750000.

| Parâmetro | Valor Calibrado |
|-----------|-----------------|
| Sat | 1333,00 |
| PES | 3,48 |
| Crec | 0,00 |
| K | 3,00 |
| Tuin | 20,00 |
| Ebin | 0,00 |

Fonte: Autoria própria (2019).

Durante o processo de calibração, Crec foi mantido com o valor 0, assim como exposto no tópico 2.4, ainda segundo o mesmo tópico, o modelo não possui sensibilidade para o valor de K, portanto, esses parâmetros não entraram para a calibração. Os valores de Tuin e de Ebin tiveram sua calibração feita de forma manual, de acordo com as condições iniciais do sistema. Portanto apenas os valores de Sat e de PES foram calibrados de forma automática.

Como resultado dos parâmetros obtidos, as funções-objetivos utilizadas durante o processo de calibração tiveram resultados conforme a Tabela 8.

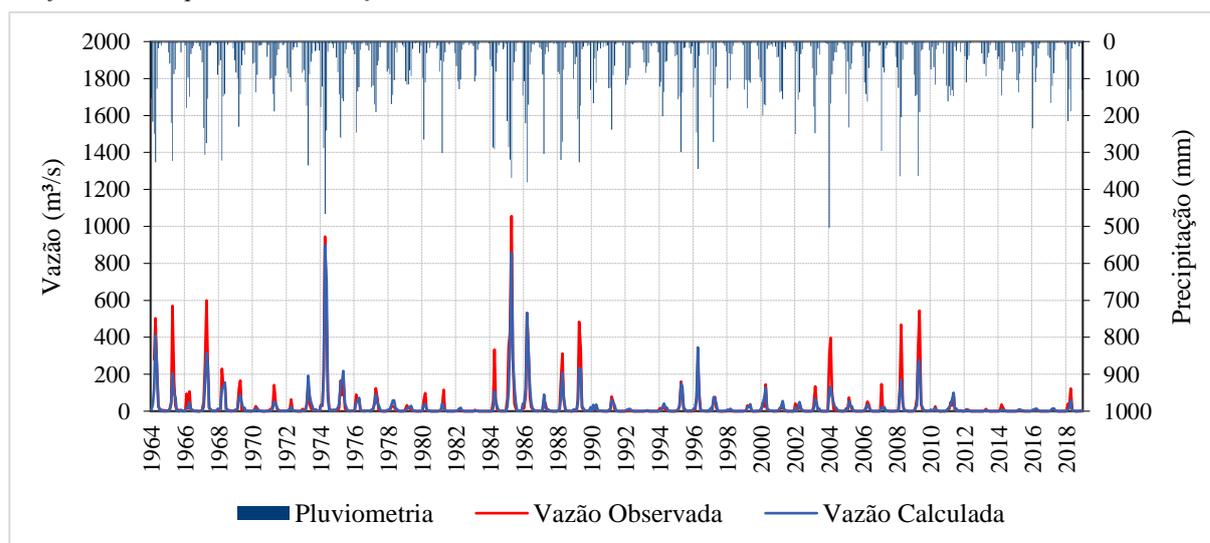
Tabela 8 - Resultado para funções-objetivos.

| Nash | Erro Abs. | RMSE |
|-------|-----------|--------|
| 0,865 | 7995,346 | 38,961 |

Fonte: Autoria própria (2019).

A maximização do valor de Nash ocorreu pela utilização do componente de análises estatísticas *Solver*, com o algoritmo *Evolutionary*. Esse processo resultou em um valor de Nash de 86,5% de aproximação dos resultados, esse valor elevado demonstra a alta taxa de representatividade das séries calculadas em comparação com as observadas. Os valores para as demais funções objetivos também é apresentado, no entanto, a minimização dos mesmos implica na diminuição do valor de Nash.

Gráfico 18 - Resposta da calibração do modelo chuva-vazão.



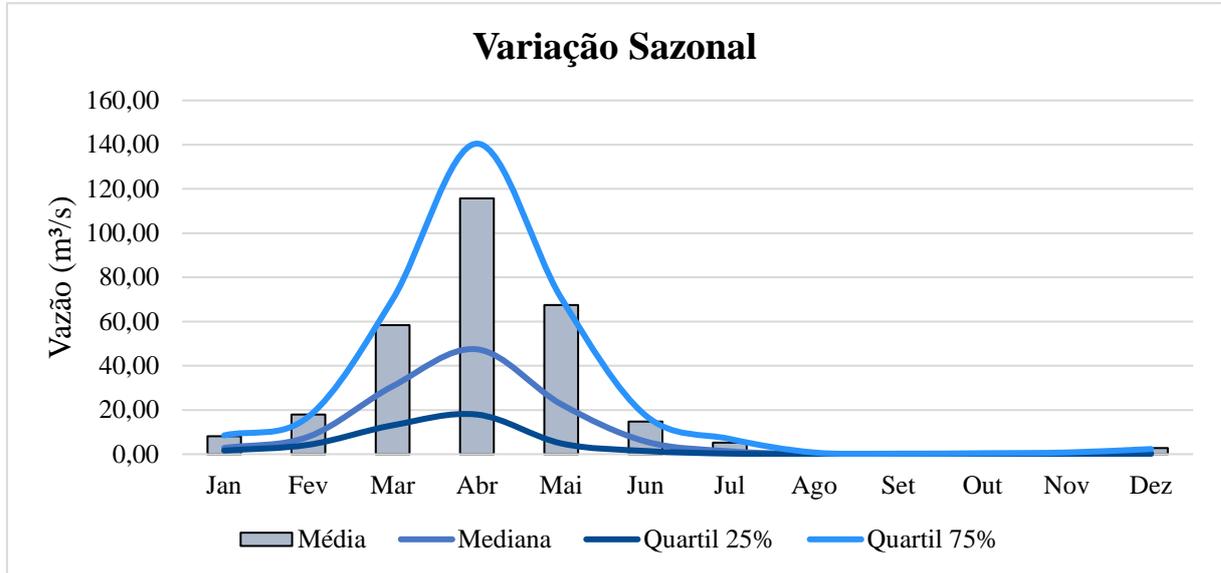
Fonte: Autoria própria (2019).

Ao observar o Gráfico 18, é possível notar um bom ajuste da vazão calculada para as vazões baixas do sistema, entretanto, para os picos a representação torna-se menos precisa, tendo os anos de 1974 e de 1986 como as melhores representações.

No Gráfico 19, é apresentada a variação sazonal das vazões calculadas do sistema, apresentando sua média, mediana e os quartis de 25% e 75%, esses valores foram calculados de forma mensal. É possível notar com a análise do Gráfico 19 que as vazões do sistema seguem uma distribuição normal, tendo nos meses de março, abril e maio os maiores escoamentos em decorrência do período chuvoso que acontece nos meses de fevereiro, março e abril para essa

região. Nos meses de fora desse período, são observadas pequenas vazões, não possuindo vazões nos meses de agosto, setembro, outubro e novembro.

Gráfico 19 - Resultados estatísticos das vazões calculadas.



Fonte: Autoria própria (2019).

5.1.2 Cálculo das Séries Pseudo-Históricas

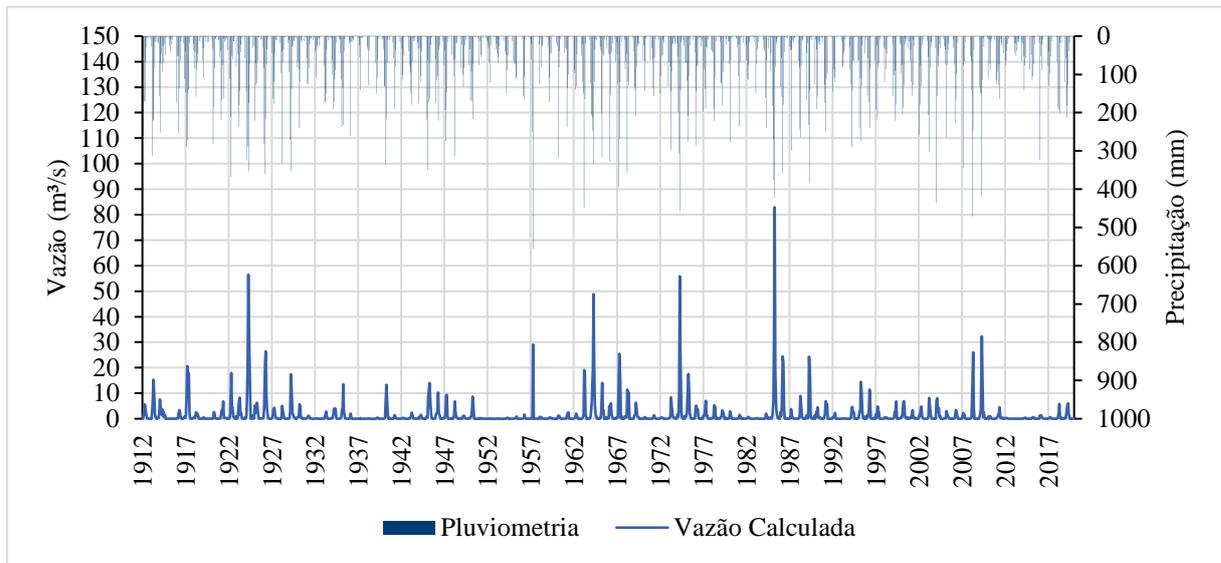
Esta subseção conta com a apresentação dos resultados das séries pseudo-históricas para os reservatórios em estudo, com o uso dos parâmetros calibrados para a estação fluviométrica 34750000.

5.1.2.1 Açude Carnaubal

Para o Açude Carnaubal, a série pseudo-histórica resultante da transformação de chuva em vazão é apresentada no Gráfico 20.

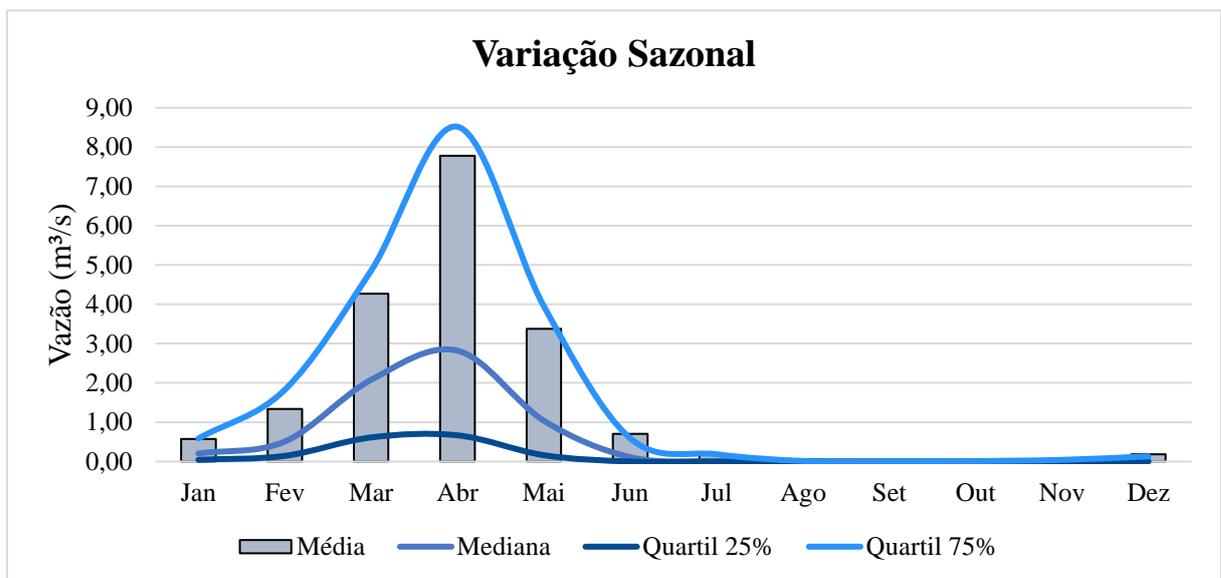
A série resultante conta com um total de 107 anos de dados, sendo estes de 1912 a 2018. A variação sazonal para este reservatório é apresentada no Gráfico 21, os dados apresentados são as médias, medianas e os quartis de 25% e de 75%, e o comportamento das vazões afluentes deste reservatório seguem a mesma tendência da estação fluviométrica, onde, as maiores vazões encontram-se entre os meses de março a maio, já nos períodos de agosto a novembro o escoamento da bacia encontra-se zerado. Para a bacia do Açude Carnaubal, as vazões médias máximas ocorrem no mês de abril e possuem ordem de grandeza de aproximadamente $7,6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Gráfico 21 - Série pseudo-histórica de vazão para o Açude Carnaubal.



Fonte: Autoria própria (2019).

Gráfico 20 - Resultados estatísticos para as vazões afluentes calculadas para o Açude Carnaubal.



Fonte: Autoria própria (2019).

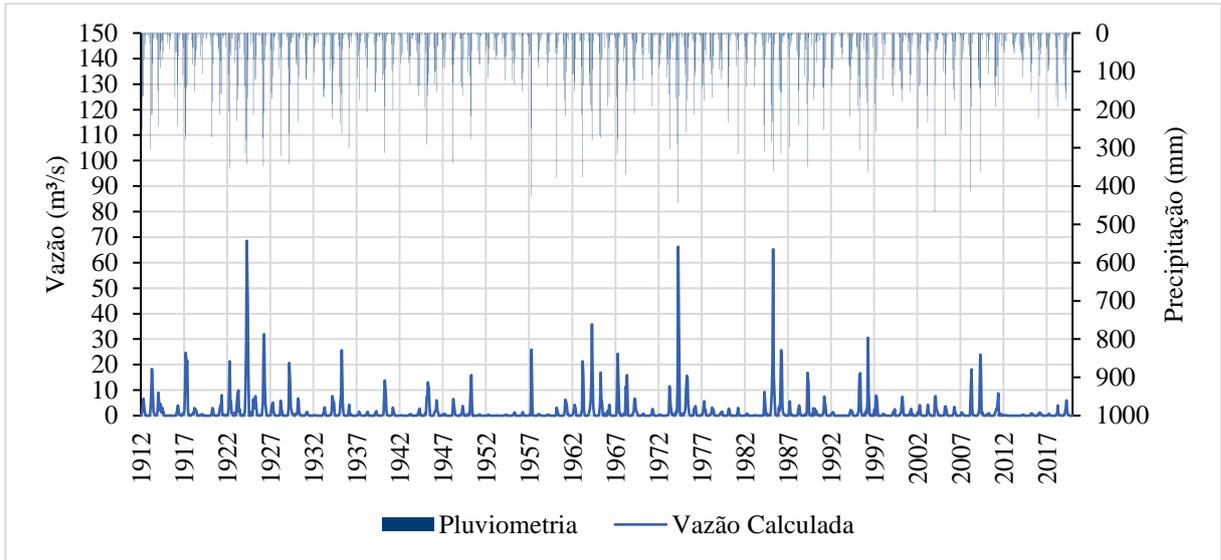
5.1.2.2 Barragem Batalhão

Para a Barragem do Batalhão, a série sintética de vazões resultante é apresentada no Gráfico 22. A série possui um total de 107 anos de dados, tendo início no ano de 1912 e fim no ano de 2018.

No Gráfico 23 é observado os resultados estatísticos referentes a série sintética de vazões para este reservatório, contendo as médias, medianas e os quartis de 25% e 75%, esses valores são demonstrados de forma mensal, dessa forma, é possível concluir que a bacia deste

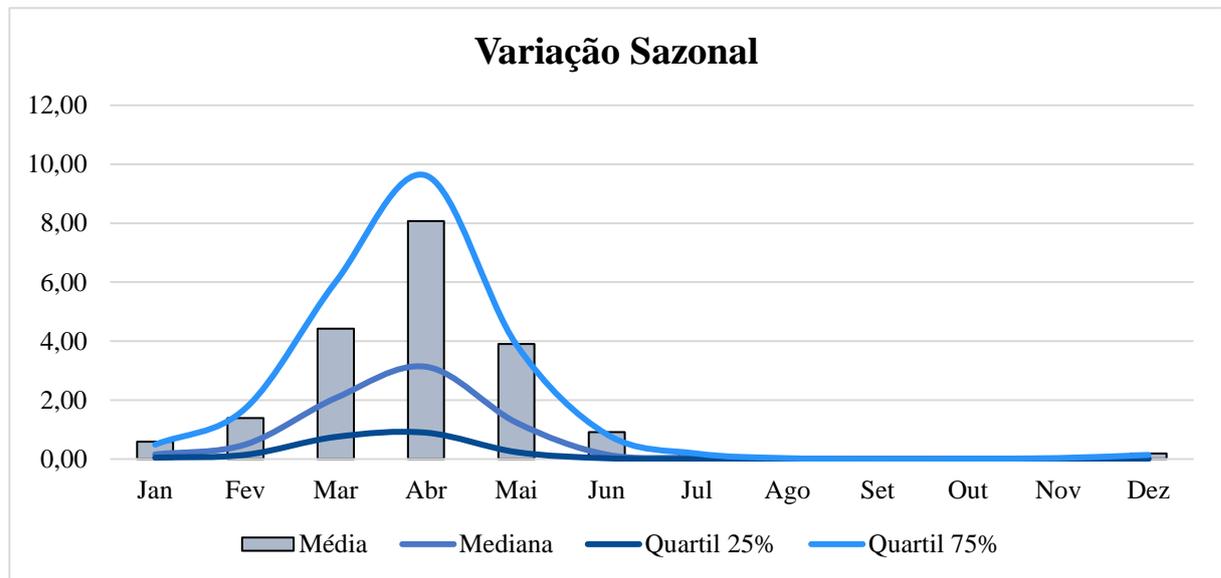
reservatório conta com o mesmo formato de regime, onde o escoamento da bacia ocorre em grande parte apenas nos meses de março a maio, tendo nos meses de dezembro a fevereiro o crescimento gradual das vazões e nos meses de junho e julho, o decréscimo dessas vazões, onde encontram nos meses de agosto a novembro escoamento nulo.

Gráfico 23 - Série pseudo-histórica de vazão para a Barragem do Batalhão.



Fonte: Autoria própria (2019).

Gráfico 22 - Resultados estatísticos para as vazões afluentes calculadas para a Barragem do Batalhão



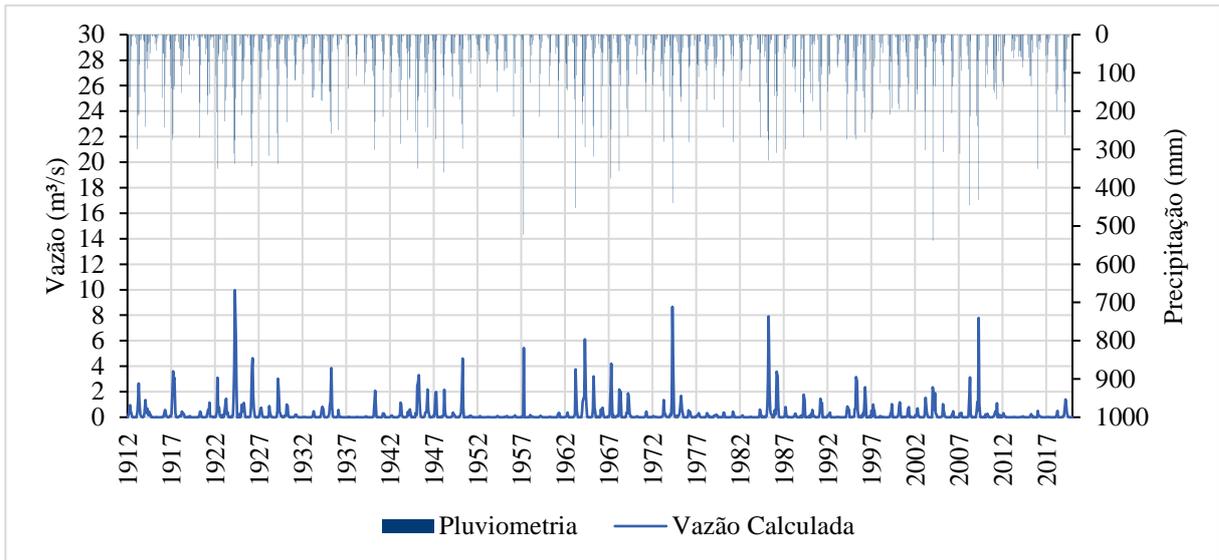
Fonte: Autoria própria (2019).

Assim como para o Açude Carnaubal, a Barragem do Batalhão tem sua vazão média máxima no mês de abril, onde a vazão é de aproximadamente 8 m³/s.

5.1.2.3 Açude Flor do Campo

O resultado do processo de transformação de chuva em vazão para a bacia do Açude Flor do Campo pode ser visto no Gráfico 24, onde é apresentada as vazões calculadas para esta bacia entre os anos de 1912 a 2018.

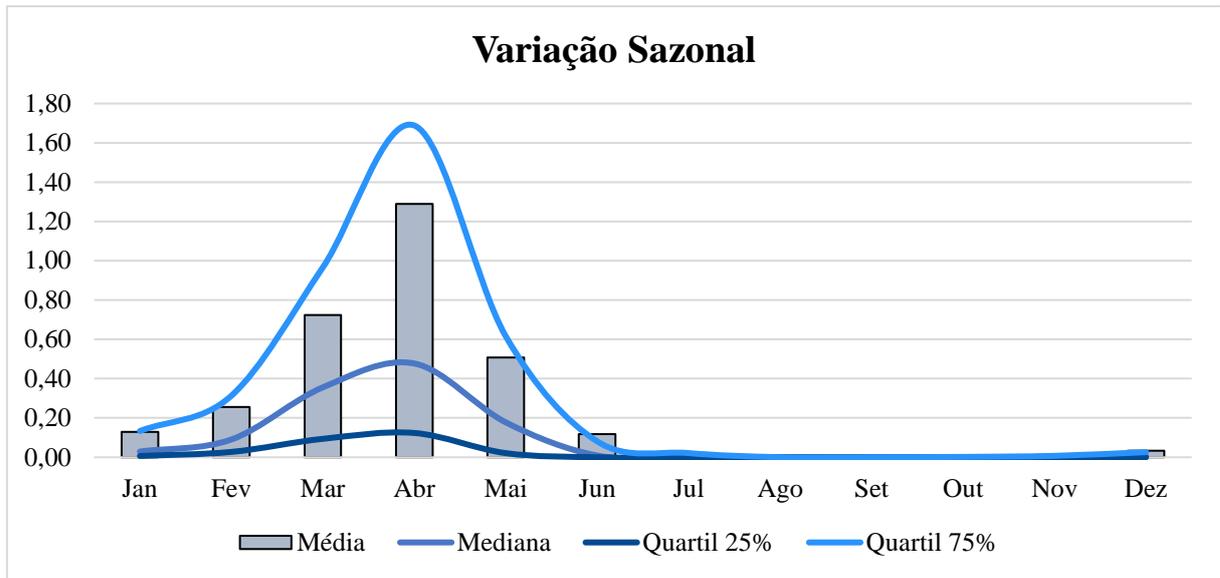
Gráfico 24 - Série pseudo-histórica de vazão para o Açude Flor do Campo.



Fonte: Autoria própria (2019).

No Gráfico 25, é apresentado os valores referentes aos resultados estatísticos da série apresentada no Gráfico 24, mostrando a média, mediana e os quartis de 25% e 75%, esses valores são apresentados de forma mensal. Assim como para as demais bacias, para o Açude Flor do Campo, os meses com maior escoamento são os meses de março a maio, com média para o mês de maior vazão de aproximadamente 1,3 m³/s, acontecendo no mês de abril, para os meses de agosto a novembro o escoamento na bacia é nulo.

Gráfico 25 - Resultados estatísticos para as vazões afluentes calculadas para o Açude Flor do Campo.

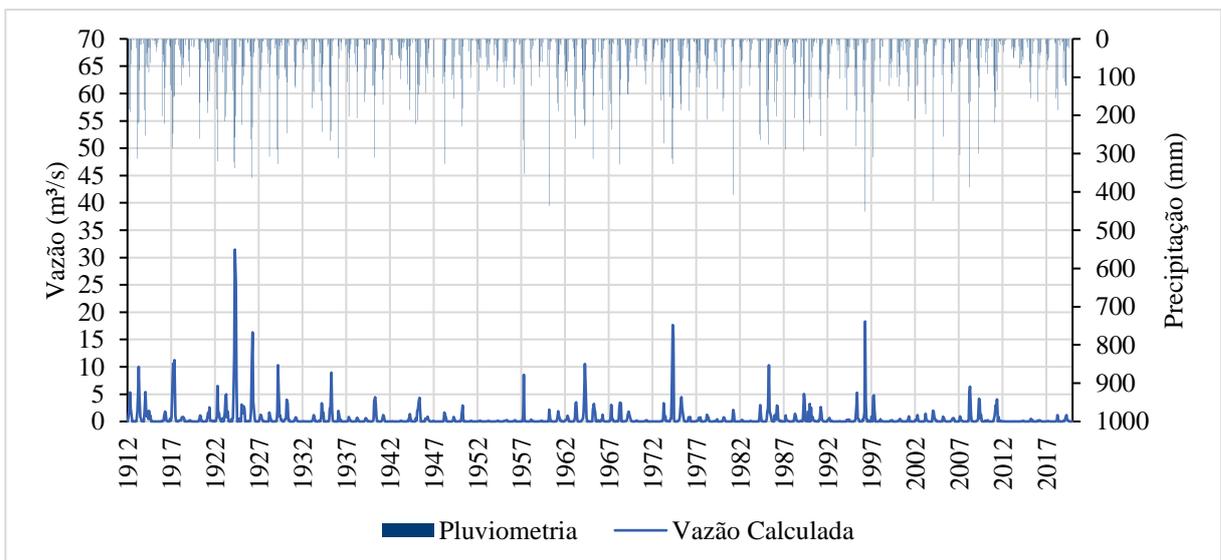


Fonte: Autoria própria (2019).

5.1.2.4 Açude Jaburu II

Para o Açude Jaburu II, tem-se no Gráfico 26 a resposta para o processo de cálculo das vazões pseudo-históricas, assim como os demais, o período desta série vai do ano de 1912 ao ano de 2018.

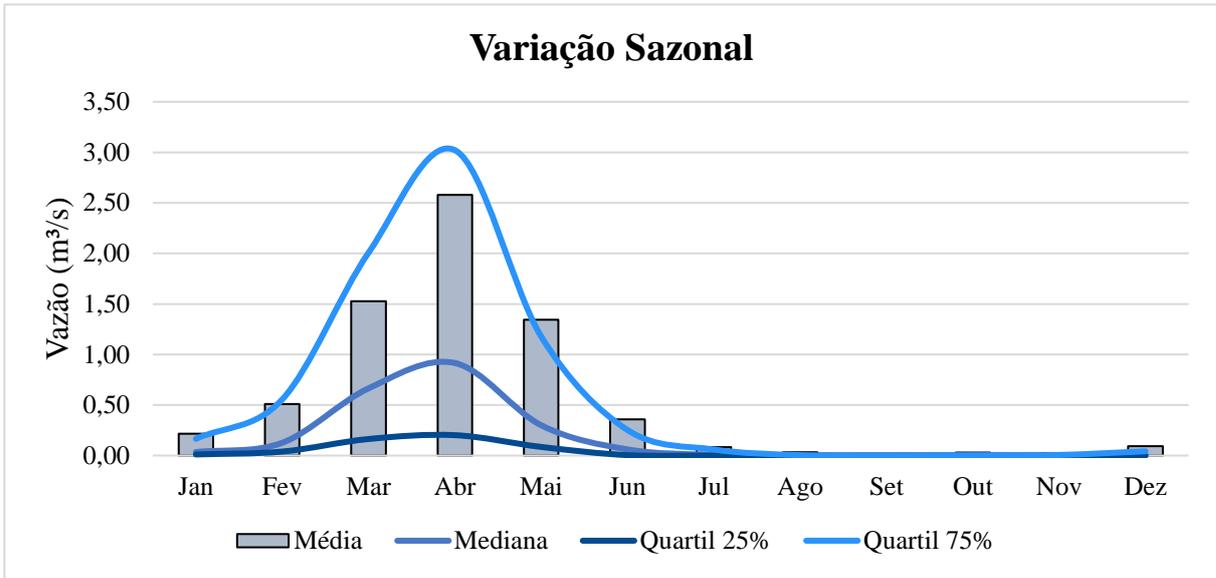
Gráfico 26 - Série pseudo-histórica de vazões para o Açude Jaburu II.



Fonte: Autoria própria (2019).

No Gráfico 27 é apresentado a resposta estatística da série de vazões, onde é possível observar a média, a mediana e os quartis de 25% e de 75%, as estatísticas foram elaboradas para o formato mensal desta série.

Gráfico 27 - Resultados estatísticos para as vazões afluentes calculadas para o Açude Jaburu II.



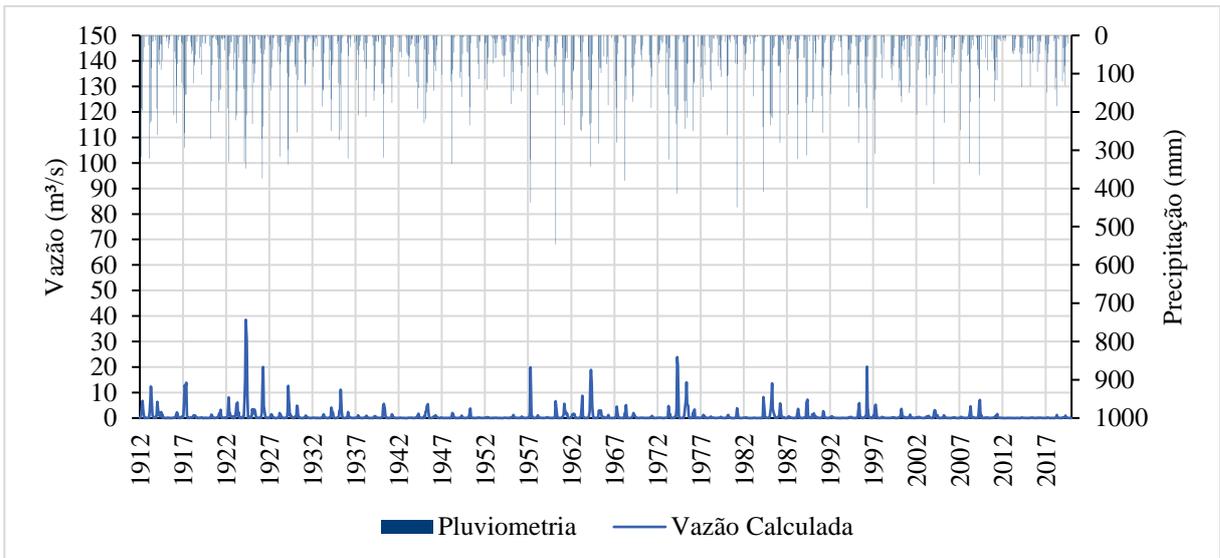
Fonte: Autoria própria (2019).

Nesta representação, é observado que, como os demais reservatórios da região, o período de escoamento da bacia ocorre principalmente nos meses de março a maio, tendo no mês de abril uma média de aproximadamente $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$, já para o período de agosto a novembro o escoamento é nulo.

5.1.2.5 Açude Barra Velha

Para o Açude Barra Velha, a série pseudo-histórica é apresentada no Gráfico 28.

Gráfico 28 - Série pseudo-histórica de vazão para o Açude Barra Velha.

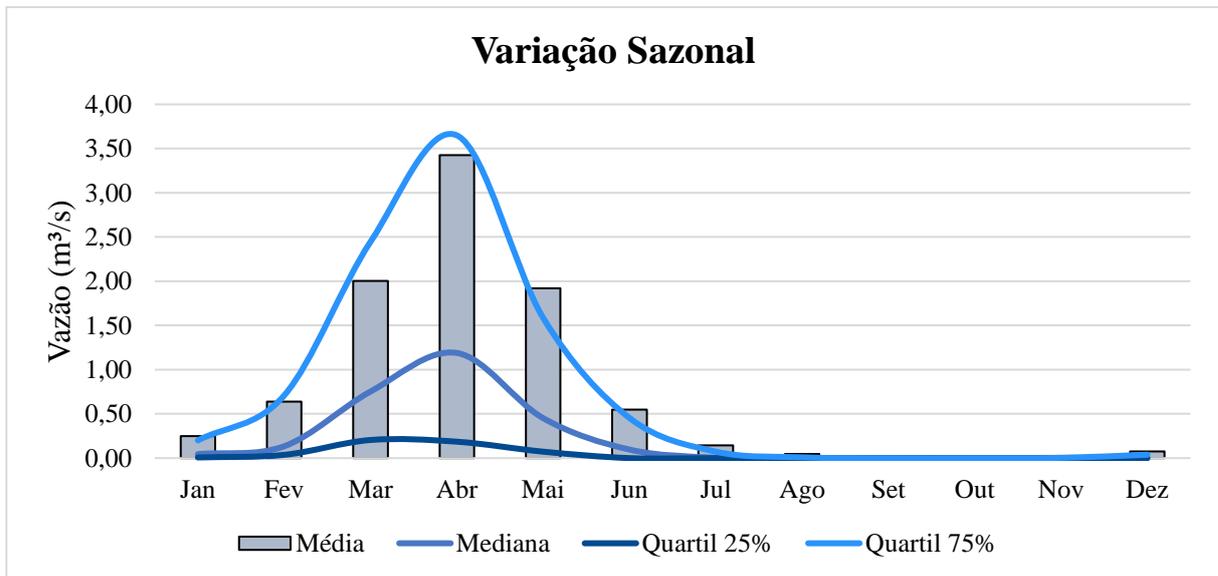


Fonte: Autoria própria (2019).

A variação sazonal para este reservatório é apresentada no Gráfico 29, os dados apresentados são as médias, medianas e os quartis de 25% e de 75%, e o comportamento das vazões afluentes deste reservatório seguem o mesmo comportamento das demais bacias da região, onde, as maiores vazões estão entre os meses de março e maio, já nos períodos de agosto a novembro o escoamento é nulo.

Para a bacia do Açude Barra Velha, as vazões médias máximas ocorrem no mês de abril e possuem ordem de grandeza de aproximadamente 3,5 m³/s.

Gráfico 29 - Resultados estatísticos para as vazões afluentes calculadas para o Açude Barra Velha.

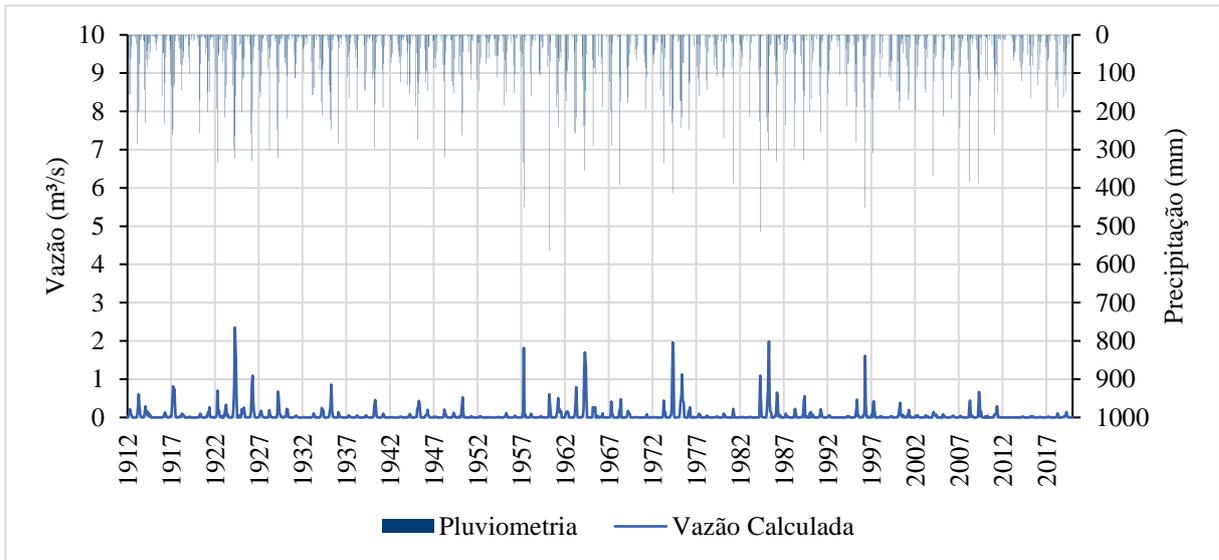


Fonte: Autoria própria (2019).

5.1.2.6 Açude Cupim

Para a bacia do Açude Cupim, os resultados para o modelo chuva-vazão são apresentados no Gráfico 30.

Gráfico 30 - Série pseudo-histórica de vazão para o Açude Cupim.

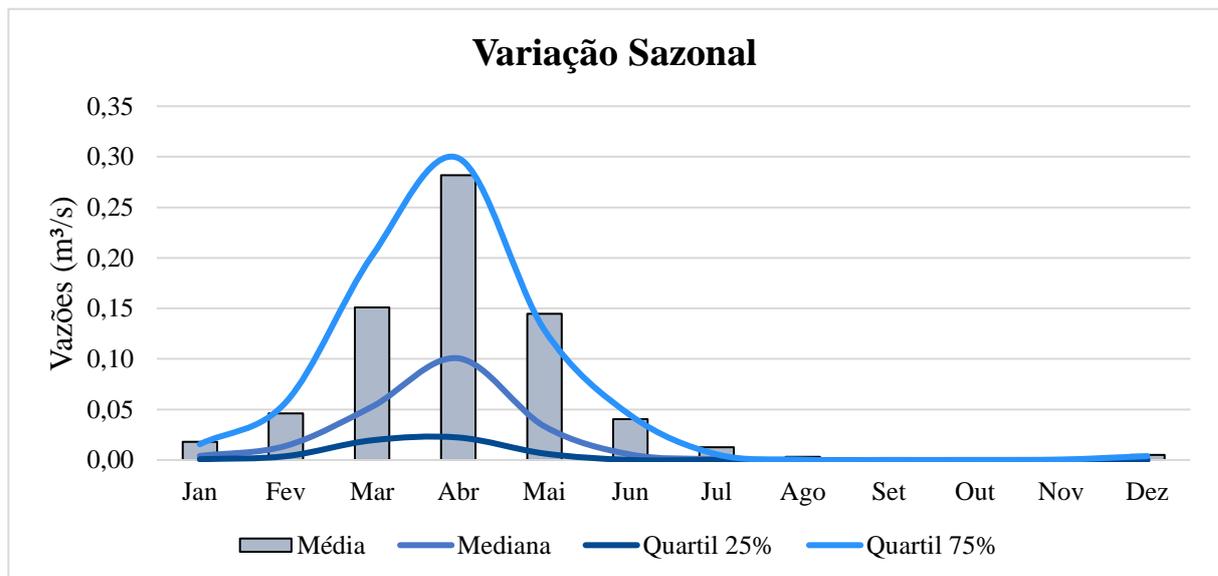


Fonte: Autoria própria (2019).

No Gráfico 31 é apresentada a resposta estatística da série de vazões, onde é possível observar a média, a mediana e os quartis de 25% e de 75%, as estatísticas foram elaboradas para o formato mensal desta série.

Ao ser observado o Gráfico 31, é percebido que, o escoamento da bacia ocorre principalmente nos meses de março a maio, tendo no mês de abril uma média de aproximadamente 0,27 m³/s, já para o período de agosto a novembro o escoamento é nulo. Sendo esse o reservatório com menor média de afluência do estudo.

Gráfico 31 - Resultados estatísticos para as vazões afluentes calculadas para o Açude Cupim.

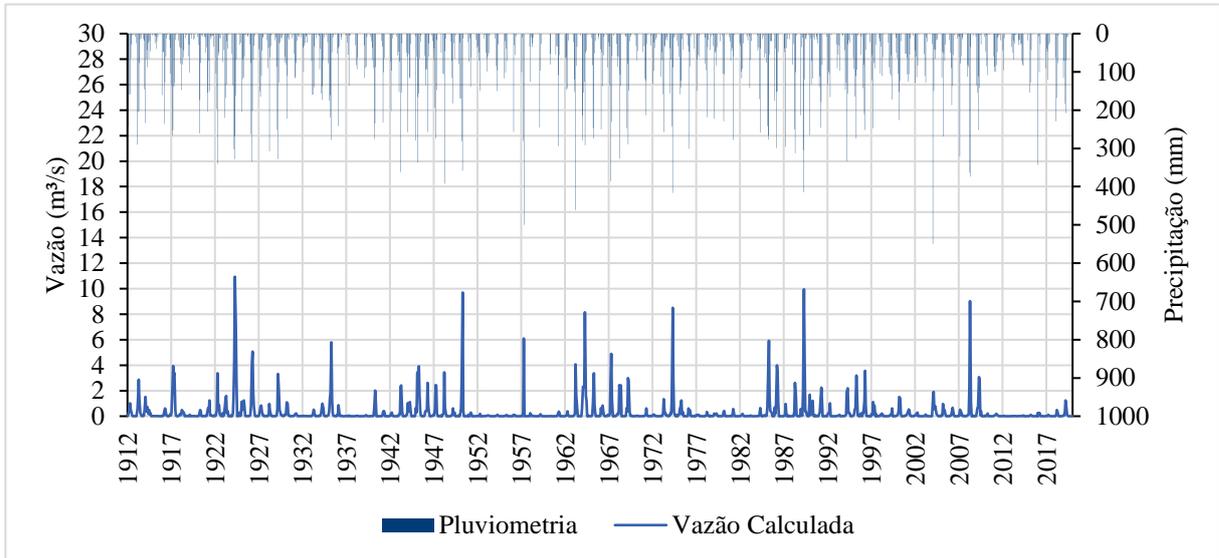


Fonte: Autoria própria (2019).

5.1.2.7 Açude Colina

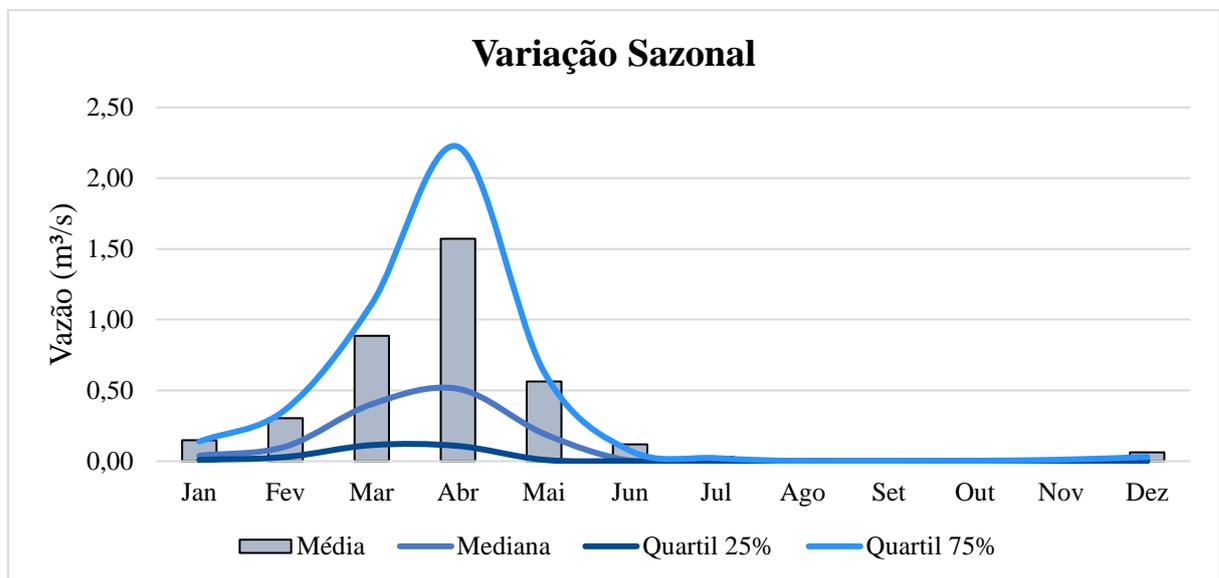
Para o Açude Colina, a série pseudo-histórica resultante da transformação de chuva em vazão é apresentada no Gráfico 32.

Gráfico 33 - Série pseudo-histórica de vazão para o Açude Colina.



Fonte: Autoria própria (2019).

Gráfico 32 - Resultados estatísticos para as vazões afluentes calculadas para o Açude Colina.



Fonte: Autoria própria (2019).

A série resultante, com período de 1912 a 2018, foi trabalhada estatisticamente e o resultado desse processo é apresentada no Gráfico 33, os dados apresentados são as médias, medianas e os quartis de 25% e de 75%, assim como as demais bacias, para o Colina é apresentado as maiores vazões entre os meses de março a maio, já nos períodos de agosto a

novembro não possui escoamento. Para a bacia do Açude Colina, as vazões médias máximas ocorrem no mês de abril e possuem ordem de grandeza de aproximadamente 1,5 m³/s.

5.2 Operação de Reservatórios

Nesta seção serão apresentados os resultados da operação dos reservatórios. A mesma está subdividida em cinco subseções referentes aos cenários de estudo: 2019, 2031 e 2041. Já as subseções dos cenários contam com a divisão dos resultados para os municípios, que por sua vez está subdividido no(s) reservatório(s) e no abastecimento.

Para os reservatórios Carnaubal e Batalhão são mostrados os resultados para o abastecimento da cidade de Crateús por dois métodos, abastecimento completo pelo Carnaubal e abastecimento compartilhado de 75% para o Carnaubal e 25% para o Batalhão.

Para esse estudo, foram utilizados três volumes de referência que subdividem o volume do reservatório em quatro níveis, esses volumes de referência são: 15%, 50% e 85%. As classes são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Intervalos para níveis dos reservatórios.

| | Intervalo |
|----------------|------------------|
| Nível 1 | 100% — 85% |
| Nível 2 | 85% — 50% |
| Nível 3 | 50% — 15% |
| Nível 4 | 15% — 0% |

Fonte: Autoria própria (2019).

5.2.1 Crateús

Este tópico apresenta os resultados obtidos para o município de Crateús, passando pelos resultados dos reservatórios e para o abastecimento, sendo estes resultados referentes a todos os cenários trabalhados.

5.2.1.1 Reservatórios

5.2.1.1.1 Açude Carnaubal

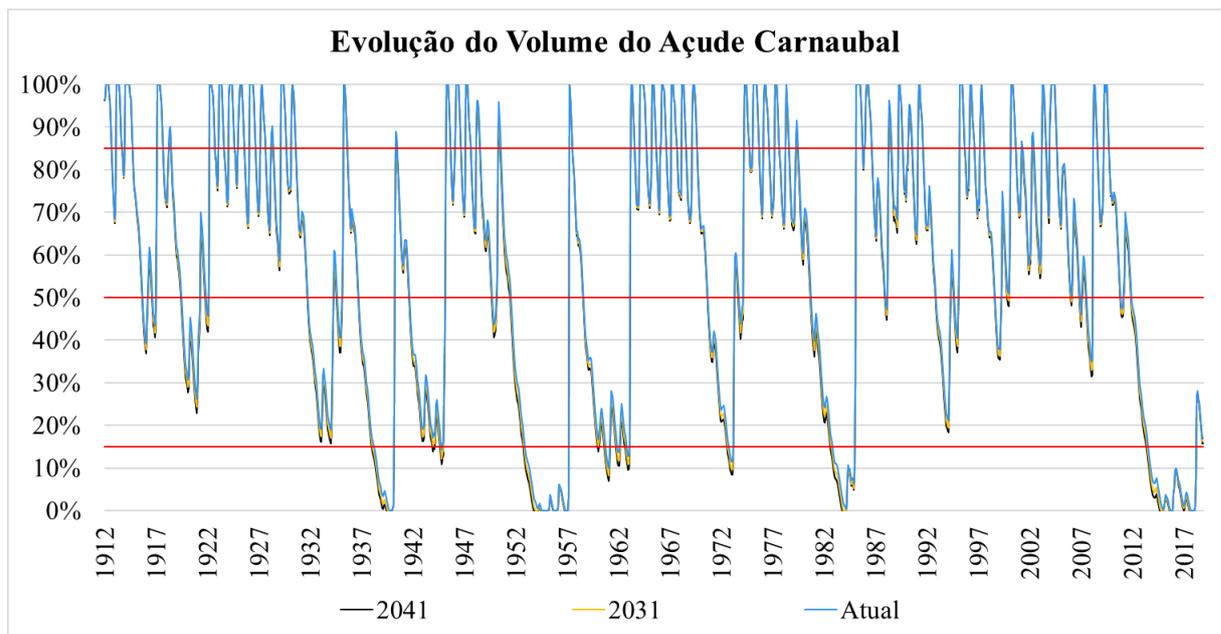
Para o Açude Carnaubal, os resultados são divididos em abastecimento único e abastecimento compartilhado, para o abastecimento único, o reservatório suporta toda a demanda do município, para o abastecimento compartilhado o reservatório suporta 75% da demanda do município.

5.2.1.1.1.1 Abastecimento Único

Este tópico apresenta os resultados para a operação do Açude Carnaubal para o modelo de abastecimento único, as demandas de retirada do reservatório correspondem a totalidade das demandas do município. Esses valores são apresentados de 0,14, 0,162 e 0,18 m³/s respectivamente para os cenários atual, 2031 e 2041, a série de evolução volumétrica do Açude Carnaubal é apresentada no Gráfico 34.

Para esse modelo de abastecimento, os períodos críticos ocorreram nos anos de 1939, sendo o primeiro ano no qual o reservatório chega a zerar, o segundo período crítico corre entre os anos de 1954 e de 1957, sendo o maior período de deficiência do sistema, além desse período, o reservatório ainda fica abaixo do volume de 15% em dois outros períodos, entre os anos de 1983 e de 1985 e entre os anos de 2013 a 2018.

Gráfico 34 - Evolução do volume do Açude Carnaubal com abastecimento único.



Fonte: Autoria própria (2019).

Ao analisar o gráfico, nota-se a diminuição da garantia do sistema, sendo o modelo de abastecimento único o que força o sistema as piores condições, fazendo com que o mesmo tenha seu volume igual ao volume morto em mais períodos da série.

Com os dados da Tabela 10, torna-se perceptível que o sistema passa para o cenário atual um total de 61,21% do tempo com volumes superiores a 50%, para os cenários de 2031 e 2041, esse valor decaiu respectivamente para 60,13% e 59,04%. Essa diminuição do tempo em que o reservatório se encontra nos níveis 1 e 2, ao passo que para o nível 4 o reservatório passa

de 13,79% no cenário atual para 14,88% em 2031 e 15,81% em 2041, demonstra que o volume do reservatório tem como tendência diminuir a sua garantia.

Segundo a Tabela 11, o reservatório leva em média 23,59 meses para retornar a volumes superiores a 85% para o cenário atual, para o cenário de 2031 e 2041 o tempo médio é respectivamente, 17,92 e 18,13 meses. Para o volume de 50%, é necessário 19,97 meses, nos demais cenários os tempos médios são de 18,85 e 19,43 meses. Para o volume de referência de 15%, no cenário atual o tempo médio é de 19,95 meses, para o cenário de 2031 são necessários 21,52 meses, já para o cenário de 2041 o tempo médio decresce e passa a ser 18,72 meses. É visto que para esses cenários o tempo médio para todos os níveis decresce em relação ao atual, com exceção do cenário de 2031 para o volume de 15%, isso se dá devido ao aumento do número de meses nos quais o volume fica muito próximo ao volume de referência, fazendo com que a média final possua grandes variações.

Tabela 10 - Frequência de volume por nível do Açude Carnaubal para abastecimento único.

| Intervalo | Atual | | 2031 | | 2041 | |
|------------------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| | Freq. | % | Freq. | % | Freq. | % |
| Nível 1 | 301 | 23,44% | 290 | 22,59% | 280 | 21,81% |
| Nível 2 | 485 | 37,77% | 482 | 37,54% | 478 | 37,23% |
| Nível 3 | 321 | 25,00% | 321 | 25,00% | 323 | 25,16% |
| Nível 4 | 177 | 13,79% | 191 | 14,88% | 203 | 15,81% |

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 11 - Tempo para recuperação do volume para Açude Carnaubal com abastecimento único.

| Limite | Atual | 2031 | 2041 |
|---------------|--------------|-------------|-------------|
| 85% | 23,59 | 17,92 | 18,13 |
| 50% | 19,97 | 18,85 | 19,43 |
| 15% | 19,95 | 21,52 | 18,72 |

Fonte: Autoria própria (2019).

Na Tabela 12, é possível verificar a transição entre os níveis, a tabela coloca em termos de porcentagem a quantidade de vezes nas quais o reservatório estava em um determinado nível e no qual estava no mês seguinte.

Tabela 12 - Frequência de transição entre níveis para o Açude Carnaubal com abastecimento único.

| | | Mês i+1 | | | | | | | | | | | |
|-------|----|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | Atual | | | | 2031 | | | | 2041 | | | |
| Mês i | | N1 | N2 | N3 | N4 | N1 | N2 | N3 | N4 | N1 | N2 | N3 | N4 |
| | N1 | 19,47 | 3,89 | 0,00 | 0,00 | 18,93 | 4,91 | 0,00 | 0,00 | 18,38 | 5,14 | 0,00 | 0,00 |
| | N2 | 3,66 | 32,32 | 1,71 | 0,00 | 3,35 | 31,46 | 3,27 | 0,00 | 3,12 | 31,07 | 3,58 | 0,00 |
| | N3 | 0,16 | 1,40 | 22,66 | 0,78 | 0,16 | 1,17 | 21,42 | 2,34 | 0,16 | 1,01 | 21,26 | 2,65 |
| | N4 | 0,08 | 0,00 | 0,62 | 13,08 | 0,08 | 0,00 | 0,31 | 12,62 | 0,08 | 0,00 | 0,31 | 13,24 |

Fonte: Autoria própria (2019).

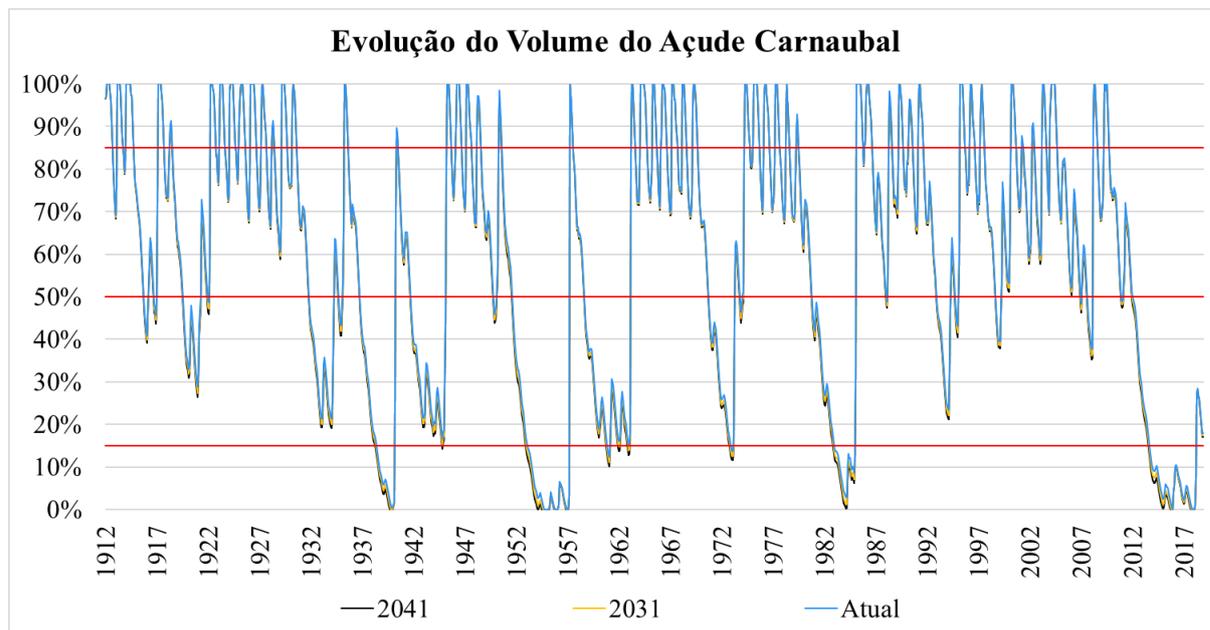
Quanto a transição entre os níveis, é nítido na Tabela 12 que para nenhum dos cenários existiu recarga brusca do volume, e para todos os cenários ocorreu uma recarga brusca em 0,08% entre os níveis 4 e 1, além de 0,16% do tempo entre os níveis 3 e 1, no mais, a transição entre os níveis ocorre de forma suave para o nível imediatamente seguinte.

5.2.1.1.1.2 Abastecimento Compartilhado

Este tópico apresenta os resultados para a operação do Açude Carnaubal para o modelo de abastecimento compartilhado, este modelo, conta com as demandas de retirada do reservatório igual a 75% da demanda do município, os valores são 0,105 m³/s para o cenário atual, 0,122 m³/s para o cenário de 2031 e 0,135 m³/s para o cenário 2041, o gráfico representando a evolução do volume do reservatório é apresentado no Gráfico 35.

Como é possível notar pela análise do gráfico, para esse reservatório os períodos críticos ocorreram nos anos de 1939, sendo o primeiro ano no qual o reservatório aproxima-se de zerar, o segundo período crítico corre entre os anos de 1954 e de 1957, sendo o maior período de deficiência do sistema, além desse período, o reservatório ainda fica abaixo do volume de 15% em dois outros períodos, entre os anos de 1983 e de 1985 e entre os anos de 2013 e 2018, mostrando a grande fragilidade do sistema.

Gráfico 35 - Evolução do volume do Açude Carnaubal com abastecimento compartilhado.



Fonte: Autoria própria (2019).

Comparando a evolução dos cenários é perceptível a diminuição na garantia, apesar dessa diferença não ser graficamente perceptível em todos os pontos da série, ainda assim, fica evidente nos pontos mínimos da série.

Ao analisar o gráfico é notável que apesar do reservatório se encontrar em grande parte do tempo nos níveis 1 e 2, ainda possui parte do tempo no nível 4, a frequência e a porcentagem de tempo em cada nível são observadas na Tabela 13. Para as condições simuladas no cenário atual, o reservatório passa 12,23% do tempo com volumes inferiores a 15%, para os casos dos cenários 2031 e 2041 esse valor tem um acréscimo de 0,78% e de 1,40%, respectivamente. Isso demonstra que as condições de garantia do reservatório estão tendendo a se agravar com o tempo, resultando em maiores períodos com necessidade de racionamento para evitar desabastecimentos.

Segundo a Tabela 14, para o cenário atual o reservatório leva em média 17,42 meses para se recuperar quando fica abaixo de 85% de seu volume, para 2031 esse valor aumenta para 17,6 meses, chegando a 17,68 meses em 2041, quando esse volume fica inferior a 50%, o reservatório leva 19,14 meses para se recuperar no cenário atual, passando para 19,58 meses em 2031 e 19,92 meses em 2041, já para o período em que o reservatório se encontra abaixo de 15%, é necessário 26,5 para o cenário atual, esse valor cai para 21,18 meses em 2031 e para 19,73 em 2041. Diferente dos resultados para 85% e 50%, o tempo médio de retorno para o volume de 15% teve uma queda em comparação com o período atual, esse fato é decorrente dos novos meses nos quais o reservatório esteve abaixo desse volume.

Tabela 13 - Frequência de volume por nível para o Açude Carnaubal com abastecimento compartilhado.

| Intervalo | Atual | | 2031 | | 2041 | |
|-----------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| | Freq. | % | Freq. | % | Freq. | % |
| Nível 1 | 315 | 24,53% | 306 | 23,83% | 302 | 23,52% |
| Nível 2 | 490 | 38,16% | 489 | 38,08% | 485 | 37,77% |
| Nível 3 | 322 | 25,08% | 322 | 25,08% | 322 | 25,08% |
| Nível 4 | 157 | 12,23% | 167 | 13,01% | 175 | 13,63% |

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 14 - Meses para recuperação do volume para Açude Carnaubal com abastecimento compartilhado.

| Limite | Atual | 2031 | 2041 |
|--------|-------|-------|-------|
| 85% | 17,42 | 17,60 | 17,68 |
| 50% | 19,14 | 19,58 | 19,92 |
| 15% | 26,56 | 21,18 | 19,73 |

Fonte: Autoria própria (2019).

Na Tabela 15, é possível verificar a velocidade na qual está ocorrendo a passagem entre um nível e outro, a tabela coloca em termos de porcentagem a quantidade de vezes nas quais o reservatório estava em um determinado nível e no qual estava no mês seguinte.

Tabela 15 - Frequência em porcentagem de transição entre níveis para o Açude Carnaubal com abastecimento compartilhado.

| | Mês i+1 | | | | | | | | | | | | |
|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Atual | | | | 2031 | | | | 2041 | | | | |
| | N1 | N2 | N3 | N4 | N1 | N2 | N3 | N4 | N1 | N2 | N3 | N4 | |
| Mês i | N1 | 20,25 | 4,67 | 0,00 | 0,00 | 19,78 | 4,67 | 0,00 | 0,00 | 19,24 | 4,60 | 0,00 | 0,00 |
| | N2 | 3,58 | 21,57 | 3,50 | 0,00 | 3,58 | 19,94 | 3,58 | 0,00 | 3,35 | 19,24 | 3,66 | 0,00 |
| | N3 | 0,70 | 2,41 | 18,30 | 1,87 | 0,70 | 2,41 | 17,52 | 2,10 | 0,86 | 2,26 | 16,98 | 2,10 |
| | N4 | 0,31 | 0,00 | 1,48 | 21,34 | 0,31 | 0,08 | 1,64 | 23,68 | 0,31 | 0,16 | 1,56 | 25,70 |

Fonte: Autoria própria (2019).

Analisando os dados da Tabela 15, é possível concluir que para nenhum dos cenários existe perdas bruscas de volume, entretanto, para os três cenários existe recarga volumétrica brusca, onde o volume do reservatório sai do nível 4 e retorna para o nível 1 e 2, ou saí do nível 3 e passa para o nível 2, sendo maior essa recarga brusca no cenário 2041, onde essas recargas representam 1,33% do tempo.

5.2.1.1.2 Barragem do Batalhão

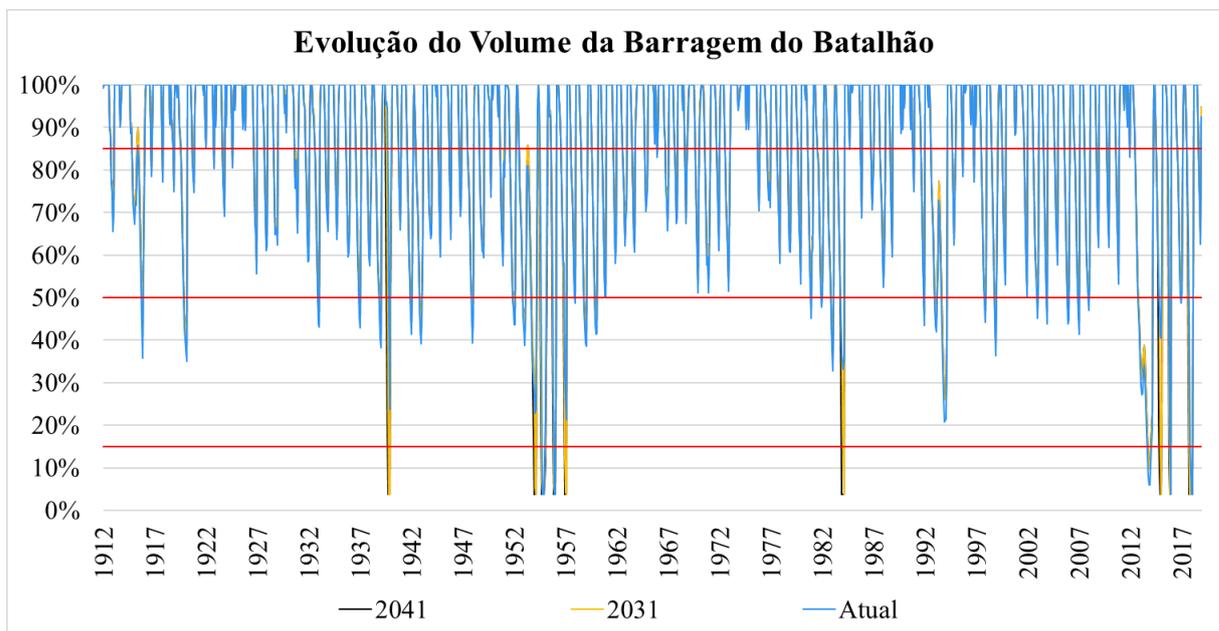
Para a Barragem do Batalhão, os resultados são divididos em abastecimento único e abastecimento compartilhado, para o abastecimento único, o reservatório participa do abastecimento apenas no em casos de impossibilidade total ou parcial do Açude Carnaubal, para o abastecimento compartilhado o reservatório suporta 25% da demanda do município.

5.2.1.1.2.1 Abastecimento Único

Para o abastecimento único a operação dos reservatórios teve como resultado a série de evolução volumétrica da Barragem do Batalhão apresentada no Gráfico 36, para este formato a demanda de retirada é nula, tendo retirada apenas para completar em casos de impossibilidade de abastecimento pelo Açude Carnaubal.

Os resultados do reservatório para este modelo obtiveram como períodos nos quais o mesmo se manteve abaixo do volume de 15% os anos de 1939, entre 1954 e 1957, 2013, 2015, 2016 e 2018, sendo para esses períodos apenas curtas passagens.

Gráfico 36 - Evolução do volume da Barragem do Batalhão com abastecimento único.



Fonte: Autoria própria (2019).

Ao analisar o gráfico, é perceptível que nos anos de 1939, 1954, 1957 e 2015, apenas os cenários de 2031 e 2041 apresentam volumes inferiores a 15%, esse fato é dado devido a impossibilidade de abastecimento pelo Açude Carnaubal, de forma que nesses períodos houve a necessidade do abastecimento pela Barragem do Batalhão.

Na Tabela 16 é possível observar a porcentagem de tempo para cada nível do reservatório, nestas condições é visto que o sistema passa 90,97% do tempo com volumes superiores a 50% para o cenário atual, para a simulação com o cenário de 2031, o resultado é de 91,36% do tempo, já para 2041 essa porcentagem fica 91,04%. Quando é avaliado para volumes inferiores a 15%, vê-se que o reservatório esteve em 1,09% do tempo nessas condições para o cenário atual, tendo a crescente para os demais cenários, ficando com 2,02% e 2,65%, respectivamente. A grande variação desse reservatório pode ser explicada pelas suas dimensões, já que se trata de um reservatório de pequeno volume ao se comparar com os demais e com grande área de bacia, sendo a maior entre os reservatórios em estudo.

Como pode ser visto na Tabela 17, o reservatório leva em média 5,2 meses para retornar a volumes superiores a 85% no cenário atual, para o cenário de 2031 e 2041 esse valor é de 5,1 e 5,11 meses respectivamente, quando esse volume fica inferior a 50%, o reservatório leva em média 3,19 meses para se recuperar no primeiro cenário, já para os demais esse tempo de recuperação é de 3,33 e 3,45 meses, na última faixa onde o reservatório se encontra abaixo de 15%, é necessário 2,85 meses para se recuperar no cenário atual e 2,66 e 3,46 para os cenários de 2031 e 2041.

Tabela 16 - Frequência de volume por nível da Barragem do Batalhão para abastecimento único.

| Intervalo | Atual | | 2031 | | 2041 | |
|------------------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| | Freq. | % | Freq. | % | Freq. | % |
| Nível 1 | 789 | 61,45% | 804 | 62,62% | 803 | 62,54% |
| Nível 2 | 379 | 29,52% | 369 | 28,74% | 366 | 28,50% |
| Nível 3 | 102 | 7,94% | 85 | 6,62% | 81 | 6,31% |
| Nível 4 | 14 | 1,09% | 26 | 2,02% | 34 | 2,65% |

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 17 - Tempo para recuperação do volume para a Barragem do Batalhão com abastecimento único.

| Limite | Atual | 2031 | 2041 |
|---------------|--------------|-------------|-------------|
| 85% | 5,20 | 5,10 | 5,11 |
| 50% | 3,19 | 3,33 | 3,45 |
| 15% | 2,85 | 2,66 | 3,46 |

Fonte: Autoria própria (2019).

Na Tabela 18, é possível verificar a transição entre os níveis, a tabela coloca em termos de porcentagem a quantidade de vezes nas quais o reservatório estava em um determinado nível e no qual estava no mês seguinte.

Tabela 18 - Frequência de transição entre níveis para a Barragem do Batalhão com abastecimento único.

| | | Mês i+1 | | | | | | | | | | | |
|-------|----|---------|-------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|------|
| | | Atual | | | | 2031 | | | | 2041 | | | |
| Mês i | | N1 | N2 | N3 | N4 | N1 | N2 | N3 | N4 | N1 | N2 | N3 | N4 |
| | N1 | 53,82 | 7,55 | 0,00 | 0,08 | 48,21 | 1,64 | 0,00 | 0,00 | 47,90 | 1,25 | 0,08 | 0,00 |
| | N2 | 6,46 | 20,17 | 2,88 | 0,00 | 7,55 | 15,11 | 0,31 | 0,23 | 7,24 | 13,94 | 0,31 | 0,31 |
| | N3 | 1,01 | 1,71 | 4,83 | 0,39 | 5,76 | 9,35 | 2,26 | 0,47 | 6,15 | 10,12 | 1,64 | 0,62 |
| | N4 | 0,08 | 0,08 | 0,23 | 0,70 | 1,01 | 2,65 | 4,05 | 1,40 | 1,17 | 3,19 | 4,28 | 1,79 |

Fonte: Autoria própria (2019).

Nesses termos, é possível perceber que a transição ocorre em sua maioria para o nível imediatamente seguinte, entretanto, para o cenário atual, ocorre em 0,08% do tempo uma perda brusca de volume, onde o reservatório sai do nível 1 e vai diretamente para o nível 4, no cenário de 2031, não ocorrem perdas bruscas de volume, já para o cenário de 2041, ocorre em 0,08% do tempo passagens diretas entre o nível 1 e 3, para as recargas bruscas, as mesmas ocorrem em todos os cenários, tendo a menor recarga entre os níveis 4 e 1 do cenário atual, com 0,08% e as maiores entre os níveis 3 e 1 para o cenário 2041.

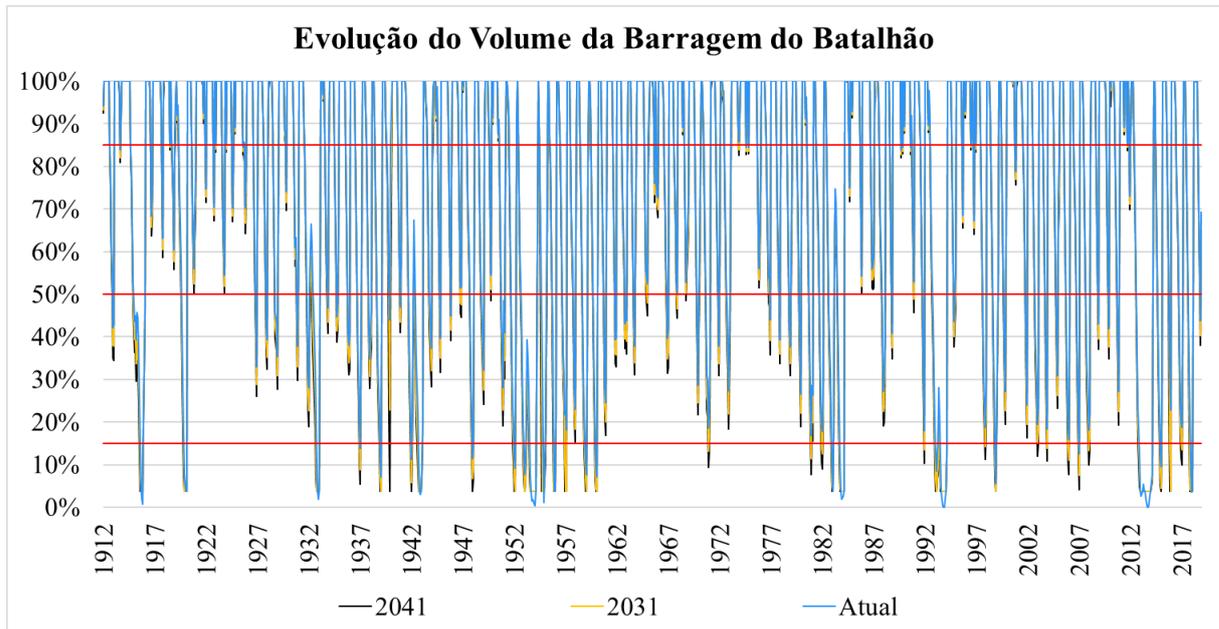
5.2.1.1.2.2 Abastecimento Compartilhado

Este tópico apresenta os resultados para a operação da Barragem do Batalhão para o modelo de abastecimento compartilhado, este modelo, conta com as demandas de retirada do reservatório igual a 25% da demanda do município, os valores de 0,035, 0,041 e 0,045 m³/s para os cenários atual, 2031 e 2041, e o gráfico representando a evolução do volume do reservatório é apresentado no Gráfico 37.

Para esse cenário do reservatório a quantidade de períodos abaixo de 15% se intensifica, em comparação com o resultado apresentado para o modelo de abastecimento único, apesar do reservatório não apresentar longos períodos de estiagem, esses pequenos períodos são espaçados durante toda a série.

Ao analisar o gráfico e comparar com os dados da Tabela 19 é perceptível que o sistema passa aproximadamente 75,23% do tempo com volumes superiores a 50% para o cenário atual, enquanto para os cenários de 2031 e 2041 houve um decréscimo passando para 73,05% e 71,03%, respectivamente. Quando se trata de volumes inferiores a 15%, para o cenário atual o sistema passa 6,62% e com tempo médio de recarga de 3,61 meses, possuindo um aumento significativo para os demais cenários, passando para 9,11% em 2031 e 10,44% para 2041, com recuperação volumétrica de 3,31 e 3,69 meses respectivamente.

Gráfico 37 - Evolução do volume da Barragem do Batalhão com abastecimento compartilhado.



Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 19 - Frequência de volume por nível da Barragem do Batalhão para abastecimento compartilhado.

| Intervalo | Atual | | 2031 | | 2041 | |
|-----------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| | Freq. | % | Freq. | % | Freq. | % |
| Nível 1 | 675 | 52,57% | 640 | 49,84% | 632 | 49,22% |
| Nível 2 | 291 | 22,66% | 298 | 23,21% | 280 | 21,81% |
| Nível 3 | 233 | 18,15% | 229 | 17,83% | 238 | 18,54% |
| Nível 4 | 85 | 6,62% | 117 | 9,11% | 134 | 10,44% |

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 20 - Tempo para recuperação do volume para a Barragem do Batalhão com abastecimento compartilhado.

| Limite | Atual | 2031 | 2041 |
|--------|-------|------|------|
| 85% | 5,99 | 5,98 | 6,05 |
| 50% | 4,37 | 4,52 | 4,68 |
| 15% | 3,61 | 3,31 | 3,69 |

Fonte: Autoria própria (2019).

Na Tabela 21, é possível verificar a transição entre os níveis, a tabela coloca em termos de porcentagem a quantidade de vezes nas quais o reservatório estava em um determinado nível e no qual estava no mês seguinte.

Tabela 21 - Frequência de transição entre níveis para a Barragem do Batalhão com abastecimento compartilhado.

| | | Mês i+1 | | | | | | | | | | | |
|-------|----|---------|-------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|------|
| | | Atual | | | | 2031 | | | | 2041 | | | |
| | | N1 | N2 | N3 | N4 | N1 | N2 | N3 | N4 | N1 | N2 | N3 | N4 |
| Mês i | N1 | 53,82 | 7,55 | 0,00 | 0,08 | 41,28 | 8,57 | 0,00 | 0,00 | 40,65 | 8,57 | 0,00 | 0,00 |
| | N2 | 6,46 | 20,17 | 2,88 | 0,00 | 5,30 | 11,76 | 6,07 | 0,08 | 4,98 | 10,44 | 6,31 | 0,08 |
| | N3 | 1,01 | 1,71 | 4,83 | 0,39 | 2,49 | 2,73 | 9,81 | 2,80 | 2,73 | 2,49 | 10,44 | 2,88 |
| | N4 | 0,08 | 0,08 | 0,23 | 0,70 | 0,70 | 0,16 | 1,95 | 6,31 | 0,78 | 0,31 | 1,79 | 7,55 |

Fonte: Autoria própria (2019).

Para este cenário é possível perceber que a transição ocorre em sua maioria para o nível imediatamente seguinte, entretanto, em 0,08% do tempo ocorrem perdas bruscas de volume para todos os cenários, para o cenário atual essa perda ocorre entre os níveis 1 e 4, já para os cenários de 2031 e 2041 esse processo acontece entre os níveis 2 e 4. Em se tratando de recarga brusca, a menor, com 0,08%, ocorre entre os níveis 4 e 1 do cenário atual e a com maior porcentagem ocorre no cenário de 2041 com 2,73% entre os níveis 3 e 1.

5.2.1.2 Abastecimento

Para o município de Crateús, a operação de reservatórios resultou em três períodos de desabastecimento total ou parcial para o modelo de abastecimento único e dois períodos para o modelo de abastecimento compartilhado. Esses períodos aconteceram de 1954 a 1957 e de 2015 a 2017 para ambas as formas de abastecimento e cenários, já no ano de 1984 o desabastecimento ocorreu apenas para os cenários de 2031 e de 2041 para o modelo de abastecimento único.

Analisando a Tabela 22, vê-se que o sistema encontra-se no cenário atual com 0,23% de desabastecimento para o modelo de abastecimento compartilhado, já para o modelo de abastecimento único esse valor é de 0,31% e com 0,08% de desabastecimento total do sistema, com a mudança dos cenários nota-se o crescimento do desabastecimento, tanto para o modelo compartilhado quanto para o de abastecimento único, entre os cenários atuais e 2031 os valores para os dois modelos tiveram um crescimento de aproximadamente 2 e 2,5 vezes, para a comparação entre os cenários de 2041 e 2031 é visto um crescimento de 2,33 vezes para o abastecimento compartilhado e de 2,2 vezes para o abastecimento único, demonstrando que apesar do desabastecimento ocorrer em apenas uma pequena parcela do período, o seu crescimento é significativo entre os cenários.

Tabela 22 - Desabastecimento para o município de Crateús.

| | Atual | | 2031 | | 2041 | |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | A.C | A.U | A.C | A.U | A.C | A.U |
| % de Desabastecimento | 0,23% | 0,31% | 0,47% | 0,78% | 1,09% | 1,71% |
| % de Desabastecimento Total | 0,00% | 0,08% | 0,16% | 0,23% | 0,23% | 0,31% |

Fonte: Autoria própria (2019).

5.2.2 Novo Oriente

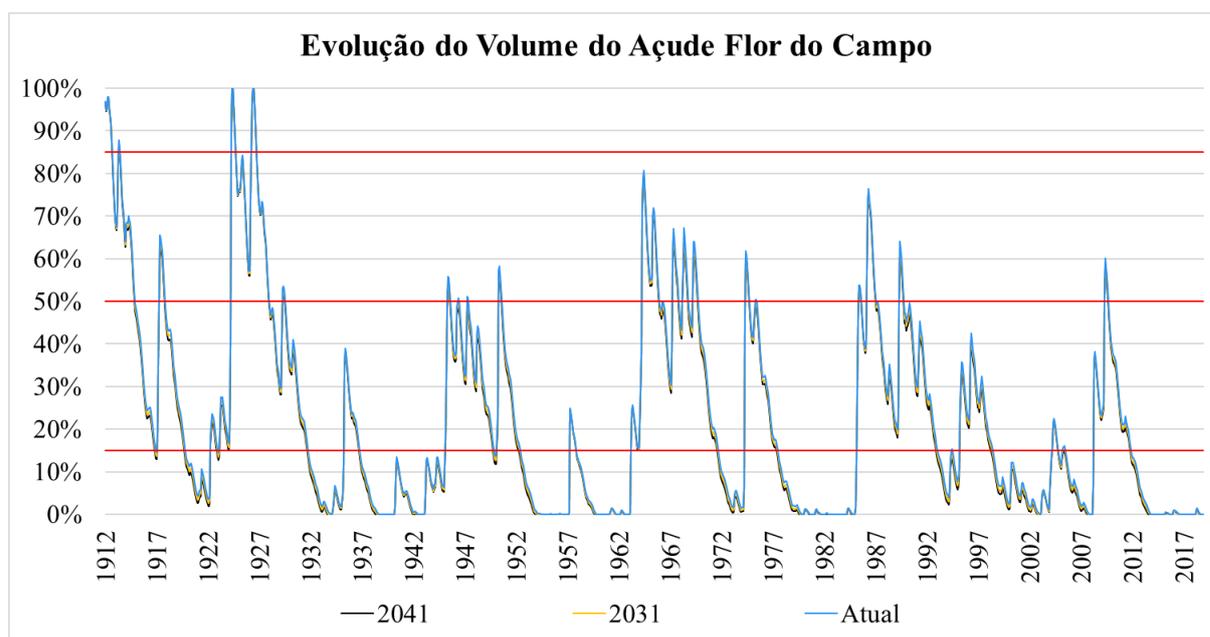
Este tópico apresenta os resultados obtidos para o município de Novo Oriente, passando pelos resultados dos reservatórios e para o abastecimento, sendo estes resultados referentes a todos os cenários trabalhados.

5.2.2.1 Reservatório

5.2.2.1.1 Açude Flor do Campo

O Açude Flor do Campo, por ser o único reservatório com possibilidade de abastecer o município de Novo Oriente, conta com as demandas de saída iguais as demandas necessárias para o abastecimento do município, essas demandas são de 0,05 m³/s para o cenário atual, no cenário de 2031 as demandas fixas de retiradas são de 0,064 m³/s e para o último cenário as demandas são de 0,076 m³/s e a série resultante da operação desse sistema sob essas condições pode ser vista no Gráfico 38.

Gráfico 38 - Evolução do volume do Açude Flor do Campo.



Fonte: Autoria própria (2019).

O reservatório em questão passa grande parte do período abaixo do volume de referência de 15%, sendo os períodos de 1954 a 1957, de 1959 a 1963, de 1980 a 1985 e de 2013 a 2018 os períodos mais críticos por apresentarem volume nulo.

Ao analisar o gráfico e comparar com os dados da Tabela 23 nota-se que para esse caso, apenas 13,86% do tempo o reservatório apresenta volumes superiores a 50% para o cenário atual, para os cenários de 2031 e de 2041 a porcentagem de tempo é de 13,08% e de 12,46%, respectivamente. Para os volumes inferiores a 15%, o reservatório passa aproximadamente 49,84% do tempo no cenário 1, 50,78% no cenário 2 e 81,87% no cenário 3, isso demonstra a diminuição da segurança do abastecimento para esse reservatório.

A taxa de recarga da bacia pode ser avaliada na Tabela 24, para esse cenário, o reservatório leva em média 52,39 meses no cenário atual e 2031, e de 52,73 meses para 2041 para retornar a volumes superiores a 85%, quando esse volume fica inferior a 50%, o reservatório leva em média 59,31 meses para se recuperar no primeiro cenário, para os seguintes o tempo de recarga é de 67,9 e 73,33 meses, já para o período em que o reservatório se encontra abaixo de 15%, é necessário 37,53 meses para que o mesmo saia dessa faixa no cenário atual, de 41,01 meses para o cenário de 2031 e de 39,16 meses para 2041.

Tabela 23 - Frequência de volume por nível do Açude Flor do Campo.

| Intervalo | Atual | | 2031 | | 2041 | |
|-----------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| | Freq. | % | Freq. | % | Freq. | % |
| Nível 1 | 22 | 1,71% | 22 | 1,71% | 21 | 1,64% |
| Nível 2 | 156 | 12,15% | 146 | 11,37% | 139 | 10,83% |
| Nível 3 | 466 | 36,29% | 464 | 36,14% | 458 | 35,67% |
| Nível 4 | 640 | 49,84% | 652 | 50,78% | 666 | 51,87% |

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 24 - Tempo para recuperação do volume do Açude Flor do Campo.

| Limite | Atual | 2031 | 2041 |
|--------|-------|-------|-------|
| 85% | 52,39 | 52,39 | 52,73 |
| 50% | 59,31 | 67,90 | 73,33 |
| 15% | 37,53 | 41,01 | 39,16 |

Fonte: Autoria própria (2019).

Na Tabela 25, é possível verificar a transição entre os níveis, a tabela coloca em termos de porcentagem a quantidade de vezes nas quais o reservatório estava em um determinado nível e no qual estava no mês seguinte.

Tabela 25 - Frequência de transição entre níveis do Açude Flor do Campo.

| | | Mês i+1 | | | | | | | | | | | |
|-------|----|---------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|
| | | Atual | | | | 2031 | | | | 2041 | | | |
| Mês i | | N1 | N2 | N3 | N4 | N1 | N2 | N3 | N4 | N1 | N2 | N3 | N4 |
| | N1 | 1,40 | 0,31 | 0,00 | 0,00 | 1,40 | 0,31 | 0,00 | 0,00 | 1,32 | 0,31 | 0,00 | 0,00 |
| | N2 | 0,16 | 10,59 | 1,48 | 0,00 | 0,16 | 9,97 | 1,25 | 0,00 | 0,16 | 9,50 | 1,17 | 0,00 |
| | N3 | 0,08 | 1,32 | 33,72 | 1,25 | 0,08 | 1,09 | 33,80 | 1,17 | 0,08 | 1,01 | 33,33 | 1,25 |
| | N4 | 0,00 | 0,00 | 1,17 | 48,52 | 0,00 | 0,00 | 1,09 | 49,69 | 0,00 | 0,00 | 1,17 | 50,70 |

Fonte: Autoria própria (2019).

Para este cenário é possível perceber que a transição ocorre em sua maioria para o nível imediatamente seguinte, sem a ocorrência de casos de perda brusca de volume, mas para os casos de recarga, ocorre em 0,08% do tempo a passagem direta do nível 3 para o nível 1.

5.2.2.2 Abastecimento

Para o município de Novo Oriente, a operação de reservatórios resultou em cinco períodos de desabastecimento total ou parcial, ocorreram um total de 109 eventos de desabastecimentos para o cenário atual, 131 para 2031 e 153 para 2041, os períodos de desabastecimento total ocorreram entre os anos de 1938 a 1939, 1954 a 1957, 1959 a 1961, 1982 a 1984 e o último sendo de 2014 a 2017, os demais períodos contam com desabastecimento parcial do município.

O desabastecimento para o cenário atual ocorre em 8,49% do tempo, com 5,3% sendo de desabastecimento total, já para o cenário 2031, o município sofre com 10,2% de desabastecimento, com 6% de desabastecimento total e para 2041 a porcentagem passa a ser de 11,92% e 7,01% de desabastecimento total, isso demonstra a diminuição da segurança do município.

Tabela 26 - Desabastecimento para o município de Novo Oriente.

| | Atual | 2031 | 2041 |
|------------------------------------|-------|--------|--------|
| % de Desabastecimento | 8,49% | 10,20% | 11,92% |
| % de Desabastecimento Total | 5,30% | 6,00% | 7,01% |

Fonte: Autoria própria (2019).

5.2.3 Independência

Este tópico apresenta os resultados obtidos para o município de Independência, passando pelos resultados dos reservatórios e para o abastecimento, sendo estes resultados referentes a todos os cenários trabalhados.

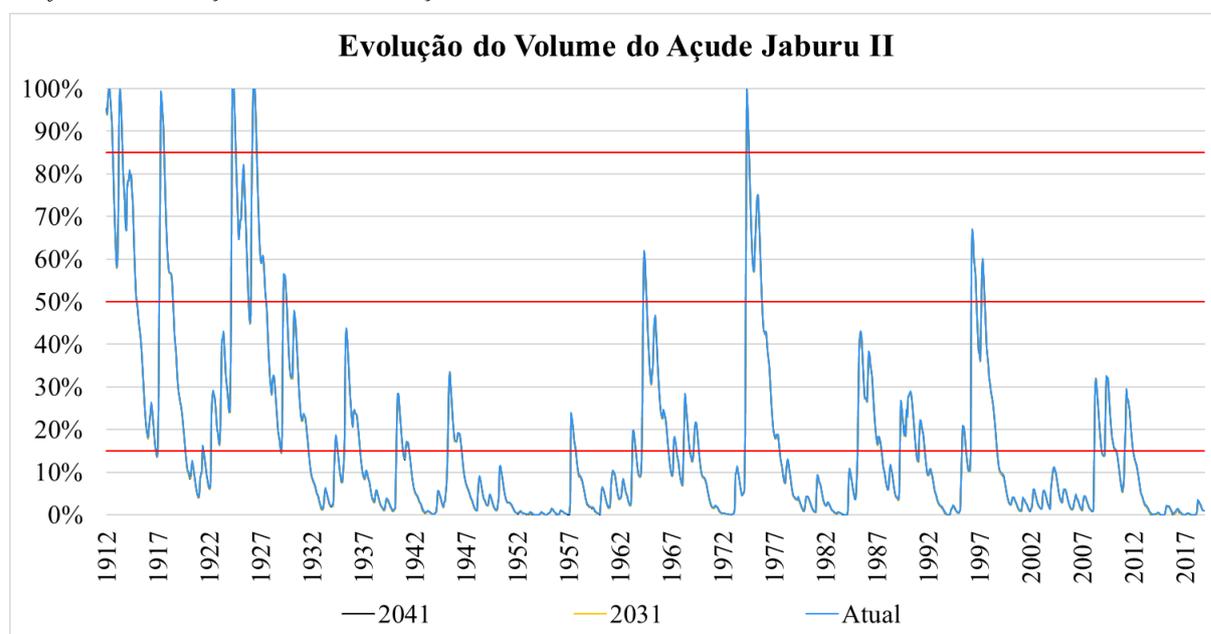
5.2.3.1 Reservatórios

5.2.3.1.1 Açude Jaburu II

O Açude Jaburu II, apesar de ser o maior do município de Independência, tem na sua distância da sede municipal que torna inviável seu uso como principal reservatório de abastecimento, esse reservatório é utilizado apenas em casos extremos nos quais os reservatórios Barra Velha e Cupim estão impossibilitados de abastecer a cidade, portanto, esse reservatório não possui demanda fixa associada e a série resultante da operação desse sistema sob essas condições pode ser vista no Gráfico 39.

Para esse cenário, o reservatório em questão passa grande parte do período abaixo do volume de referência de 15%, sendo os períodos de 1952 a 1957 e de 2013 a 2018 os períodos mais críticos por apresentarem volume quase nulo.

Gráfico 39 - Evolução do volume do Açude Jaburu II.



Fonte: Autoria própria (2019).

Ao analisar o gráfico é observável que não há diferença entre a evolução dos volumes para cada um dos cenários, demonstrando que o reservatório não teve mudança no seu uso, com os dados da Tabela 27 nota-se que apenas entre 10,05% e 10,12% do tempo o

reservatório apresenta volumes superiores a 50%, para todos os cenários. Nos volumes inferiores a 15%, o reservatório esteve entre 62,85% e 63,01% do tempo, também para todos os cenários, comprovando a análise gráfica.

O tempo de recarga da bacia, observável na Tabela 28 também demonstra a permanência do reservatório no mesmo estado, não ocorrendo mudanças de grande porte, tendo um tempo de recarga de 146 meses para o retorno a volumes superiores a 85%, de aproximadamente 114 meses para volumes de 50% e de 30,6 meses para o retorno a volumes superiores a 15%.

Tabela 27 - Frequência de volume por nível do Açude Jaburu II.

| Intervalo | Atual | | 2031 | | 2041 | |
|-----------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| | Freq. | % | Freq. | % | Freq. | % |
| Nível 1 | 30 | 2,34% | 30 | 2,34% | 30 | 2,34% |
| Nível 2 | 100 | 7,79% | 99 | 7,71% | 99 | 7,71% |
| Nível 3 | 347 | 27,02% | 347 | 27,02% | 346 | 26,95% |
| Nível 4 | 807 | 62,85% | 808 | 62,93% | 809 | 63,01% |

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 28 - Tempo para recuperação do volume do Açude Jaburu II.

| Limite | Atual | 2031 | 2041 |
|--------|--------|--------|--------|
| 85% | 146,28 | 146,28 | 146,28 |
| 50% | 113,76 | 113,89 | 113,89 |
| 15% | 30,56 | 30,61 | 30,65 |

Fonte: Autoria própria (2019).

Na Tabela 29, é possível verificar a transição entre os níveis, a tabela coloca em termos de porcentagem a quantidade de vezes nas quais o reservatório estava em um determinado nível e no qual estava no mês seguinte.

Tabela 29 - Frequência de transição entre níveis do Jaburu II.

| | Mês i+1 | | | | | | | | | | | | |
|-------|---------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|
| | Atual | | | | 2031 | | | | 2041 | | | | |
| | N1 | N2 | N3 | N4 | N1 | N2 | N3 | N4 | N1 | N2 | N3 | N4 | |
| Mês i | N1 | 1,87 | 0,47 | 0,00 | 0,00 | 1,87 | 0,47 | 0,00 | 0,00 | 1,87 | 0,47 | 0,00 | 0,00 |
| | N2 | 0,39 | 6,62 | 0,70 | 0,00 | 0,39 | 6,62 | 0,70 | 0,00 | 0,39 | 6,62 | 0,70 | 0,00 |
| | N3 | 0,00 | 0,55 | 24,61 | 1,95 | 0,00 | 0,55 | 24,53 | 1,95 | 0,00 | 0,55 | 24,45 | 1,95 |
| | N4 | 0,00 | 0,08 | 1,79 | 60,98 | 0,00 | 0,08 | 1,79 | 61,06 | 0,00 | 0,08 | 1,79 | 61,14 |

Fonte: Autoria própria (2019).

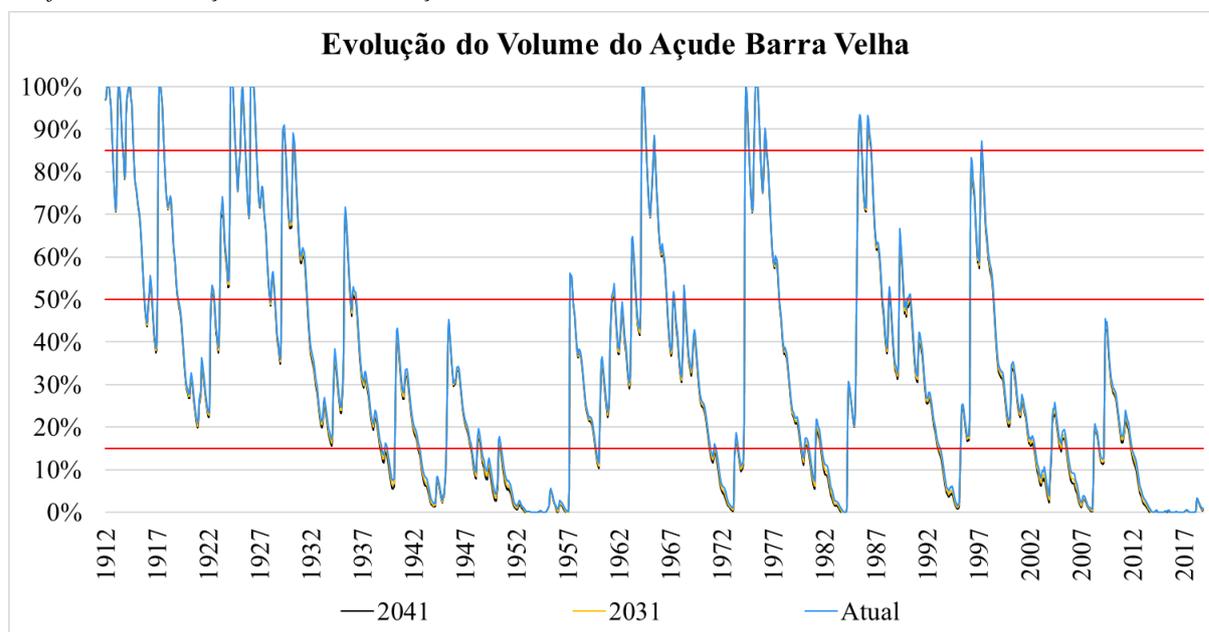
É possível perceber que a transição ocorre em sua maioria para o nível imediatamente seguinte, sem a ocorrência de casos de perda brusca de volume, mas para os casos de recarga, ocorre em 0,08% do tempo a passagem direta do nível 4 para o nível 2 em todos os cenários.

5.2.3.1.2 Açude Barra Velha

O Açude Barra Velha, é a principal fonte de abastecimento do município de Independência, portanto, o mesmo recebe como demandas fixas o valor total demandado pelo município, essas demandas são de 0,04 m³/s para o cenário atual, 0,052 m³/s para o cenário de 2031 e 0,062 para o cenário de 2041 e a série resultante da operação desse sistema sob essas condições pode ser vista no Gráfico 40.

Nas simulações efetuadas, o Açude Barra Velha apresentou uma série de períodos abaixo do volume de referência de 15%, entretanto o período entre os anos de 1952 e 1957 e de 2013 a 2018 são os períodos mais críticos por apresentarem em boa parte do tempo volume nulo.

Gráfico 40 - Evolução do volume do Açude Barra Velha.



Fonte: Autoria própria (2019).

Ao analisar o gráfico e comparar com os dados da Tabela 30 nota-se que, o reservatório se mantém em 26,71% do tempo com volumes superiores a 50% para o cenário atual, esse valor para os demais cenários sofre um decréscimo e passa a ser 26,17% e 25,55% para os cenários de 2031 e de 2041. Ao se tratar dos volumes inferiores a 15%, o reservatório

esteve 30,14% do tempo para o cenário atual, sofrendo um acréscimo nessa faixa a qual passou a ser de 31,39% para o cenário de 2031 e de 32,71% para o cenário de 2041. Isso demonstra a diminuição da garantia fornecida pelo reservatório.

Ao mesmo passo da diminuição percentual para os volumes superiores a 50%, para esses volumes ocorre o processo de aumento do tempo médio de recarga, tanto para os volumes de 85% quanto para os volumes de 50%. Para os volumes abaixo de 15%, primeiramente ocorre a diminuição do tempo médio, devido ao aumento de volumes com pequenas variações, seguido de um aumento para o cenário de 2041, a Tabela 31 mostra essa variação.

Tabela 30 - Frequência de volume por nível do Açude Barra Velha.

| Intervalo | Atual | | 2031 | | 2041 | |
|-----------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| | Freq. | % | Freq. | % | Freq. | % |
| Nível 1 | 91 | 7,09% | 89 | 6,93% | 88 | 6,85% |
| Nível 2 | 252 | 19,63% | 247 | 19,24% | 240 | 18,69% |
| Nível 3 | 554 | 43,15% | 545 | 42,45% | 536 | 41,74% |
| Nível 4 | 387 | 30,14% | 403 | 31,39% | 420 | 32,71% |

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 31 - Tempo para recuperação do volume do Açude Barra Velha.

| Limite | Atual | 2031 | 2041 |
|--------|-------|-------|-------|
| 85% | 59,22 | 59,35 | 59,41 |
| 50% | 33,62 | 35,61 | 37,92 |
| 15% | 18,09 | 17,93 | 21,19 |

Fonte: Autoria própria (2019).

Na Tabela 32, é possível verificar a transição entre os níveis, a tabela coloca em termos de porcentagem a quantidade de vezes nas quais o reservatório estava em um determinado nível e no qual estava no mês seguinte.

Tabela 32 - Frequência de transição entre níveis do Açude Barra Velha.

| | Mês i+1 | | | | | | | | | | | | |
|-------|---------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| | Atual | | | | 2031 | | | | 2041 | | | | |
| | N1 | N2 | N3 | N4 | N1 | N2 | N3 | N4 | N1 | N2 | N3 | N4 | |
| Mês i | N1 | 5,84 | 1,32 | 0,00 | 0,00 | 5,61 | 1,32 | 0,00 | 0,00 | 5,53 | 1,32 | 0,00 | 0,00 |
| | N2 | 1,25 | 16,90 | 1,64 | 0,00 | 1,25 | 16,36 | 1,64 | 0,00 | 1,25 | 15,89 | 1,56 | 0,00 |
| | N3 | 0,00 | 1,48 | 40,34 | 1,40 | 0,00 | 1,48 | 39,49 | 1,48 | 0,00 | 1,40 | 39,02 | 1,32 |
| | N4 | 0,00 | 0,08 | 1,25 | 28,50 | 0,00 | 0,08 | 1,32 | 29,98 | 0,00 | 0,08 | 1,17 | 31,46 |

Fonte: Autoria própria (2019).

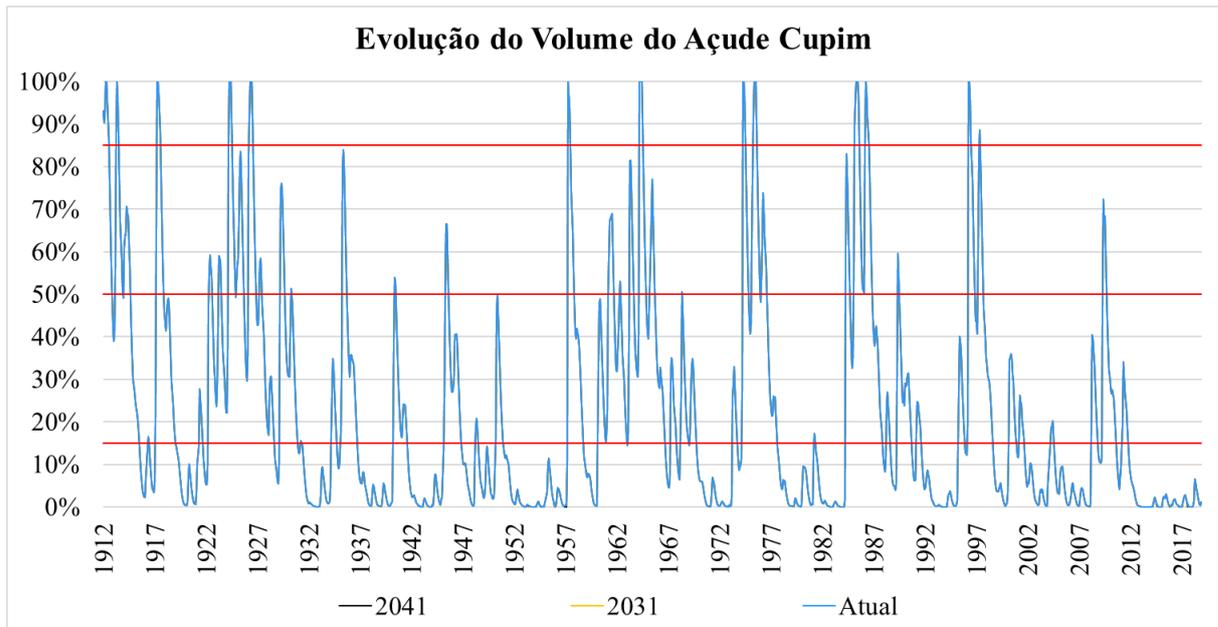
Para este cenário é possível perceber que a transição ocorre em sua maioria para o nível imediatamente seguinte, sem a ocorrência de casos de perda brusca de volume, mas para os casos de recarga, ocorre em 0,08% do tempo a passagem direta do nível 4 para o nível 2 em os cenários de estudo.

5.2.3.1.3 Açude Cupim

Como resultado da operação dos reservatórios, a série de evolução volumétrica do Açude Cupim, considerando que o mesmo só terá demandas nos casos em que o Açude Barra Velha não suportar abastecer o município é apresentada no Gráfico 41, esta série, assim como a apresentada no Açude Jaburu II, não apresenta distinção entre os cenários, demonstrando que não houve mudança no uso para esses cenários.

Como é possível notar, para esse reservatório os períodos críticos ocorreram nos anos de 1939, sendo o primeiro ano no qual o reservatório aproxima-se de zerar, o segundo período crítico corre entre os anos de 1954 e de 1957, sendo o maior período de deficiência do sistema, além desse período, o reservatório ainda fica abaixo do volume de 15% em dois outros períodos, entre os anos de 1983 e de 1985 e entre os anos de 2013 a 2018, mostrando a grande fragilidade do sistema.

Gráfico 41 - Evolução do volume do Açude Cupim.



Fonte: Autoria própria (2019).

Ao analisar o gráfico é notável que o reservatório se encontra em grande parte do tempo nos níveis 3 e 4, possuindo apenas picos perpassando os níveis 1 e 2. Segundo a Tabela

33, para as condições simuladas, o reservatório se encontra com apenas 15,73% do tempo com volumes iguais ou superiores a 50% do volume total e 54,9% do tempo com volumes inferiores a 15% para todos os cenários do estudo.

Como mostrado na Tabela 34, o reservatório leva em média 81,93 meses para se recuperar de volumes abaixo de 85%, quando esse volume fica inferior a 50%, o reservatório leva em média 67,13 meses, já para o período em que o reservatório se encontra abaixo de 15%, são necessários 19 meses até que volte para o nível 3, esses valores são referentes a todos os cenários de estudo.

Tabela 33 - Frequência de volume por nível do Açude Cupim.

| Intervalo | Atual | | 2031 | | 2041 | |
|-----------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| | Freq. | % | Freq. | % | Freq. | % |
| Nível 1 | 56 | 4,36% | 56 | 4,36% | 56 | 4,36% |
| Nível 2 | 146 | 11,37% | 146 | 11,37% | 146 | 11,37% |
| Nível 3 | 377 | 29,36% | 376 | 29,28% | 377 | 29,36% |
| Nível 4 | 705 | 54,91% | 706 | 54,98% | 705 | 54,91% |

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 34 - Tempo para recuperação do volume para Açude Cupim.

| Limite | Atual | 2031 | 2041 |
|--------|-------|-------|-------|
| 85% | 81,93 | 81,93 | 81,93 |
| 50% | 67,13 | 67,13 | 67,13 |
| 15% | 19,01 | 19,04 | 19,01 |

Fonte: Autoria própria (2019).

Na Tabela 35, é possível verificar a transição entre os níveis, a tabela coloca em termos de porcentagem a quantidade de vezes nas quais o reservatório estava em um determinado nível e no qual estava no mês seguinte.

Tabela 35 - Frequência de transição entre níveis para o Açude Cupim.

| | Mês i+1 | | | | | | | | | | | | |
|-------|---------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|
| | Atual | | | | 2031 | | | | 2041 | | | | |
| | N1 | N2 | N3 | N4 | N1 | N2 | N3 | N4 | N1 | N2 | N3 | N4 | |
| Mês i | N1 | 3,35 | 1,01 | 0,00 | 0,00 | 3,35 | 1,01 | 0,00 | 0,00 | 3,35 | 1,01 | 0,00 | 0,00 |
| | N2 | 0,55 | 7,94 | 2,41 | 0,00 | 0,55 | 8,33 | 2,41 | 0,00 | 0,55 | 8,33 | 2,41 | 0,00 |
| | N3 | 0,31 | 1,87 | 23,99 | 2,65 | 0,31 | 1,95 | 24,30 | 2,65 | 0,31 | 1,95 | 24,38 | 2,65 |
| | N4 | 0,08 | 0,08 | 2,41 | 53,35 | 0,08 | 0,08 | 2,41 | 52,41 | 0,08 | 0,08 | 2,41 | 52,34 |

Fonte: Autoria própria (2019).

Para este reservatório é possível perceber que não ocorrem esvaziamentos bruscos e considerando todas as recargas bruscas as mesmas ocorrem em apenas 0,47% do tempo, mostrando que a transição entre os níveis ocorre de forma suave ao passo que grande parte das transições correm entre os níveis subsequentes.

5.2.3.2 Abastecimento

Para o município de Independência, a operação de reservatórios resultou em três períodos de desabastecimento total ou parcial, ocorreram um total de 18 eventos de desabastecimento para o cenário atual, 31 eventos para o cenário de 2031 e 41 para o cenário de 2041, os períodos de desabastecimento ocorrem entre os períodos de 1953 a 1956, de 1983 e de 2013 a 2017.

Analisando a Tabela 36, vê-se que para o município de Independência, as demandas tiveram falhas em 1,4% do tempo para o cenário atual, para os demais, a demanda possui falha em 2,41% e 3,19% do tempo para os cenários de 2031 e de 2041, possuindo também uma crescente para os valores de desabastecimento total, no qual sai de 0,47% no cenário atual e passa para 1,4% no cenário de 2041.

Tabela 36 - Desabastecimento para o município de Independência.

| | Atual | 2031 | 2041 |
|------------------------------------|--------------|-------------|-------------|
| % de Desabastecimento | 1,40% | 2,41% | 3,19% |
| % de Desabastecimento Total | 0,47% | 0,93% | 1,40% |

Fonte: Autoria própria (2019).

5.2.4 Quiterianópolis

Este tópico apresenta os resultados obtidos para o município de Quiterianópolis, passando pelos resultados dos reservatórios e para o abastecimento, sendo estes resultados referentes a todos os cenários trabalhados.

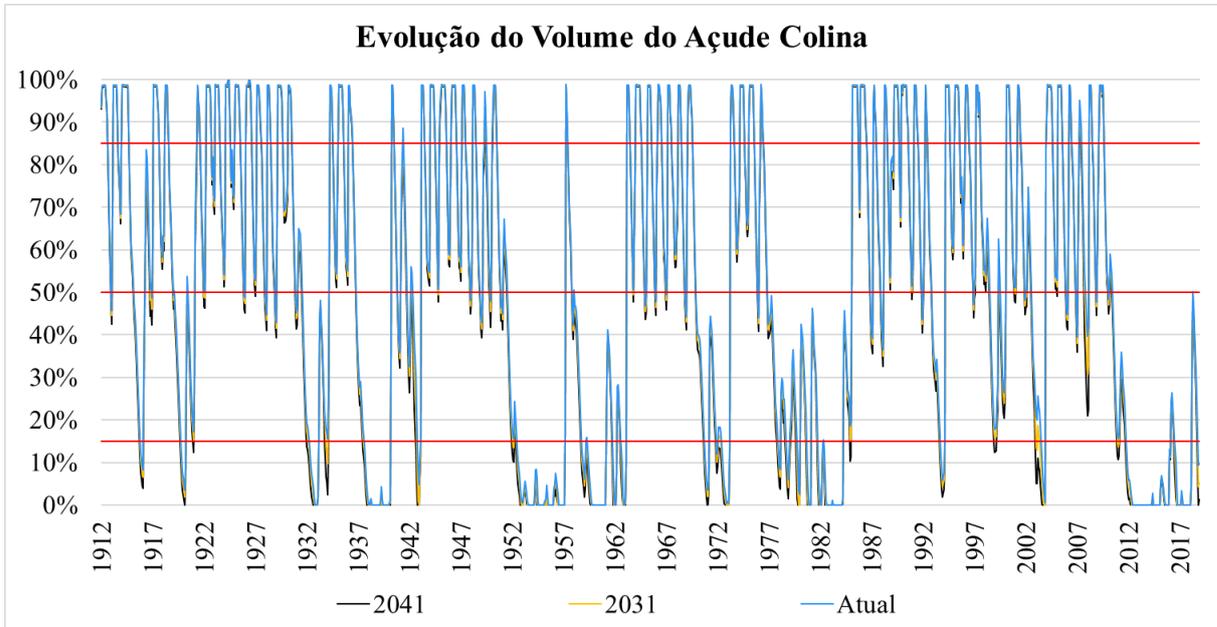
5.2.4.1 Reservatório

5.2.4.1.1 Açude Colina

O Açude Colina, é o único reservatório com possibilidade de abastecer o município de Quiterianópolis, tendo em vista esse fator, o reservatório conta com as vazões de saída fixas iguais a 0,02 para o cenário atual, 0,023 para 2031 e 0,028 para 2041 e a série resultante da operação desse sistema sob essas condições pode ser vista no Gráfico 42.

O reservatório em questão passa grande parte do período abaixo do volume de referência de 15%, sendo os períodos de 1953 a 1957 e de 2012 a 2015 os períodos mais críticos por apresentarem volume nulo com pequenas variações.

Gráfico 42 - Evolução do volume do Açude Colina.



Fonte: Autoria própria (2019).

Ao analisar o gráfico e comparar com os dados da Tabela 37 nota-se que o reservatório conta com uma divisão de períodos igualitária, passando entre 23% e 29% do tempo em cada uma das faixas, contanto com uma diminuição da frequência para os níveis 1, 2 e 3, com o conseqüente aumento da porcentagem para o nível 4 com a mudança dos cenários, indicando um decréscimo da segurança para o mesmo.

A taxa de recarga da bacia pode ser avaliada na Tabela 38, o reservatório leva em média 14,68 meses para retornar a volumes superiores a 85% no cenário atual e para os cenários de 2031 e de 2041 esse tempo de recarga médio sofre um acréscimo, passando para 14,78 meses e 15,18 meses, respectivamente, quando esse volume fica inferior a 50%, o reservatório leva em média 13,57 meses para se recuperar, já para os cenário de 2031, ocorreu um decréscimo do tempo médio para 11,72 meses, já para 2041 ocorreu um aumento em relação ao cenário de 2031, indo para 11,86 meses. Para o período em que o reservatório se encontra abaixo de 15%, são necessários 13,03 meses para que o mesmo saia dessa faixa no cenário atual e assim como para a faixa acima, o reservatório apresenta para o cenário de 2031 uma queda do tempo médio em relação ao cenário atual, ficando em 12,77 meses e um acréscimo para o cenário de 2041, tendo a média 13,79 meses.

Tabela 37 - Frequência de volume por nível do Açude Colina.

| Intervalo | Atual | | 2031 | | 2041 | |
|----------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| | Freq. | % | Freq. | % | Freq. | % |
| Nível 1 | 320 | 24,92% | 314 | 24,45% | 306 | 23,83% |
| Nível 2 | 368 | 28,66% | 348 | 27,10% | 337 | 26,25% |
| Nível 3 | 299 | 23,29% | 292 | 22,74% | 285 | 22,20% |
| Nível 4 | 297 | 23,13% | 330 | 25,70% | 356 | 27,73% |

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 38 - Tempo para recuperação do volume do Açude Colina.

| Intervalo | Atual | 2031 | 2041 |
|-----------|-------|-------|-------|
| 85% | 14,68 | 14,78 | 15,18 |
| 50% | 13,57 | 11,72 | 11,86 |
| 15% | 13,03 | 12,77 | 13,79 |

Fonte: Autoria própria (2019).

Na Tabela 39, é possível verificar a transição entre os níveis, a tabela coloca em termos de porcentagem a quantidade de vezes nas quais o reservatório estava em um determinado nível e no qual estava no mês seguinte.

Tabela 39 - Frequência de transição entre níveis do Açude Colina.

| | | Mês i+1 | | | | | | | | | | | |
|-------|----|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | Atual | | | | 2031 | | | | 2041 | | | |
| | | N1 | N2 | N3 | N4 | N1 | N2 | N3 | N4 | N1 | N2 | N3 | N4 |
| Mês i | N1 | 20,25 | 4,67 | 0,00 | 0,00 | 19,78 | 4,67 | 0,00 | 0,00 | 19,24 | 4,60 | 0,00 | 0,00 |
| | N2 | 3,58 | 21,57 | 3,50 | 0,00 | 3,58 | 19,94 | 3,58 | 0,00 | 3,35 | 19,24 | 3,66 | 0,00 |
| | N3 | 0,70 | 2,41 | 18,30 | 1,87 | 0,70 | 2,41 | 17,52 | 2,10 | 0,86 | 2,26 | 16,98 | 2,10 |
| | N4 | 0,31 | 0,00 | 1,48 | 21,34 | 0,31 | 0,08 | 1,64 | 23,68 | 0,31 | 0,16 | 1,56 | 25,70 |

Fonte: Autoria própria (2019).

Para este reservatório é possível perceber que a transição ocorre em sua maioria para o nível imediatamente seguinte, sem a ocorrência de casos de perda brusca de volume, mas para os casos de recargas bruscas, os mesmos ocorrem em todos os cenários tendo valor mínimo de 1,01% no cenário atual e máximo de 1,32% do tempo.

5.2.4.2 Abastecimento

Para o município de Quiterianópolis, a operação de reservatórios resultou em dez períodos de desabastecimento total ou parcial, esses períodos ocorreram nos anos de 1920, 1932, 1938 a 1939, 1942, 1953 a 1956, 1959 a 1962, 1971 a 1972, 1982 a 1984, 2003 e de 2012 a 2018, para o cenário atual, ocorreram 137 eventos de desabastecimento, para 2031, esse número aumentou atingindo 165 eventos e um novo aumento para 2041 onde ocorreram 195 eventos de desabastecimento total ou parcial.

Com a Tabela 40, vê-se que o município sofre com 10,67% de desabastecimento, sendo destes 7,94% referentes a desabastecimento total, já para 2031, o desabastecimento ocorreu em 12,85% do período, com 9,03% de desabastecimento total e para o cenário de 2041 o desabastecimento chega a 15,19% do tempo e 10,36% de desabastecimento total.

Tabela 40 - Desabastecimento para o município de Quiterianópolis.

| | Atual | 2031 | 2041 |
|------------------------------------|--------------|-------------|-------------|
| % de Desabastecimento | 10,67% | 12,85% | 15,19% |
| % de Desabastecimento Total | 7,94% | 9,03% | 10,36% |

Fonte: Autoria própria (2019).

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como enfoque a operação dos reservatórios da Região Hidrológica dos Sertões de Crateús para o uso de abastecimento humano.

Para tanto, o primeiro passo do estudo tratou da atualização das vazões afluentes para os reservatórios, a metodologia utilizada para o cálculo das séries pseudo-históricas foi o *Soil Moisture Accounting Procedure*, SMAP, a calibração obtida para a estação fluviométrica se mostrou de grande aproximação dos dados observados de acordo com método de quantificação proposto por Nash. Dessa forma, é possível afirmar a validade das séries pseudo-históricas obtidas por essa metodologia, de forma a serem boas representações para os eventos passados, de forma a serem entradas válidas para a operação dos reservatórios.

Para a operação dos reservatórios, utilizando o sistema de suporte a decisão LabSid AcquaNet, as simulações demonstraram que para o cenário atual os reservatórios passam longos períodos abaixo dos 15% de seu volume, para o Açude Carnaubal, os volumes ao longo da série passam 13,79% do tempo no nível 4, sendo esse valor para o modelo de abastecimento único, para a Barragem do Batalhão, o tempo foi de 6,62% no modelo de abastecimento compartilhado. Para o Açude Flor do Campo, o reservatório esteve 49,84% do tempo no nível 4, sendo o reservatório com função de abastecimento a passar maior período neste nível, para o Açude Jaburu II, apesar de não possuir demandas de retirada fixas, o reservatório passou 62,85% do tempo abaixo dos 15%, sendo o maior período dentre os reservatórios estudados. Para o Açude Barra Velha, o reservatório contou com 30,14% do tempo no nível 4, o Açude Cupim, apesar de também não possuir demandas fixas, esteve em 54,91% do tempo abaixo do volume de 15%, o último reservatório do estudo, Açude Colina, esteve 23,13% do tempo com volumes no nível 4.

Aos serem avaliados os resultados obtidos para os cenários de 2031 e de 2041, é visto o aumento dos volumes dentro do nível 4, tendo um crescimento médio de 1,17% entre os cenários atual e 2031, já para os cenários atual e 2041, o aumento médio foi de 2,08%, dentre os reservatórios, o que apresentou o maior acréscimo de volumes dentro deste nível foi o reservatório Colina, já para os açudes Jaburu II e Cupim, não ocorreram modificações superiores a 0,2%.

Para o município de Crateús, foram avaliados dois modelos de abastecimento, os resultados para essas simulações demonstraram que o modelo de abastecimento compartilhado foi mais efetivo para a manutenção do abastecimento, possuindo porcentagem de desabastecimento de 0,23%, a qual é inferior aos encontrados no modelo de abastecimento

único. O modelo de abastecimento compartilhado também se mostrou mais efetivo para a manutenção dos volumes do Açude Carnaubal, fazendo com que ocorresse a diminuição do período no qual este se encontra no nível 4.

No cenário atual, como resultado ocorreu desabastecimento para o município de Novo Oriente, em 8,49% do tempo, sendo destes 5,3% de eventos de desabastecimento total. Para Independência, o desabastecimento ocorre em 1,4%, sendo 0,47% de desabastecimento total, no município de Quiterianópolis, os resultados demonstraram 10,67% de desabastecimento, com 7,94% de desabastecimento total. Para os cenários futuros foi observado um incremento médio de 1,34% para 2031 em relação ao cenário atual e de 2,67% para o cenário de 2041 em relação com o cenário atual.

Estes resultados demonstram que o sistema já se encontra sobrecarregado para o uso com abastecimento humano, para os cenários futuros o sistema se mostra ainda mais frágil, de forma a impedir o crescimento dos municípios, atrasando investimentos e impossibilitando a agricultura local.

REFERÊNCIAS

ALBANO, G. D. **Integração de um modelo matemático de quantidade de água em rede de fluxo (AcquaNet) com um modelo matemático de qualidade de água em represas (CE-QUAL-R1) Estudo de Caso: Represa Jaguari-Jacarei – Sistema Cantareira.** 230f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 2004.

ALEXANDRE, A. M. B., MARTINS, E. S., CLARKE, R. T., REIS, D. S. JR. **Regionalização de Parâmetros de Modelos Hidrológicos.** In: Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, João Pessoa – PB, 2005.

ARAGÃO, T. G. **Transposição das águas do rio São Francisco para a bacia do rio Paraíba: uma avaliação da sinergia e sustentabilidade hídrica utilizando o modelo de rede de fluxo AcquaNet.** 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Campina Grande, 2008.

BILLERBECK, C. **Regras operativas e análise de desempenho de sistemas de reservatórios obtidas por modelos de programação dinâmica, redes neurais e simulação em rede de fluxo.** 100f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. São Paulo, 2018.

BRANDÃO, J. L. B. **Modelo para operação de sistemas de reservatórios com usos múltiplos.** 160f. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

CARVALHO, M. A., MÉLLO JUNIOR, A. V., SCHARDONG, A., PORTO, R. L. L. **Sistema de suporte à decisão para alocação de água em projetos de irrigação.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v. 13, n. 1, p. 10 – 17, 2009.

CEARÁ, G. E. **Plano estadual de convivência com a seca ações emergenciais e estruturantes.** Fortaleza, 2015.

CEARÁ, G. E. **Projeto de implantação de sistemas de adutoras para o abastecimento humano no estado do Ceará – Planejamento inicial dos sistemas de adução e elaboração de mapa do estado do Ceará com a disposição preliminar das adutoras.** Fortaleza, 2017.

CHAGAS, R. M. **Modelagem hidrodinâmica no baixo São Francisco e análise da quantidade e da qualidade de água para irrigação.** 136f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2009.

CID, D. A. C. **Alocação intertemporal e múltiplos usuários: estudo de caso sistema Jaguaribe - metropolitano.** 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

COGERH; FUNCEME, **Portal Hidrológico do Ceará.** Disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br/> Acesso em: 02/07/2019.

COGERH, **Atlas dos Recursos Hídricos do Ceará**. Disponível em: <http://atlas.cogerh.com.br/>
Acesso em: 02/07/2019.

ESTÁCIO, A. B. S.; SOUZA FILHO, F. A.; ROCHA, R.V. **Análise da incerteza de modelo hidrológico com uso de otimização multiobjectivo e impacto na incerteza de oferta hídrica: Estudo de caso do reservatório Orós**. p. 123-137. In: ADAPTA: Gestão adaptativa do risco climático de seca/ organizado por Francisco de Assis de Souza Filho, Samiria Maria Oliveira da Silva, Rosa Maria Formiga-Johnsson, *et. al.* - Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora 2019.

FEITOSA, A. P. **Otimização do uso das águas da barragem Santa Cruz – RN**. 89f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária. Natal, 2012.

FREITAS, M. A. S; PORTO, A. S. **Considerações sobre um modelo determinístico chuvas-vazão aplicado a bacias do semi-árido nordestino**. Revista Tecnologia. v.11, n.1, 1990.

IBGE, **Tabelas de estimativas populacionais para os municípios e para as Unidades da Federação brasileiros em 01.07.2019**. Disponível em:
<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?edicao=25272&t=resultados> Acesso em: 28/10/2019.

INMET, **Normais Climatológicas do Brasil**. Disponível em:
<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas> Acesso em: 28/10/2019.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ – IPECE. **Perfil Municipal 2017 Crateús**. Fortaleza: IPECE, 2018a.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ – IPECE. **Perfil Municipal 2017 Independência**. Fortaleza: IPECE, 2018b.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ – IPECE. **Perfil Municipal 2017 Novo Oriente**. Fortaleza: IPECE, 2018c.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ – IPECE. **Perfil Municipal 2017 Quiterianópolis**. Fortaleza: IPECE, 2018d.

LABSID – **Laboratório de sistemas de suporte a decisão** – USP. ACQUANET – **Modelo para alocação de água em sistemas complexos de recursos hídricos – manual do usuário**. p.22, 2002.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. **Simulação hidrológica: Aplicações de um modelo simplificado**, In: Anais do III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, v.2, 42-62, Fortaleza, 1981.

LIVELE, V. A. **Avaliação de benefícios económicos da água alocada para agricultura irrigada: Aplicação no sistema hídrico da parte moçambicana da bacia do rio Limpopo.** 135f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MEDEIROS, G. C. S.; MEDEIROS, J. D. F.; MAIA, A. G. **Avaliação do atendimento às demandas hídricas da bacia hidrográfica do rio Seridó-RN utilizando o modelo de rede de fluxo AcquaNet.** In: Anais XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Brasília – DF, 2015.

NASH, J. E. e SUTCLIFFE, J. V. **River flow forecasting through conceptual models, part I – a discussion of principles.** Journal of Hydrology, 10, p. 282-290, 1970.

ROA-GÁRCIA, M. C. **Equity, efficiency and sustainability in water allocation in the Andes: Trade-offs in a full world.** Water Alternatives. v. 7, n.2, p. 298-319, 2014.

ROCHA, R.V.; SOUZA FILHO, F. A.; ESTÁCIO, A. B. S. **Análise das incertezas dos parâmetros na modelagem hidrológica chuva-vazão SMAP através de abordagem bayesiana formal: Estudo de caso do reservatório Orós.** p. 139-146. In: ADAPTA: Gestão adaptativa do risco climático de seca/ organizado por Francisco de Assis de Souza Filho, Samiria Maria Oliveira da Silva, Rosa Maria Formiga-Johnsson, *et. al.*- Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora 2019.

SPEED, R. *et. al.* **Basin Water Allocation Planning. Principles, procedures and approaches for basin allocation planning.** UNESCO, Paris. p. 143. 2013.

UFC/COGERH. **Estudos de regionalização de parâmetros de modelo hidrológico chuva-vazão, para as bacias totais e incrementais dos reservatórios monitorados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos.** Relatório 1.1.11. Convênio UFC/COGERH/FCPC. Fortaleza, p. 26, 2013.

YAKOWITZ, S., **Dynamic programming applications in water resources.** Water Resour. Res., 18(4), 673-696, 1982.

YEH, W. W-G. **Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review.** Water Resources Research, v.21, n.12, p. 1797-1818, 1985.

XU, C.-Y.; VANDEWIELE, G. L. **Sensitivity of monthly rainfall-runoff models to input errors and data length,** Hydrological Sciences Journal, 39:2, p. 157-176, 1994.