



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

BÁRBARA VIANA BEZERRA NOBRE

**MODELAGEM HIDROLÓGICA APLICADA À AVALIAÇÃO DA SINERGIA HÍDRICA
NO RESERVATÓRIO CASTANHÃO**

Recife
2023

BÁRBARA VIANA BEZERRA NOBRE

**MODELAGEM HIDROLÓGICA APLICADA À AVALIAÇÃO DA SINERGIA HÍDRICA
NO RESERVATÓRIO CASTANHÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial necessário à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo.

Recife

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

N754m Nobre, Bárbara Viana Bezerra.
Modelagem hidrológica aplicada à avaliação da sinergia hídrica no
reservatório Castanhão / Bárbara Viana Bezerra Nobre, 2023.
154 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2023.
Inclui referências e apêndices.

1. Engenharia civil. 2. CAWM IV. 3. Modelo CAROS. 4. Simulação
de operação de reservatórios. 5. Sinergia hídrica. I. Cirilo, José Almir
(Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2023 - 170

BÁRBARA VIANA BEZERRA NOBRE

**MODELAGEM HIDROLÓGICA APLICADA À AVALIAÇÃO DA
SINERGIA HÍDRICA NO RESERVATÓRIO CASTANHÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial necessário à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em 24/02/2023

Orientador:

Prof. Dr. José Almir Cirilo - Universidade Federal de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência

Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra (examinador externo)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho (examinador externo)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Sheila, uma grande entusiasta de todas as minhas experimentações e que sempre colocou minha formação humana e intelectual em primeiro lugar.

Ao meu companheiro, Pablo (mon amour), pelo constante incentivo, carinho e paciência durante toda a caminhada.

À minha tia Regina, tomada de nós após uma batalha ingrata contra o câncer. Pessoa de coração gigante, que cuidou de mim como uma segunda mãe e tornou minha infância tão rica em amor, meus mais especiais agradecimentos em meio a essa saudade avassaladora.

Aos meus professores da UFC, especialmente professor Erlon Lopes, por todo apoio e que, infelizmente, também não está mais entre nós. À professora Samíria Maria por todo suporte e incentivo. Ao professor Assis de Souza Filho, por transmitir tamanha paixão aos estudos hidrológicos e ser uma fonte inesgotável de inspiração. À professora Ana Bárbara, por tanto carinho com os alunos.

Ao meu orientador da UFPE, Prof. Dr. José Almir Cirilo, pela vasta experiência, suporte, tranquilidade e dedicação com os alunos. Aos professores maravilhosos da UFPE, como Profa. Lourdinha, Prof. Wanderli e Prof. José Roberto, minha profunda gratidão.

Aos participantes da banca examinadora Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra, Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva e Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho, agradeço pela disponibilidade para avaliar e contribuir com este trabalho.

Às amigas(os) que sempre estiveram presentes e que tornaram a jornada mais alegre, especialmente Dea Castro, a irmã que eu escolhi na vida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento da bolsa de estudos durante o curso de Mestrado.

Flebas, o fenício, há quinze dias morto,
Esqueceu o grito da gaivota, o inflar do mar profundo
E os lucros e as perdas.

Uma corrente submarina murmurando
Seus ossos recolheu. Imergindo e aflorando
Flebas ultrapassou velhice e mocidade
E na voragem se perdeu.

Gentio ou judeu
Ó tu que a roda giras e a barlavento olhas
Pensa em Flebas
Outrora teu igual em estatura e linhagem.

(T. S. Eliot: de *A Terra Devastada*, IV – *Morte pela Água*
Tradução: Imelda Ribeiro de Faria)

RESUMO

Esta pesquisa busca aplicar o modelo hidrológico CAWM IV para simulação do aporte de vazões em reservatórios-chave do estado do Ceará. O modelo foi escolhido com base em sua comprovada performance para regiões áridas e semiáridas, já utilizado em outros estudos e projetos desenvolvidos para o nordeste brasileiro. Objetiva-se determinar o volume de vazões naturais que desembocam em reservatórios significativos situados ao longo do caminho das águas da transposição do São Francisco. Posteriormente, aplicar o modelo de operação de reservatórios CAROS, de forma a se calcular a sinergia hídrica proveniente do aporte volumétrico dessas águas exógenas. Com esse propósito, foram modeladas 8 sub-bacias hidrográficas do estado do Ceará, percorrendo o Projeto de integração do São Francisco (PISF) até a Região Metropolitana de Fortaleza. Os resultados obtidos com o CAWM IV foram considerados satisfatórios, com destaque para as médias e altas vazões. Apesar da sinergia hídrica ter sido calculada somente até o reservatório Castanhão, esta pode ser estendida até o sistema de reservatórios que abastecem a RMF de forma integrada. Constatou-se um ganho sinérgico entre 706 e 850 hm³ anuais, bem como um incremento na vazão média regularizável, correspondendo a resultados encontrados anteriormente por outros autores. Mediante a análise do reservatório Castanhão, a presente pesquisa demonstrou o ganho sinérgico da transposição das águas do São Francisco nas vazões regularizadas, decorrentes das reduções dos volumes vertidos e evaporados e aumento do volume acumulado.

Palavras-chave: CAWM IV; modelo CAROS; simulação de operação de reservatórios; sinergia hídrica.

ABSTRACT

This research seeks to apply the CAWM IV hydrological model to simulate the input of flows in key reservoirs in the state of Ceará. The model chosen has a proved performance for arid and semi-arid regions, already used in other studies and projects developed for the Brazilian Northeast. The objective is to determine the volume of natural flows that run into significant reservoirs located along the path of the waters of the São Francisco transposition project. Subsequently, apply the CAROS reservoir operation model, in order to calculate the water synergy resulting from the volumetric input of these exogenous waters. For this purpose, eight hydrographic sub-basins in the state of Ceará were modeled, covering the São Francisco Integration Project (PISF) to the Metropolitan Region of Fortaleza. The results obtained with the CAWM IV were satisfactory, with emphasis on medium and high flows. Although the water synergy was calculated only up to the Castanhão reservoir, it can be extended to the system of reservoirs that supply the RMF in an integrated manner. A synergistic gain between 706 and 850 hm³ per year was verified, as well as an increase in the average adjustable flow, corresponding to results previously found by other authors. Through the analysis of the Castanhão reservoir, the present research demonstrated the synergistic gain of the transposition of the exogenous waters of the São Francisco in the average flows, resulting from the reduction of the spilled and evaporated volumes and the increase of the accumulated volume.

Keywords: CAWM IV; CAROS model; reservoir operation simulation; water synergy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Bacias Hidrográficas do estado do Ceará (Brasil).	33
Figura 2 -	Localização das sub-bacias e suas respectivas estações fluviométricas no estado do Ceará.....	33
Figura 3 -	Tipos de vegetação na área das sub-bacias delimitadas no estado do Ceará.	35
Figura 4 -	Mapa dos tipos de relevo de acordo com a CPRM no estado do Ceará.	37
Figura 5 -	Hipsometria na região das sub-bacias demarcadas.	38
Figura 6 -	Mapa das classes de declividade propostas pela EMBRAPA para a área em análise.	38
Figura 7 -	Classificação Hidrológica dos Solos conforme valores de CN tabelados.	40
Figura 8 -	Divisões climáticas para o recorte geográfico das sub-bacias em comento.	42
Figura 9 -	Isoietas de precipitação média anual (1977-2006).	43
Figura 10 -	Domínios Hidrolitológicos para a área demarcada.	45
Figura 11 -	Bacias hidrográficas da Divisão Hidrográfica Nacional para a área de estudo e estações fluviométricas utilizadas.	46
Figura 12 -	Mapa das sub-bacias demarcadas a partir de estações fluviométricas selecionadas na Bacia Hidrográfica do rio Salgado.....	47
Figura 13 -	Mapa da sub-bacia demarcada a partir de estação fluviométrica selecionada na Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe.	50
Figura 14 -	Mapa da sub-bacia demarcada a partir de estação fluviométrica selecionada na Bacia Hidrográfica do Médio Jaguaribe.	51
Figura 15 -	Mapa das sub-bacias demarcadas a partir de estações fluviométricas	

	selecionadas na Bacia Hidrográfica do Banabuiú.....	52
Figura 16 -	Mapa da sub-bacia demarcada a partir de estação fluviométrica selecionada na Bacia Hidrográfica do Banabuiú.....	53
Figura 17 -	Mapa da sub-bacia demarcada a partir de estação fluviométrica selecionada na Bacia Hidrográfica Metropolitana.....	55
Figura 18 -	Mapa da sub-bacia demarcada a partir de estação fluviométrica selecionada na Bacia Hidrográfica Metropolitana.....	56
Figura 19 -	Raster com MDT para a área das bacias hidrográficas do Salgado, Alto Jaguaribe e Médio Jaguaribe sem depressões.	58
Figura 20 -	Raster gerado com a direção do fluxo para a área das bacias hidrográficas do Salgado, Alto Jaguaribe e Médio Jaguaribe.	59
Figura 21 -	Rede de drenagem gerada para a área das bacias hidrográficas do Salgado, Alto Jaguaribe e Médio Jaguaribe, com valor de quantidade de células de 500 unidades.	59
Figura 22 -	Rede de rios e afluentes principais para a área das bacias hidrográficas do Salgado, Alto Jaguaribe e Médio Jaguaribe, com valor de quantidade de células de 500.000 unidades.....	60
Figura 23 -	Vetorização do raster gerado com a delimitação da sub-bacia de Jaguaribe.	60
Figura 24 -	Exemplo de obtenção de dados pluviométricos de estações de monitoramento da ANA no Qgis pelo plugin LHC.	62
Figura 25 -	Fluxograma demonstrativo da modelagem hidrológica utilizando o modelo CAWM IV.....	65
Figura 26 -	Área Inundada do reservatório Castanhão (CE).....	66
Figura 27 -	Fluxograma demonstrativo dos dados necessários para as simulações de operações de reservatórios com o modelo CAROS.	67
Figura 28 -	Vazão média no período de calibração por dia do ano na Estação	

	35830000 – Aracoiaba (Rio Choró).....	77
Figura 29 -	Curva de Permanência da 1ª simulação para a sub-bacia de Aracoiaba.....	78
Figura 30 -	Vazão média no período de calibração por dia do ano na 2ª simulação na Estação 35830000 – Aracoiaba (Rio Choró).....	79
Figura 31 -	Curva de Permanência da 2ª simulação para a sub-bacia de Aracoiaba.....	79
Figura 32 -	Vazão média no período de calibração por dia do ano na Estação 35880000 – Chorozinho (Rio Choró).	82
Figura 33 -	Curva de Permanência para a sub-bacia de Chorozinho.	82
Figura 34 -	Vazão média no período de calibração por dia do ano na Estação 36160000 – Iguatu (Rio Jaguaribe).....	84
Figura 35 -	Curva de Permanência para a sub-bacia de Iguatu.....	85
Figura 36 -	Vazão média no período de calibração por dia do ano na Estação 36290000 – Icó (Rio Salgado).	87
Figura 37 -	Curva de Permanência para sub-bacia de Icó.....	87
Figura 38 -	Vazão média no período de calibração por dia do ano na Estação 36320000 – Jaguaribe (Rio Jaguaribe).....	90
Figura 39 -	Curva de Permanência para a sub-bacia Jaguaribe.....	90
Figura 40 -	Vazão média no período de calibração por dia do ano na Estação 36470000 – Senador Pompeu (Rio Banabuiú).	92
Figura 41 -	Curva de Permanência para a sub-bacia de Senador Pompeu.....	92
Figura 42 -	Vazão média no período de calibração por dia do ano na Estação 36520000 – Quixeramobim (Rio Quixeramobim).....	94
Figura 43 -	Curva de Permanência para a sub-bacia de Quixeramobim.	94
Figura 44 -	Vazão média no período de calibração por dia do ano na Estação	

	36580000 – Morada Nova (Rio Banabuiú).....	96
Figura 45 -	Curva de Permanência para a sub-bacia de Morada Nova.	97
Figura 46 -	Vazão média no período de calibração por dia do ano na Estação 36580000 – Morada Nova (Rio Banabuiú) para a 2ª simulação após mudanças no CAWM IV.	99
Figura 47 -	Curva de Permanência para a sub-bacia de Morada Nova para a 2ª simulação com o CAWM IV.	99
Figura 48 -	Curva Cota-Área-Volume do reservatório Castanhão.	101
Figura 49 -	Curva Volume-Área do açude Castanhão.	101
Figura 50 -	Curva Volume-Cota do açude Castanhão até o volume de 3.328,49 hm ³	102
Figura 51 -	Curva Volume-Cota a partir do volume de 3.328,49 hm ³	102
Figura 52 -	Operação do reservatório Castanhão antes do aporte das águas do São Francisco.	104
Figura 53 -	Operação do reservatório Castanhão após o aporte das águas do São Francisco (1ª Simulação).	105
Figura 54 -	Operação do reservatório Castanhão após o aporte das águas do São Francisco (2ª Simulação).	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Açudes de macro e grande porte monitorados pela COGERH e localizados no estado do Ceará.....	48
Tabela 2 -	Postos Fluviométricos utilizados para demarcação das sub-bacias de interesse.	61
Tabela 3 -	Nº de postos pluviométricos com dados utilizados no cálculo da chuva média para cada sub-bacia.....	63
Tabela 4 -	Postos de Evapotranspiração do INMET utilizados em cada sub-bacia.	64
Tabela 5 -	Parâmetros utilizados na calibração do modelo CAWM IV para cada sub-bacia delimitada.	74
Tabela 6 -	Coeficientes estatísticos obtidos na 1ª modelagem da estação 35830000 – Aracoiaba.	77
Tabela 7 -	Coeficientes estatísticos obtidos na 2ª modelagem da estação 35830000 – Aracoiaba.	78
Tabela 8 -	Coeficientes estatísticos obtidos na modelagem da estação 35880000 – Chorozinho.....	80
Tabela 9 -	Coeficientes estatísticos obtidos na modelagem da estação 36160000 – Iguatu.....	84
Tabela 10 -	Coeficientes estatísticos obtidos na modelagem da estação 36290000 – Icó.	86
Tabela 11 -	Coeficientes estatísticos obtidos na modelagem da estação 36320000 – Jaguaribe.	89
Tabela 12 -	Coeficientes estatísticos obtidos na modelagem da Estação 36470000 – Senador Pompeu (Rio Banabuiú).	91
Tabela 13 -	Coeficientes estatísticos obtidos na modelagem da Estação 36520000	

	– Quixeramobim (Rio Quixeramobim).....	93
Tabela 14 -	Coeficientes estatísticos obtidos na modelagem da Estação 36580000 – Morada Nova (Rio Banabuiú).....	96
Tabela 15 -	Comparação dos resultados da modelagem hidrológica para a sub- bacia de Morada Nova antes e depois dos aprimoramentos realizados no CAWM IV.....	98
Tabela 16 -	Informações utilizadas a respeito do reservatório Castanhão e valores das vazões incrementais após as simulações com o modelo CAROS.	103
Tabela 17 -	Vazão média regularizada pelo Castanhão antes da transposição do São Francisco.	104
Tabela 18 -	Vazão média regularizada pelo Castanhão após a transposição do São Francisco (1ª Simulação).	105
Tabela 19 -	Vazão média regularizada pelo Castanhão após a transposição do São Francisco (2ª Simulação).	106
Tabela 20 -	Volumes vertidos, evaporados e acumulados (hm ³) para o cálculo da Sinergia Hídrica após simulações com o modelo CAROS.....	107
Tabela 21 -	Diferença entre os volumes acumulados no início e fim do período das simulações.	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CAROS	Campus Agreste Reservoir Operation Model
CAWM	Campus Agreste Watershed Model
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Nacionais
CN-SCS	Curve Number – Soil Conservation Service
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
CPRM	Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GRASS	Geographic Resources Analysis Support System
GR4J	Gènie Rural À 4 Paramètres Journalier
HBV MODEL	Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
MDT	Modelo Digital de Terreno
MGB-IPH	Modelo de Grandes Bacias – Instituto de Pesquisas Hidráulicas
MODHAC	Modelo Hidrológico Auto-Calibrável
SMAP	Soil Moisture Accounting Procedure
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SUDENE	Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste
TOPMODEL	Topography-Based Hydrological Model

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	Objetivo principal	20
1.1.2	Objetivos específicos	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	21
2.2	OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS	28
2.2.1	Sinergia Hídrica.....	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	ÁREA DE ESTUDO: ESTADO DO CEARÁ, BRASIL	32
3.1.1	Localização	32
3.1.2	Vegetação	34
3.1.3	Relevo e tipos de solos.....	35
3.1.4	Características climáticas.....	40
3.1.5	Hidrogeologia	44
3.1.6	Hidrografia	45
3.2	METODOLOGIA.....	56
3.2.1	Modelagem Hidrológica.....	56
3.2.1.1	Obtenção e tratamento dos dados geoespaciais da bacia.....	56
3.2.2	Modelo de Operação de Reservatórios – CAROS.....	65
3.2.2.1	Sinergia Hídrica.....	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
4.1	SIMULAÇÃO DE VAZÕES	72
4.1.1	Estação 35830000 – Aracoiaba.....	75
4.1.2	Estação 35880000 – Chorozinho.....	80
4.1.3	Estação 36160000 – Iguatu.....	83
4.1.4	Estação 36290000 – Icó.....	85
4.1.5	Estação 36320000 – Jaguaribe.....	88

4.1.6	Estação 36470000 – Senador Pompeu.....	91
4.1.7	Estação 36520000 – Quixeramobim.....	93
4.1.8	Estação 36580000 – Morada Nova.....	95
4.2	DIFICULDADES ENCONTRADAS NA MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	100
4.3	CÁLCULO DA SINERGIA HÍDRICA	100
5	CONCLUSÃO	109
	REFERÊNCIAS.....	111
	APÊNDICE A - DEMONSTRAÇÃO DA MODELAGEM REALIZADA PELO MODELO CAWM IV E RESULTADOS OBTIDOS.....	117
	APÊNDICE B - INDICADORES DE EFICIÊNCIA ANUAIS PARA CADA SUB- BACIA MODELADA.....	120
	ANEXO A - MODELO CAMPUS AGRESTE <i>WATERSHED MODEL</i> – CAWM IV MEMORIAL DE CÁLCULO.....	134
	ANEXO B - CAMPUS AGRESTE <i>RESERVOIR OPERATION MODEL</i> – CA- ROS MEMORIAL DE CÁLCULO.....	149

1 INTRODUÇÃO

A escassez de água, em seus aspectos quantitativos e qualitativos, é uma problemática que gera crescentes preocupações, não só no Brasil, mas em todo planeta. Em regiões semiáridas, onde já se observa uma série de adaptações sociais e infraestruturais à falta periódica de precipitações, esse fator tende a agravar desigualdades regionais, sobretudo no quadro de referência dos eventos climáticos extremos, em que processos alhures podem influenciar eventos a nível local. Devido a isso, é essencial o desenvolvimento de políticas de redução da vulnerabilidade humana e ambiental aos riscos climáticos e a adoção de alternativas que melhor aproveitem e recuperem os recursos hídricos, com aperfeiçoamentos para uma gestão integrada e adoção de medidas de conservação.

Por vezes, o desenvolvimento econômico pressiona os recursos ambientais, já em delicado equilíbrio nessas regiões, de forma dramática, causando impactos que colocam em risco os ecossistemas e a sustentabilidade das atividades humanas a longo prazo. Várias pesquisas comprovam graves impactos no comportamento hidrológico de bacias hidrográficas devido a processos antrópicos, apontando as dificuldades de se separar os efeitos provocados por cada variável, já que a antropização é um fenômeno permanente, enquanto variações no clima são transitórias.

Para regiões áridas e semiáridas, a acentuada variabilidade temporal e espacial das chuvas e a falta de dados hidrológicos são fatores que recorrentemente dificultam a aplicação de métodos de modelagem matemática na definição do comportamento hidrológico das bacias. Esses métodos implicam no auxílio à tomada de decisões através de previsão e quantificação de vazões, correção de falhas em dados hidrológicos, amortecimento de picos de cheias, análise dos processos de ocupação e uso do solo, zoneamento, proteção e recuperação de áreas degradadas, gestão de infraestruturas, dentre outros.

Há uma diversidade de modelos hidrológicos disponíveis, com diversas características que os tornam mais propícios a serem utilizados em determinadas regiões em detrimento de outras. Os mais utilizados são os do tipo chuva-vazão, os quais

transformam os dados de chuva em fluxos superficiais e subsuperficiais que alimentam as calhas dos rios através de subsequentes parametrizações dos processos intermediários da transformação da chuva em vazão (TUCCI, 2005). Feitoza (2021) cita alguns exemplos de modelos hidrológicos desse tipo: SMAP – *Soil Moisture Accounting Procedure* (LOPES; BRAGA; CONEJO, 1981); HBV Model – *Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning* (BERGSTRÖM, 1976); TOPMODEL – *Topography-based Hydrological Model* (BEVEN & KIRKBY, 1979); TOPMO, uma versão modificada do TOPMODEL (MICHEL; PERRIN; ANDRÉASSIAN, 2003); HEC-HMS – *Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System* (USACE-HEC, 2000); Modelo Rio Grande, adaptado de Zhao (1984); GR4J – *Génie Rural à 4 Paramètres Journalier* (PERRIN; MICHEL; ANDRÉASSIAN, 2003); MODHAC – Modelo Hidrológico Auto-calibrável (LANNA, 1997) e; CAWM - *Campus Agreste Watershed Model* (CIRILO et al., 2020).

O CAWM, versão IV, foi utilizado nesta pesquisa por ser recomendada sua aplicação para regiões áridas e semiáridas com rios intermitentes. A região em análise faz parte da zona semiárida brasileira. O estado do Ceará possui 98,7% de sua área inserida no Polígono das secas (IBGE, 2019; SUDENE, 2017), com exceção das faixas litorâneas e continentais mais úmidas. Conforme Cadier (1994), um anticiclone quase permanente se detém sobre a região central do nordeste, impedindo o equador térmico na direção norte, o que provoca a irregularidade das precipitações, fenômeno anormal nessas latitudes. As principais características climáticas dessa área são baixas médias pluviométricas, geralmente abaixo dos 800 milímetros anuais, alta irregularidade na distribuição das chuvas, longos períodos de estiagem, rios intermitentes, elevadas temperaturas e taxas de evapotranspiração, solos pouco desenvolvidos e déficit hídrico.

Sendo um modelo do tipo concentrado e aplicado com simulações a passo de tempo diário ou mensal, o CAWM IV possui apenas dois parâmetros a calibrar, estando em fase de aprimoramentos para que reste apenas um parâmetro calibrável, o que simplifica a modelagem para regiões com poucos dados hidrológicos disponíveis e auxilia no processo de regionalização de parâmetros para bacias distintas com semelhanças morfoclimáticas, como realizado por Virões (2018) e Feitoza (2021).

Após a realização da modelagem hidrológica com o objetivo de simulação de

vazões afluentes em postos fluviométricos localizados no entorno de reservatórios estratégicos de macro e grande porte no estado, como definido pela COGERH (DANTAS, 2020, p. 32), foi calculada a sinergia hídrica através da comparação entre as perdas por evaporação, por vertimentos e pela liberação de volumes de água antes e depois do aporte volumétrico extra provindo da transposição das águas do rio São Francisco no reservatório Castanhão.

A sinergia hídrica é, basicamente, o ganho acima da parcela bruta de água exógena ao sistema original de um conjunto de reservatórios, que incrementa a vazão regularizada, sendo denominado de ganho sinérgico. Ou seja, ocorre um melhor aproveitamento das águas transpostas, com a diminuição das perdas por evaporação e por vertimentos e aumento do atendimento das demandas.

Através do modelo de operação de reservatórios desenvolvido na UFPE, modelo CAROS (*Campos Agreste Reservoir Operation Model*), foram analisados os ganhos sinérgicos na disponibilidade hídrica do Castanhão, já que o estado apresenta crescentes pressões ao sistema hídrico resultante de um intenso processo de modernização e industrialização.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo principal

A presente pesquisa visa aplicar o modelo hidrológico CAWM, versão IV, em algumas sub-bacias na região semiárida do estado do Ceará, visando simular vazões afluentes em reservatórios. Também visa avaliar um possível ganho sinérgico com a transposição das águas do rio São Francisco através de reduções das perdas com vertimentos e evaporações no reservatório Castanhão.

1.1.2 Objetivos específicos

- Contribuir com as discussões da modelagem hidrológica com o CAWM IV e com o modelo de operação de reservatórios CAROS através de novas aplicações e ajustes dos parâmetros utilizados;
- Avaliar as relações entre vazões naturais e incrementais aduzidas a reservatórios, denominada sinergia hídrica;
- Verificar se houve o ganho sinérgico da transposição das águas do São Francisco no reservatório Castanhão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA

O uso de modelos matemáticos a título de simplificação e representação de fenômenos em curso é capaz de auxiliar na detecção de padrões e na busca de evidências que possam embasar análises e tomada de decisões. Dessa forma, modelos hidrológicos podem ser definidos como representações matemáticas do ciclo hidrológico e seus componentes em relação a determinada área, geralmente uma bacia ou sub-bacia hidrográfica, para análises e previsões do comportamento hidrológico com base em entrada e saída de dados.

Cadier *et al.* (1987) definem modelo matemático como a representação em linguagem simples de algum objeto ou sistema com o objetivo de compreensão do seu funcionamento em relação a respostas geradas por diferentes entradas, o que requer um conhecimento profundo dos processos físicos envolvidos, retratados matematicamente. Tucci (1998) apresenta modelagem hidrológica como uma ferramenta de representação dos processos que ocorrem na bacia hidrográfica capaz de prever as consequências de diferentes eventos dos componentes do ciclo hidrológico em relação a valores observados.

As formas pelas quais essas equações matemáticas são convertidas em processos numéricos discretos, juntamente às limitações computacionais, conduzem à parametrização de interações complexas em escalas detalhadas que podem ou não ser explicitamente representadas. Por vezes, um conjunto de equações pode ser concebido como um conjunto de hipóteses que conectam informações e que são a melhor aproximação do modelador para compreender essas interações, levando em conta os fatores restritivos que se apresentam. Por conseguinte, um mesmo processo pode ser representado por formas diferentes, cada qual se mostrando mais apropriado para determinado objetivo, não existindo um modelo único ou melhor, mas aquele que melhor descreve um fenômeno (TUCCI; COLLISCHONN, 2001).

Por exemplo, em hidrologia, se o objetivo da modelagem é a previsão e o controle de eventos de cheias, deve-se procurar ajustar melhor os picos das vazões através da calibração dos parâmetros do modelo utilizado, ao passo que, para o dimensionamento de reservatórios e regularização de vazões, o melhor caminho é o ajuste da média dos volumes escoados, através do balanço dos máximos e mínimos observados.

Ao descrever fenômenos em linguagem matemática e modular, os modelos hidrológicos ajustam seus parâmetros com base em dados locais, principalmente séries de precipitações e vazões. Sendo peremptoriamente utilizadas como dado de saída, as vazões representam de forma integrada todos os processos hidrológicos da bacia, com suas infinitas interações, gerando incertezas sobre as combinações reais dos parâmetros (TUCCI; COLLISCHONN, 2001).

O avanço tecnológico no geral e de ferramentas computacionais, como a obtenção de dados através de sensoriamento remoto e o advento de técnicas de geoprocessamento, contribuem para um maior conhecimento do comportamento de cada componente do ciclo hidrológico, tornando a modelagem mais eficiente. Contudo, ainda imperam incertezas que são oriundas de diferentes fontes. Segundo Kuczera *et al.* (2006), estas podem estar associadas aos próprios parâmetros do modelo, a erros estruturais na modelagem, erros de *input* (dados de precipitação, vazão, evapotranspiração) e erros no *output* para calibração (séries temporais de vazões, etc.).

Para Cirilo e Mendes (2013), tanto a formulação como a aplicação de qualquer modelo implicam em diversos riscos, por exemplo, estruturação e correlações equivocadas, sugestões e previsões indevidas, aproximações e analogias irrealistas provenientes de ostentação a simbologias, simplificações e intransigência matemática. Entre os problemas mais comuns, eles citam:

Visão da realidade excessivamente formalizada; Estruturação dos problemas de uma forma muito mais exata do que permitem os dados utilizados, resultando em previsões inadequadas; Ansiedade, quando do desenvolvimento de modelos, pela generalidade; Atitudes de desprezo, quando do desenvolvimento de modelos, pelo caso particular (CIRILO; MENDES, 2013, p. 19).

A representação de processos naturais requer tanto uma definição de escala, por exemplo, qual a melhor maneira de representar processos que ocorrem em nascentes e

que influenciam todo o comportamento médio de uma bacia de poucos milhares de quilômetros quadrados e no volume escoado no respectivo exutório, quanto a análise das interações entre dados de natureza não-linear e potencialmente caóticos.

Destarte, todos os modelos requerem ajustes em seus parâmetros, até mesmo daqueles medidos em campo. Na modelagem hidrológica, de acordo com Tucci e Collischonn (2001), as principais dificuldades encontradas são:

- Estimativas quanto a dados de precipitação, fundamentais para qualquer modelo do tipo chuva-vazão, pois qualquer erro de avaliação pode levar à distorção do ajuste;
- Como os modelos são ajustados apenas na saída de dados através da vazão observada, todas as interações internas do modelo, que possuem infinitas combinações, podem sofrer distorções, influenciando os parâmetros obtidos;
- Em modelos distribuídos, o balanço hídrico é realizado por célula, sendo um fator quantitativo limitante, já que um número muito grande de células implica em um número de parâmetros quase infinito, dificultando o ajuste do modelo através de procedimentos tradicionais de tentativa e erro por módulo. Geralmente o ajuste requer a associação dos parâmetros a um plano de informação cuja abstração maior da realidade dificulta certas análises, como a influência antrópica no sistema.

Portanto, em cada modelo deve-se observar quais parâmetros necessitam de ajustes, quais devem ser medidos em campo, quais devem ser estimados e quais interações podem distorcer a realidade.

A escolha de um determinado modelo hidrológico se baseia em critérios que dependem da região de aplicação para obtenção de dados válidos de forma a alimentar suas variáveis. Knight (2006) destaca que há pelo menos cinco objetivos principais: 1) projetos de intervenção na bacia ou sub-bacia considerada; 2) previsão de vazões em tempo real; 3) reconstrução de cheias passadas; 4) contribuições para cenários futuros e tomada de decisão e; 5) atividades de operação e manutenção de infraestruturas associadas. Neste trabalho, o objetivo na aplicação da modelagem é a simulação dos volumes escoados em determinadas sub-bacias hidrográficas e que chegam a reservatórios-chave na alocação espacial e interanual de água para contribuição na análise de possíveis otimizações na gestão hídrica desses reservatórios.

Autores como Vertessy *et al.* (1993), Maidment *et al.* (1996) e Tucci (1998) desenvolvem discussões detalhadas sobre categorização de modelos hidrológicos. Estes podem ser classificados com base em diferentes aspectos. Em relação ao tipo de variáveis utilizadas, podem ser estocásticos – quando pelo menos uma das variáveis possui comportamento aleatório, ou determinísticos – quando as variáveis não são consideradas sob viés probabilístico. Entretanto, é válido notar que mesmo quando uma variável de entrada for aleatória, o modelo será considerado determinístico quando se produz um único valor de saída.

Quanto ao tipo de relações entre as variáveis, podem ser classificados como empíricos ou baseados em processos. Modelos empíricos utilizam séries de observações, sendo geralmente simples e de fácil uso, porém, pouco robustos e limitados a regiões que possuem muitos dados disponíveis ou às relações nas quais essas observações foram estimadas, além de não estarem aptos para simulações envolvendo mudanças imprevistas como eventos de extremos climáticos e transformações antrópicas envolvendo uso e ocupação do solo.

Já os modelos baseados em processos, geralmente mais complexos que os empíricos, procuram descrever todos os processos envolvendo o fenômeno a modelar. Estes podem ser subdivididos em conceituais e físicos. Os primeiros fazem uso de equações empíricas, podendo ser nomeados semi-empíricos, descrevendo o sistema de acordo com as leis da física. Os segundos utilizam as principais equações diferenciais do sistema considerado para representar sua dinâmica com significação física dos parâmetros, que são estimados por medidas reais. Modelos baseados em processos são geralmente empregados quando há necessidade de representação de sistemas detalhados e multivariados e que requerem um conjunto de informações e parametrizações delicadas.

Em relação à discretização, os modelos são classificados em concentrados, ou pontuais, e distribuídos. Nos modelos concentrados, todas as variáveis de entrada e saída são consideradas como representativas para toda a área de interesse. Já os modelos distribuídos buscam representar a variabilidade espacial presente nas variáveis utilizadas. Geralmente, cada elemento discretizado é tratado como um ponto que

representa uma área homogênea. Quando se procura uma maior correlação com o fenômeno, pode-se considerar a existência de relação espacial entre elementos vizinhos.

Quanto à dependência temporal, os modelos podem ser considerados estáticos – quando a solução das equações é diretamente resultante do conjunto de dados de entrada – ou dinâmicos – quando o resultado depende de várias iterações.

Já foi evidenciado pela literatura científica que em regiões áridas e semiáridas a variabilidade temporal e espacial das precipitações é bem mais acentuada do que em regiões úmidas e subúmidas. Isso provoca alterações na calibração dos parâmetros utilizados, sejam eles físicos ou conceituais.

Nessas regiões, a vazão é uma variável de fundamental importância para estudos hidrológicos, a de maior dinamização, já que se encontra correlacionada ao comportamento das precipitações irregulares, sendo, por vezes, intensas e rápidas, gerando fluxos intensos e rápidos, expostos a uma grande taxa de evapotranspiração.

A área de estudo insere-se no estado do Ceará, pertencente ao nordeste brasileiro, onde os totais anuais de precipitação geralmente ficam abaixo dos 800 milímetros, podendo alcançar 400 milímetros em alguns casos. A irregularidade das precipitações é alta, com coeficientes de variação dos totais anuais superiores a 0,25, ultrapassando, por vezes, os 0,40. Cadier (1994) cita que na bacia experimental do Sumé, na Paraíba, o total de precipitação no ano de 1983 foi de 248 milímetros, enquanto em 1985 alcançou os 1.438 milímetros.

O estado do Ceará está quase completamente inserido no Polígono das Secas, o que exprime a importância do estudo dessas áreas, especialmente pelo semiárido brasileiro ser um dos mais povoados do mundo (AB'SABER, 2003).

Dessa forma, a modelagem hidrológica no semiárido apresenta desafios próprios, como, além da variabilidade de chuvas já mencionada, a escassez de dados de precipitação e vazão, especialmente na região semiárida nordestina, com a desativação de várias estações de monitoramento hidrológico da SUDENE e DNOCS desde a década de 1990 e a presença de inúmeras barragens e reservatórios que influenciam no regime de vazões e, conseqüentemente, na calibração dos parâmetros dos modelos utilizados.

Para citar algumas das pesquisas mais relevantes presentes no Portal de Periódicos da CAPES, temos a utilização do modelo SMAP por Santos e Fontes (2014)

na bacia do rio Salitre, sub-bacia do São Francisco, inserida no semiárido baiano com aplicação de técnica de multicalibração para condições hidrológicas distintas que foi comparada com resultados da calibração tradicional, apresentando ganhos na representação das vazões.

Felix e Da Paz (2016) analisaram o desempenho do modelo MGB-IPH, geralmente utilizado para grandes bacias com rios perenes, na representação dos padrões espaço-temporais hidrológicos na bacia do rio Piancó, semiárido paraibano. Os autores escolheram uma representação diária a ser comparada com métricas de passo de tempo mensal e outros modelos encontrando dificuldades na simulação dos eventos de cheias e relacionados à intermitência dos rios. Os resultados se mostraram satisfatórios apenas quanto aos processos intermediários na transformação das precipitações em vazões, como a sazonalidade, magnitude e distribuição espacial das chuvas.

Já autores como Celeste *et al.* (2014) resolveram aplicar o modelo conceitual *Tank Model* juntamente ao método de redes neurais artificiais na simulação chuva-vazão para a bacia do rio Japaratuba em Sergipe. Foram configurados onze tipos de redes neurais e quatro tanques para testes que resultaram em sete modelos neurais mais eficientes que o *Tank Model*, que também apresentou resultados satisfatórios.

O modelo HEC-HMS foi utilizado por Cabral (2017) objetivando uma análise das incertezas e erros do método CN-SCS adotado. A aplicação se deu primeiramente na bacia do rio São Miguel, em Alagoas para, em seguida, ser realizada simulação de eventos hidrológicos com dados de precipitação obtidos pelo radar meteorológico do CEMADEN de Maceió, capital do estado. A simulação representou bem o tempo das vazões de pico, mas subestimou as magnitudes com erros de até 26%. No geral, a aplicação mostrou-se satisfatória para aplicação em outras bacias para previsão de eventos de cheias.

O MODHAC é um modelo hidrológico concentrado considerado capaz de ser utilizado para o semiárido e, portanto, muito utilizado com esse propósito (LANNA, 1997), tendo sido aplicado nos estudos para a transposição do rio São Francisco pela ANA, no Plano Estadual de Recursos Hídricos do Ceará, Planos Diretores de bacias da Bahia e no Projeto Atlas Nordeste (VIRÃES, 2018).

Ribeiro Neto et al. (FELIX; PAZ, DA, 2016) utilizaram o modelo MGB-IPH em uma sub-bacia do São Francisco, modificando o modelo para que o reservatório de interceptação fosse considerado um parâmetro calibrável para a reprodução das vazões no intuito de comparar os resultados obtidos com o MODHAC. Os resultados foram insatisfatórios, mesmo para o passo de tempo mensal.

Nessa esteira, Virões e Cirilo (2019), após uma revisão da literatura sobre modelagem hidrológica em regiões semiáridas, propõem a regionalização de parâmetros para regiões com escassez de dados com foco nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco com utilização do MODHAC. Foram selecionadas 45 estações fluviométricas com pelo menos 8 anos consecutivos de dados a partir do ano 2000 e adotado o critério da proximidade geográfica entre estações, sendo avaliadas propriedades físicas e climáticas, além da análise da qualidade dos dados e da rede de monitoramento pluviométrico. Os autores constataram a interferência de reservatórios e perda de estações como problemas frequentes. Os resultados foram satisfatórios para as vazões mais altas e médias, não apresentando bons ajustes para vazões menores.

Buscando superar as dificuldades encontradas na modelagem em regiões semiáridas, o modelo conceitual de discretização concentrada, com passo de tempo diário ou mensal, CAWM, versão IV, foi desenvolvido pelo Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pernambuco. Através da incorporação de dados geoespaciais e uso de geoprocessamento, este modelo possui poucos parâmetros para calibração e se baseia em informações das características físicas das bacias no intuito de contribuir para a regionalização desses parâmetros para bacias com características físicas similares com poucos dados disponíveis. Gomes *et al.* (2021) aplicaram o CAWM IV em quatro bacias no semiárido pernambucano com resultados satisfatórios entre 55 a 92% das simulações, a depender dos indicadores de desempenho das análises.

Feitoza (2021) partiu dos dados das estações fluviométricas selecionadas por Virões e Cirilo (2019) e utilizou o CAWM IV nas mesmas sub-bacias delimitadas objetivando comparar os resultados entre os modelos. A autora ressalta as mesmas dificuldades em relação à existência de reservatórios e perda do monitoramento de chuvas e vazões nessas regiões, por isso integrou dados da ANA, APAC e FUNCEME

para incrementar os resultados, ainda não eliminando as discontinuidades das séries temporais observadas.

O passo de tempo diário, a representação física mais detalhada das bacias e o ajuste de um dos parâmetros calibráveis em uma faixa de valores que se mostrou favorável, restando apenas um parâmetro a calibrar no CAWM IV, em vez dos 14 exigidos pelo MODHAC, levou a melhores simulações em algumas estações em que o MODHAC não obteve sucesso e melhores indicadores de desempenho. O ajuste para as baixas vazões foi o mais problemático em ambos os modelos. Os resultados obtidos confirmam a capacidade do CAWM IV em simular bem os processos hidrológicos em regiões semiáridas.

Até o presente momento, foram desenvolvidas cinco versões do CAWM. Após as primeiras três versões embrionárias, a versão IV é adaptada para rios intermitentes e regiões áridas e semiáridas e é a que será utilizada nesta pesquisa. A versão V ganhou um reservatório subterrâneo e é indicada para aplicação em regiões úmidas e subúmidas, com rios perenes. O memorial de cálculo do modelo CAWM consta no Anexo I.

2.2 OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

A construção de barragens e reservatórios que realocam água tanto em termos geográficos quanto temporais, seja sazonal ou interanualmente, revolucionou as capacidades de apropriação desse recurso pelas diferentes sociedades humanas desde então. Destarte, uma contínua reformulação das políticas de gestão dessas infraestruturas se faz necessária haja vista as contínuas transformações sociais, econômicas, industriais e naturais, seja a nível local, regional, nacional ou transnacional.

A título de exemplo, no Ceará, a construção do canal do trabalhador e implantação do Eixão das Águas, eixo de integração da bacia do rio Jaguaribe com a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), constituem o sistema Jaguaribe-Metropolitano, no qual a irrigação é responsável por 90% da demanda hídrica, destinada, sobretudo, à produção agrícola com ênfase na fruticultura irrigada (SILVA; SOUZA FILHO; AQUINO, 2017). A bacia do rio Jaguaribe possui três grandes reservatórios responsáveis por uma alocação interanual de água e que perenizam longos trechos de

rios: Orós, Banabuiú e Castanhão, que, somados, representam 10.241,00 hm³ (Tabela 1) de capacidade de acumulação.

O abastecimento da RMF se dá a partir de cinco reservatórios integrados por canais e adutoras: Gavião, Pacajus, Aracoiaba, Pacoti e Riachão, com 871,00 hm³ de capacidade volumétrica. A partir do aumento substancial da demanda hídrica decorrente das políticas de industrialização estaduais, consideradas estratégicas para a modernização do estado, como a construção do Complexo Industrial do Porto do Pecém (CIPP), esse abastecimento passou a ser realizado também pelas águas provenientes de transposições de bacias, como a do sistema Jaguaribe-Metropolitano, já mencionada, e a do São Francisco.

A crescente demanda e a ampliação da escassez hídrica – seja por intensos processos poluidores, retirada de água em volumes maiores do que a capacidade de recarga e intensificação das mudanças climáticas – tornam indispensáveis novas formulações nos métodos, regras e políticas de gestão de recursos hídricos para operação de reservatórios e alocação de água.

Ao realizar transferências de água através de transposições de bacias, a gestão desse recurso enfrenta obstáculos provenientes das complexas dinâmicas políticas, socioeconômicas e das desigualdades regionais, em que esses sistemas resultantes podem gerar tanto impactos negativos quanto positivos aos diferentes usuários das bacias doadoras e receptoras, a depender das alternativas escolhidas (SILVA; SOUZA FILHO; AQUINO, 2017).

De acordo com Machado (2009), já que a legislação brasileira contempla os usos múltiplos das águas e apenas define como prioridade em situações de escassez o abastecimento humano e a dessedentação de animais, deixando os demais usos (irrigação, navegabilidade, geração de energia, recreação, controle de cheias) sem preferências antecipadamente definidas, acaba competindo ao gestor público estabelecê-las, o que pode ocorrer com base em fatores como eficiência econômica, sustentabilidade, equidade e preservação, ou com base em interesses de segmentos sociais específicos em detrimento de outros. Por conseguinte, os requisitos envolvidos nesse processo decisório devem calcar-se em parâmetros que atendam as expectativas dos múltiplos usuários e, para isso, buscam-se mecanismos flexíveis e robustos que

maximizem o produto interno líquido produzido na bacia hidrográfica, além de previsões de conflitos potenciais para o acesso à água.

A presente pesquisa busca desenvolver uma abordagem que torne possível avaliar a sinergia hídrica, ou seja, o ganho volumétrico extra gerado pela transposição de bacias hidrográficas que resulta em um aporte excedente de água para atendimento das diversas demandas. Em um primeiro momento, essa avaliação é realizada levando em consideração a atual disponibilidade hídrica, obtida através da modelagem hidrológica descrita anteriormente, para depois analisar as vazões regularizadas após o aporte volumétrico decorrente da transposição do rio São Francisco com utilização de um modelo para operação de reservatórios desenvolvido na Universidade Federal de Pernambuco, o CAROS (*Campus Agreste Reservoir Operation Model*), de forma a se calcular a sinergia hídrica resultante desse aporte. O objetivo é examinar qual o melhor regime de vazão a ser liberada para os usos múltiplos da água, o que deve contribuir para regras de operação de reservatórios mais atualizadas.

2.2.1 Sinergia hídrica

Farias et al. (2005) definem sinergia hídrica como “a parcela de acréscimo de vazão regularizada pelo reservatório, ou sistema de reservatórios, que ultrapassa o acréscimo decorrente da vazão aduzida” (FARIAS et al., 2005, p. 02). Tal constatação surgiu de diversos estudos originados da transposição do rio São Francisco, em qualquer de seus eixos Leste, Norte e Sul, que confirmaram ganhos no aumento das vazões que ultrapassam as vazões exógenas aduzidas aos sistemas de reservatórios integrados das bacias receptoras.

Os autores analisam dois casos: os resultados sinérgicos das vazões transpostas ao açude Castanhão, o maior dos reservatórios receptores, localizado na bacia do Médio Jaguaribe no Ceará, e; o sistema integrado das bacias dos rios Salitre, Itapicuru, Paraguaçu e Vaza Barris, receptoras do Eixo Sul, nos estados da Bahia e Sergipe. A conclusão da análise é a de que uma oferta extraordinária de água a essas bacias e sistemas implica em melhoramentos das afluências naturais, convertendo volumes significativos antes evaporados ou vertidos em volumes regularizados, ou seja,

uma sinergia hídrica positiva.

O cálculo da sinergia hídrica envolve basicamente diferir as vazões regularizadas, afluições e aduções antes e depois das transferências entre bacias. Obtém-se uma sinergia positiva quando elementos computados como perdas – seja por evaporação, vertimentos ou volumes acumulados e não utilizados – são reduzidos, considerando a variação dos volumes acumulados no início e fim da simulação.

Naturalmente, o cálculo da sinergia hídrica deve levar em consideração o conjunto integrado de reservatórios de macro e grande porte, devendo ser simulada de forma integrada, incorporando, se possível, os vertimentos resultantes nas áreas incrementais de influência desses reservatórios, como realizado por Farias *et al.* (2005). O memorial de cálculo do modelo CAROS consta no Anexo II.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO: ESTADO DO CEARÁ, BRASIL

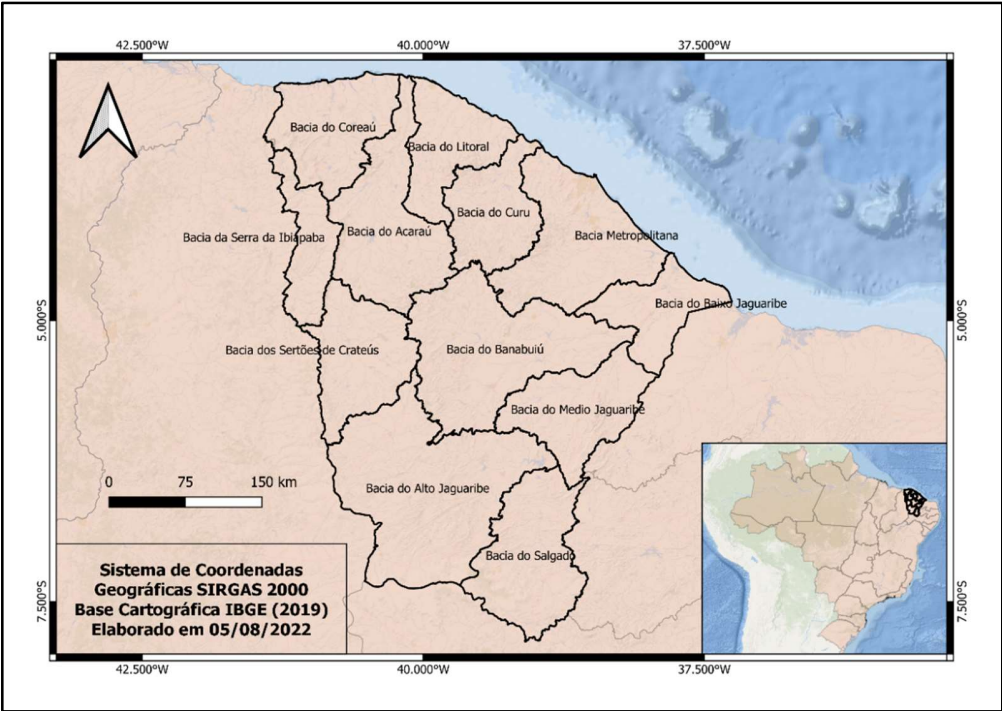
3.1.1 Localização

A área em foco insere-se no estado do Ceará, nordeste do Brasil, entre as longitudes 40°51'3''L e 38°26'34''L e latitudes 7°51'26''N e 3°24'6''N, na Zona UTM 24S. Enquanto o estado ocupa uma área de 148.866,00 km², a soma das áreas de todas as sub-bacias demarcadas é de 60.755,68 km², ou seja, corresponde a 40,8% da área estadual. Todos os mapas confeccionados para este trabalho contaram com os produtos das imagens de sensoriamento remoto da missão SRTM, em formato .tiff (*Tag Image File Format*), com projeção geográfica e *Datum* SIRGAS 2000.

O Ceará possui 175 de seus 184 municípios inseridos no Polígono das Secas. Essa demarcação foi criada pela Lei 175, de 7 de janeiro de 1936. A partir daí, houve a regulamentação e definição de um plano de defesa contra os efeitos da denominada seca do Nordeste. A mais nova delimitação do Semiárido brasileiro foi realizada pelo Conselho Deliberativo da SUDENE por meio da Resolução 150/2021. Os 1.427 municípios que integram a região devem atingir pelo menos um dos critérios para classificação de pertencimento ao Semiárido: estarem sujeitos a períodos críticos de prolongadas estiagens, com várias zonas geográficas e diferentes índices de aridez.

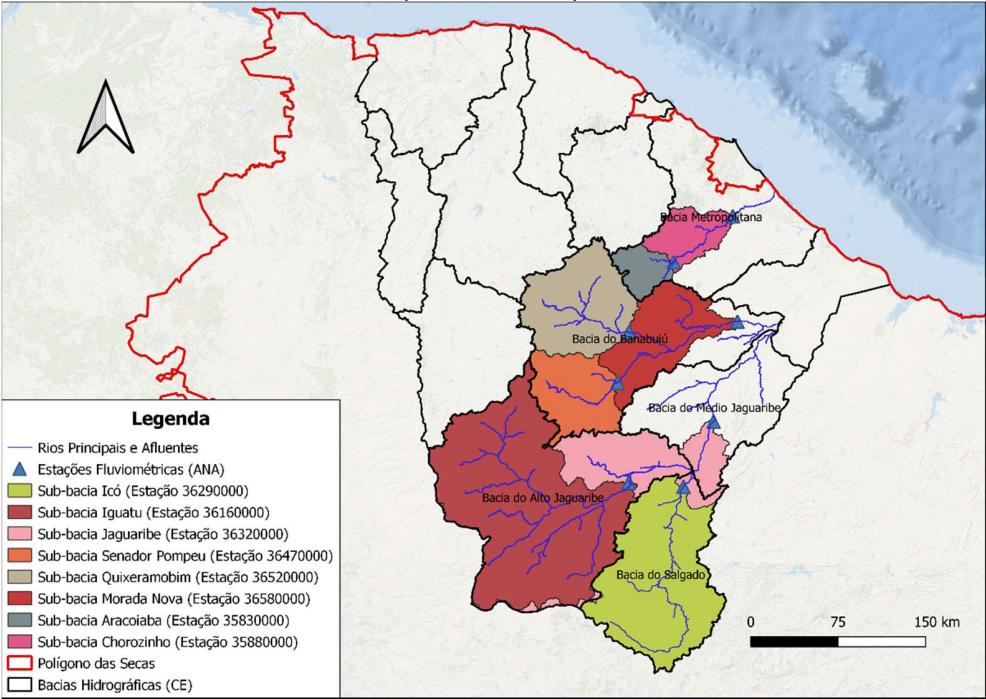
O estado do Ceará é dividido em 12 bacias hidrográficas: Acaraú, Alto Jaguaribe, Baixo Jaguaribe, Banabuiú, Coreaú, Crateús, Curu, Ibiapaba, Litoral, Médio Jaguaribe, Metropolitana e Salgado, de acordo com a Figura 1. Todas fazem parte da Bacia 3 – Atlântico, trecho Norte/Nordeste, inseridas totalmente no Polígono das Secas. Na área, predomina clima semiárido e rios intermitentes. A Figura 2 indica a localização dos postos fluviométricos utilizados para a modelagem hidrológica de cada sub-bacia demarcada.

Figura 1 - Bacias Hidrográficas do estado do Ceará (Brasil).



Fonte: Autora (2023).

Figura 2 - Localização das sub-bacias e suas respectivas estações fluviométricas no estado do Ceará (SIRGAS 2000).



Fonte: Autora (2023).

3.1.2 Vegetação

Considerado como único bioma exclusivamente brasileiro, ocupando 11% do território do país, a vegetação predominante na área de estudo é a Caatinga, com fitofisionomia mais característica da Savana Estépica, como caracterizado na Figura 3. Ela compreende a região mais seca do país, onde os níveis de precipitação anuais estão abaixo dos 1.000 milímetros, com longos períodos de precipitações baixas ou inexistentes, forte insolação e temperaturas regulares superiores aos 26°C. O *shapefile* utilizado foi obtido dos produtos da divisão de Geociências do IBGE (IBGE, 1992) e se baseia no Projeto RADAMBRASIL, na escala 1:250.000.

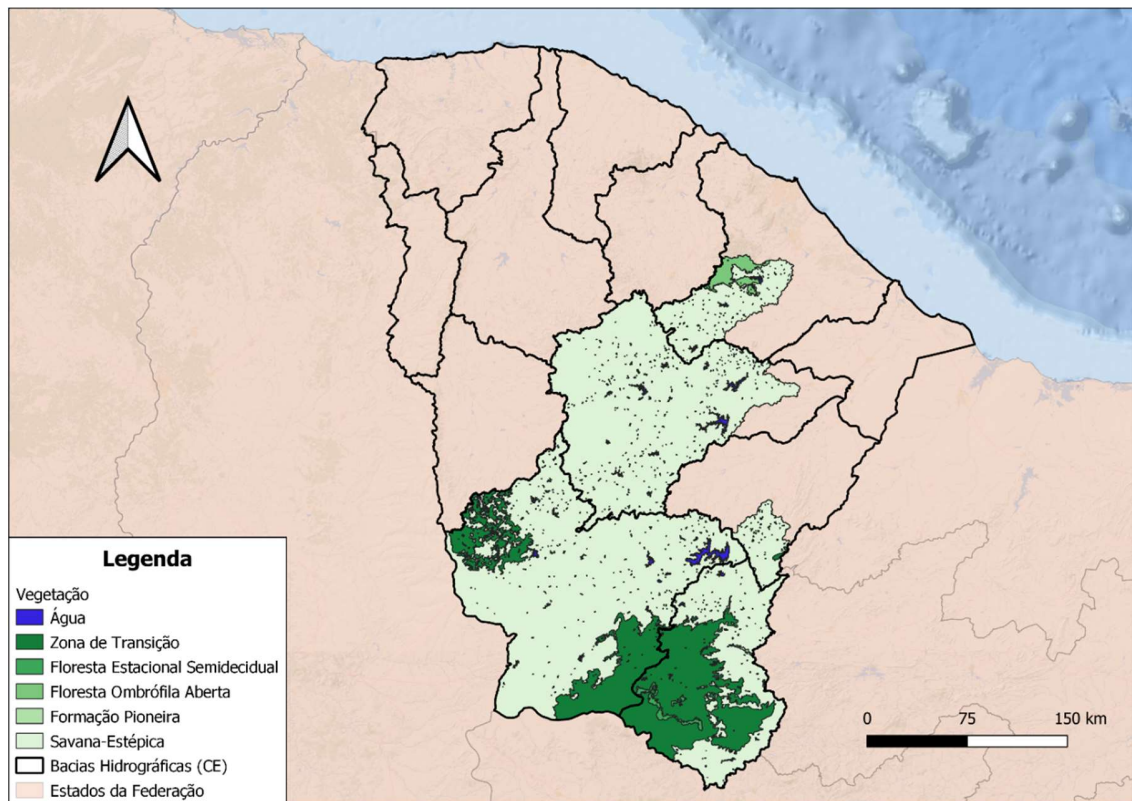
A análise da morfologia dos biomas predominantes nas bacias em análise é importante para a modelagem hidrológica devido à influência nos valores de evapotranspiração, tipo de cobertura vegetal que auxilia na redução dos impactos da precipitação nos solos, o que reduz o potencial erosivo, além de contribuir para uma infiltração e percolação mais lentas da água.

Chuvvas concentradas e torrenciais geram fluxos de enxurradas laminares com alto poder erosivo. Somado a isto está a falta de barreiras no percurso da água até atingir o solo. Após o período de estiagem, a vegetação encontra-se desfolhada e os restos vegetais encontram-se bastante degradados pela insolação. O desmatamento da caatinga intensifica ainda mais a destruição dos solos por erosão laminar e linear aceleradas, em que materiais mais finos são transportados, despontando solos pedregosos e rochosos como pré-condição para processos de desertificação, um dos problemas atuais mais preocupantes.

A fitofisionomia desse bioma é diversa, compreendendo desde áreas com vegetação arbustiva baixa e rala até vegetações de grande porte e densas, atingindo cerca de 10 metros de altura (IBGE, 1992). A adaptação ao clima quente e seco confere características como espinhos, acúleos, folhas e caules retentores de água. Durante os curtos períodos com chuvas, a paisagem torna-se esverdeada, principalmente nas Florestas Ombrófilas Abertas e Florestas Estacionais Decidual e Semidecidual (VIRÃES, 2018).

A região analisada possui 80,3% de vegetação do tipo Savana-Estépica. Pode-se observar áreas de sobreposição ecológica, quando duas ou mais fitofisionomias encontram-se e interpenetram-se, formando zonas de transição (ocupando 14,15% da área demarcada), como, por exemplo, o encontro da Savana Estépica e da Floresta Estacional. No estado há, ainda, vegetação com influência marinha, fora da demarcação do polígono das secas, zona costeira. Esta vegetação é conhecida como restinga, revestindo pequena parte do litoral, com formações herbáceas em praias e dunas.

Figura 3 - Tipos de vegetação na área das sub-bacias delimitadas no estado do Ceará (SIRGAS 2000).



Fonte: Autora (2023).

3.1.3 Relevo e tipos de solos

Na geomorfologia do Ceará destaca-se o predomínio de superfícies aplainadas da Depressão Sertaneja, com cotas tímidas, resultado, em parte, de processos erosivos que nivelaram o relevo suportado pelo embasamento ígneo-metamórfico pré-cambriano. Em

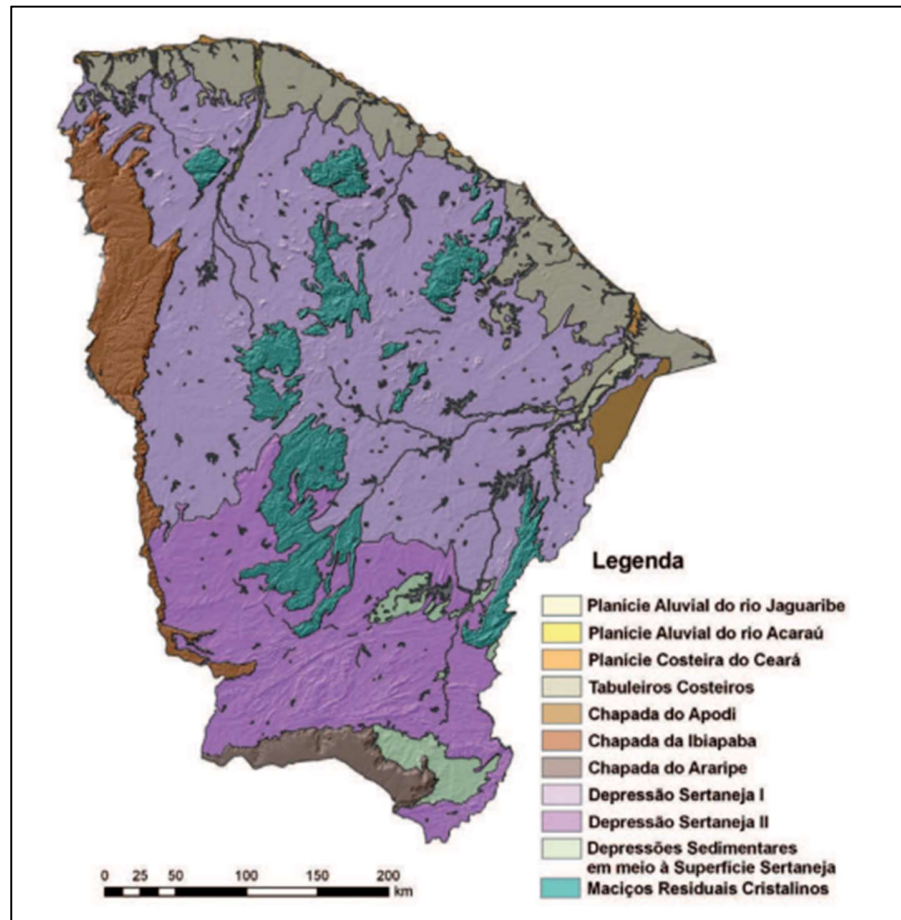
meio ao baixo relevo, despontam montes rochosos isolados denominados *inselbergs*, de rochas mais resistentes ao intemperismo e erosão e que permaneceram, apresentando solos rasos e pedregosos, com boa fertilidade natural devido à influência do material de origem (DANTAS *et al.*, 2014).

O território cearense foi compartimentado em dez domínios geomorfológicos de acordo com a CPRM e que podem ser conferidos na Figura 4: Planície Costeira; Planícies Aluviais dos rios Jaguaribe e Acaraú; Tabuleiros Costeiros; Chapada do Apodi; Chapada do Araripe; Chapada da Ibiapaba; Depressão Sertaneja I e II; Depressões em meio à Superfície Sertaneja; Maciços Residuais Cristalinos, sendo, este último, subdividido em serras “úmidas” e “secas” (DANTAS *et al.*, 2014).

A Chapada do Araripe (cerca de 5,9% da área considerada) localiza-se ao sul do Estado e insere-se nas bacias hidrográficas do Alto Jaguaribe e Salgado e possui cota entre 433 e 1.000 metros, aproximadamente. Ao sul também pode-se observar a Depressão Sedimentar da Superfície Sertaneja, pertencente à bacia do rio Salgado, domínio que apresenta altimetria entre 1 e 1132 metros. A área compreende pequenos trechos do Planalto da Ibiapaba, situado mais a oeste do estado, com cotas entre 93 a 972 metros. Algumas regiões de planícies despontam timidamente pelo litoral, ao lado de zonas de relevo de tabuleiro (estas com cotas abaixo de 320 metros), bem como na zona leste do estado, podendo ser consideradas planícies fluviais ou fluviolacustres, sempre abaixo dos 435 metros de altitude.

Para cada sub-bacia analisada, o relevo desempenha variável importante para a confecção do perfil do rio principal e sua declividade (usada para cálculo da variável K), do regime de escoamento e da geração da rede de drenagem. Os tipos de solo influenciam na taxa de infiltração e no cálculo de parâmetros importantes para a modelagem hidrológica, como o parâmetro S , a percolação do fluxo subsuperficial K_s e variáveis de inicialização, como a reserva inicial de água no solo, conforme descrito no Anexo I.

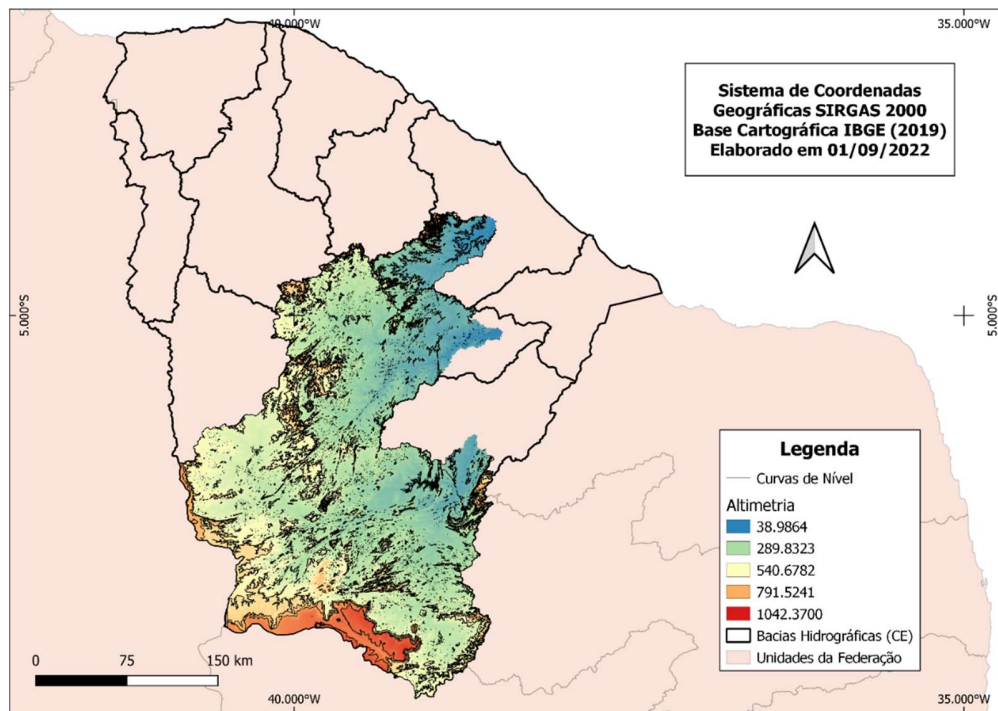
Figura 4 - Mapa dos tipos de relevo de acordo com a CPRM no estado do Ceará.



Fonte: DANTAS (2014, p. 40).

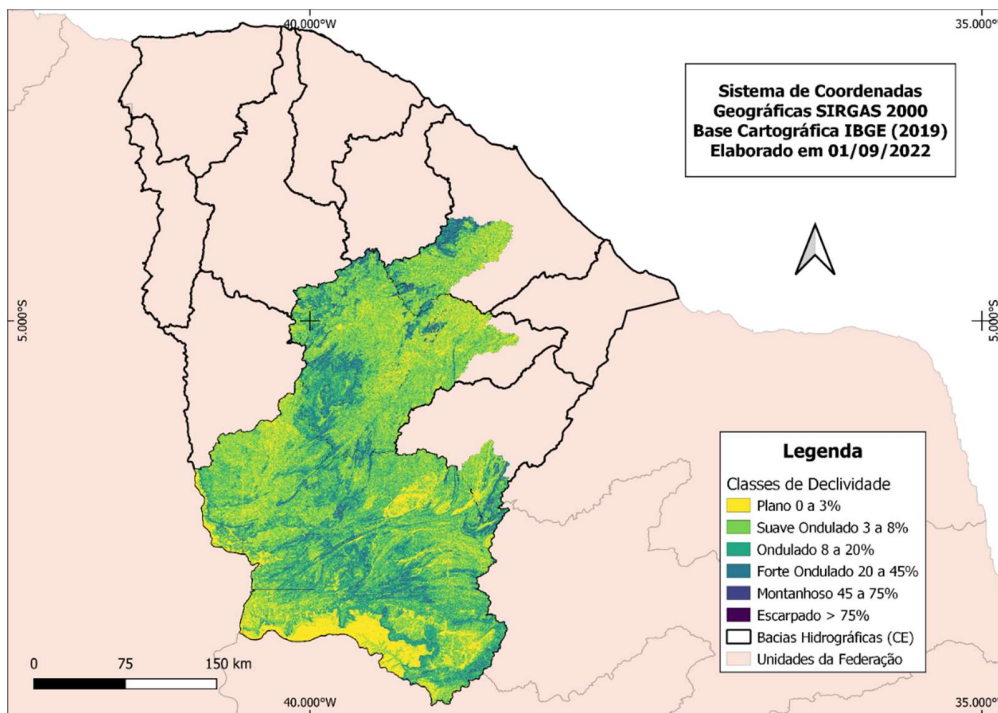
A Figura 5 consiste no mapa Hipsométrico para a região de interesse, enquanto a Figura 6 caracteriza a área conforme as classes de declividade propostas pela EMBRAPA (1979). Percebe-se que relevos mais acentuados localizam-se nas bacias hidrográficas ao sul do estado e, conforme se avança para o litoral, a tendência é o aplainamento.

Figura 5 - Hipsometria na região das sub-bacias demarcadas.



Fonte: Autora (2023).

Figura 6 - Mapa das classes de declividade propostas pela EMBRAPA para a área em análise.



Fonte: Autora (2023).

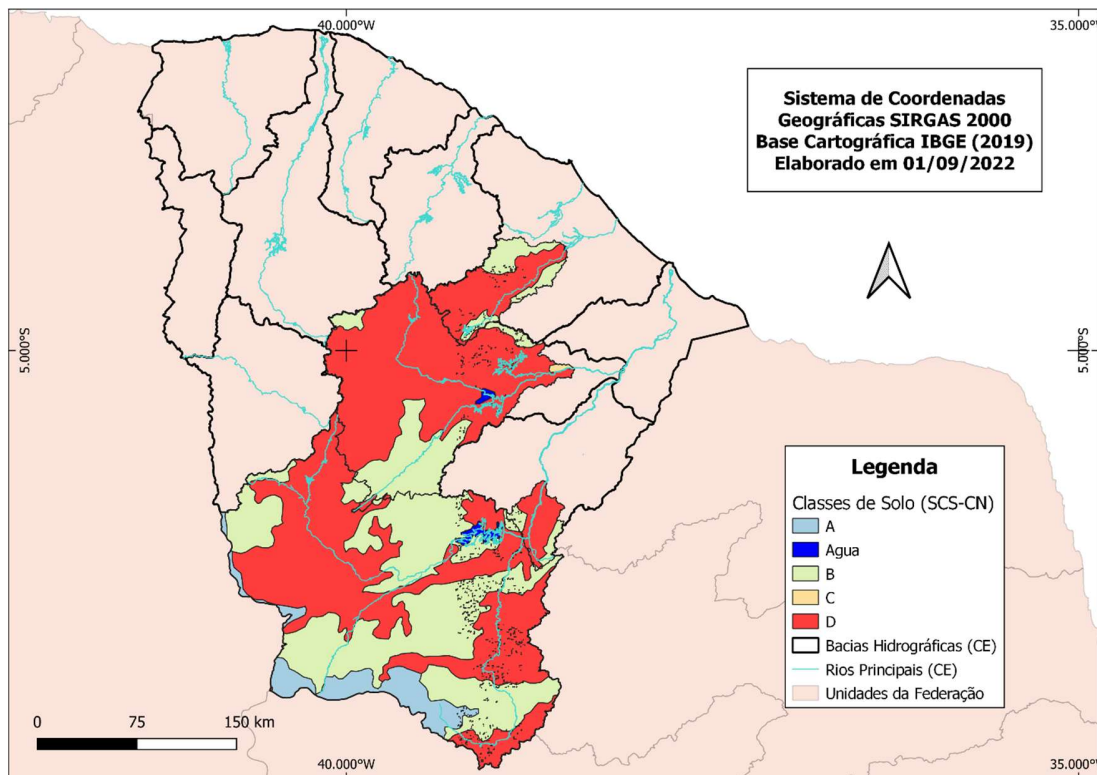
Com isoietas de 800 mm, índice de aridez de Thornthwaite de até 0,50 juntamente ao índice de risco de seca – porcentagem do número de dias com déficit hídrico igual ou superior a 60% –, características definidoras do semiárido (BRASIL, 2017), os solos da região são pouco desenvolvidos devido à escassez hídrica, com, geralmente, pouca profundidade e incorporação de matéria orgânica, a qual é carregada pelos ventos antes de ser incorporada ao solo. Outras características são a alta combustão devido ao clima seco e altas temperaturas, forte erosividade causada por chuvas de alta intensidade e presença de minerais primários com baixo grau de intemperismo (SANTOS, 2017).

A partir de *shapefile* obtido do INPE (2020) com a classificação dos usos e ocupação do solo realizada para cálculo do Número de Escoamento (CN) e da variável de capacidade de infiltração no solo *S*, a Figura 7, mapa de classificação hidrológica do solo, identifica as classes A, B, C, D e Água, cada uma representando o nível de saturação, sendo as maiores capacidades de retenção de água representadas pela classe A e as menores, representadas pela classe D, enquanto a classe Água significa presença de corpos hídricos. Ao passo que solos arenosos remetem à classe A, solos argilosos pertencem à classe D.

A classe predominante na região analisada é a D, abrangendo 58,4% do território, o que confirma a baixa capacidade de infiltração da água nos solos do semiárido. A classe B compreende 35,8%, enquanto a classe A alcança 5,1%, concentrando-se nas bacias hidrográficas mais ao sul do estado, na parte sul das bacias do Alto Jaguaribe e Salgado. A superfície composta por corpos d'água aparece com apenas 0,6% e, por fim, a classe C representa somente 0,1% da área, localizada na Planície Aluvial do rio Jaguaribe.

Na realização da modelagem hidrológica, essa classificação também costuma nortear os valores das variáveis de inicialização que correspondem à quantidade de água armazenada no solo e dos parâmetros de percolação.

Figura 7 - Classificação hidrológica dos solos conforme valores de CN tabelados.



Fonte: Autora (2023).

3.1.4 Características climáticas

A dinâmica climática desse conjunto de paisagens sertanejas é crucial para sua compreensão geomorfológica, pois caracteriza um conjunto de elementos que se convencionou a denominar Sertão.

No Ceará, o período chuvoso concentra-se nos meses de fevereiro a abril, em que, nas áreas mais úmidas (faixas costeiras e “brejos de altitude”), pode se estender de janeiro a julho. Nas regiões mais áridas, prevalece médias de precipitação anuais entre 400 e 450 milímetros, com altas taxas de evaporação, insolação e baixa umidade relativa (DANTAS *et al.*, 2014).

Todos os sistemas produtores de chuva no sertão nordestino estão diretamente relacionados a estiagens prolongadas, que podem variar de 7 a 10 meses. Importante observar em que período do ano inicia a modelagem hidrológica, já que é necessário estimar o parâmetro de escoamento inicial nas calhas dos rios, sendo mais elevado em

períodos chuvosos. Os três principais sistemas meteorológicos que se destacam por atingir parcialmente o semiárido são (CADIER, 1994):

- Zona de Convergência Intertropical (ZCIT): encontra-se próxima da Latitude de 5°N e promove intensas precipitações na metade norte do estado apenas durante a oscilação no hemisfério Sul entre fevereiro a abril, enquanto os demais meses permanecem secos;

- Massa Equatorial Atlântica (mEa): portadora dos ventos alísios úmidos provindos do quadrante leste, promovendo alta pluviosidade no litoral oriental do nordeste, contudo, poucas chuvas a sotavento do Planalto da Borborema, que impede que as chuvas cheguem ao sertão cearense;

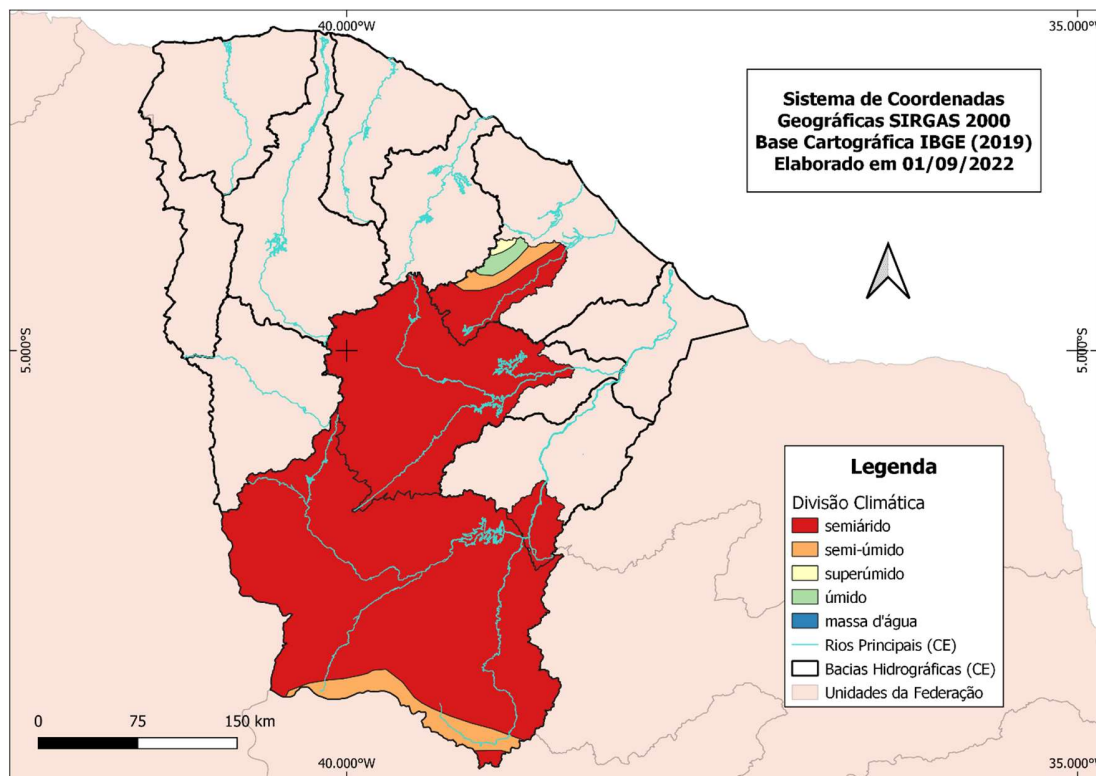
- Massa Polar do sul (mP): chegada dos ventos frios das regiões polares do sul do continente e que perdem intensidade à medida que penetram o país rumo ao norte. Raramente, alcançam o sul do estado entre julho e agosto, causando chuvas frontais e desaparecendo antes de atingir o sertão.

Existem anos em que a ZCIT opera de forma atenuada no hemisfério Sul e as chuvas não ocorrem, ocasionando um ano inteiro de seca. Isso pode ser conferido através da análise pluviométrica do ano 2009, período em que a ZCIT atuou fortemente, em conjunto ao fenômeno La Niña, provocando chuvas torrenciais, inundações, perdas de safras, danos infraestruturais, dentre outros. Em contrapartida, em 2010 observou-se uma menor influência da ZCIT e maior atuação do El Niño, gerando precipitações muito abaixo das médias para o mesmo período, acarretando, da mesma forma, perdas de safra e mortes de animais.

As diferentes zonas climáticas do Brasil podem ser obtidas no formato *shapefile* do site do IBGE (IBGE, 2021) em escala 1:5.000.000, com identificação de tipos climáticos, como quente, subquente, mesotérmico brando e mesotérmico mediano. O estado do Ceará insere-se na divisão climática Tropical Equatorial, com médias sempre superiores aos 18°C, apresentando as respectivas subdivisões nas seguintes zonas climáticas (Figura 8): predomínio do clima semiárido, já bastante comentado, ocupando 84,11% da região com 6 meses secos; ocorrência de faixas de clima semiúmido ao sul do estado, com 4 a 5 meses secos e abrangendo 2,99% da área; clima úmido em cerca de 0,45% do recorte, localizado na região serrana da cidade de Guaramiranga e; em

0,22% da área ocorre timidamente o clima superúmido e umidade subseca, também na região das serras, essas com altitudes acima dos 600 metros.

Figura 8 - Divisões climáticas para o recorte geográfico das sub-bacias em comento.



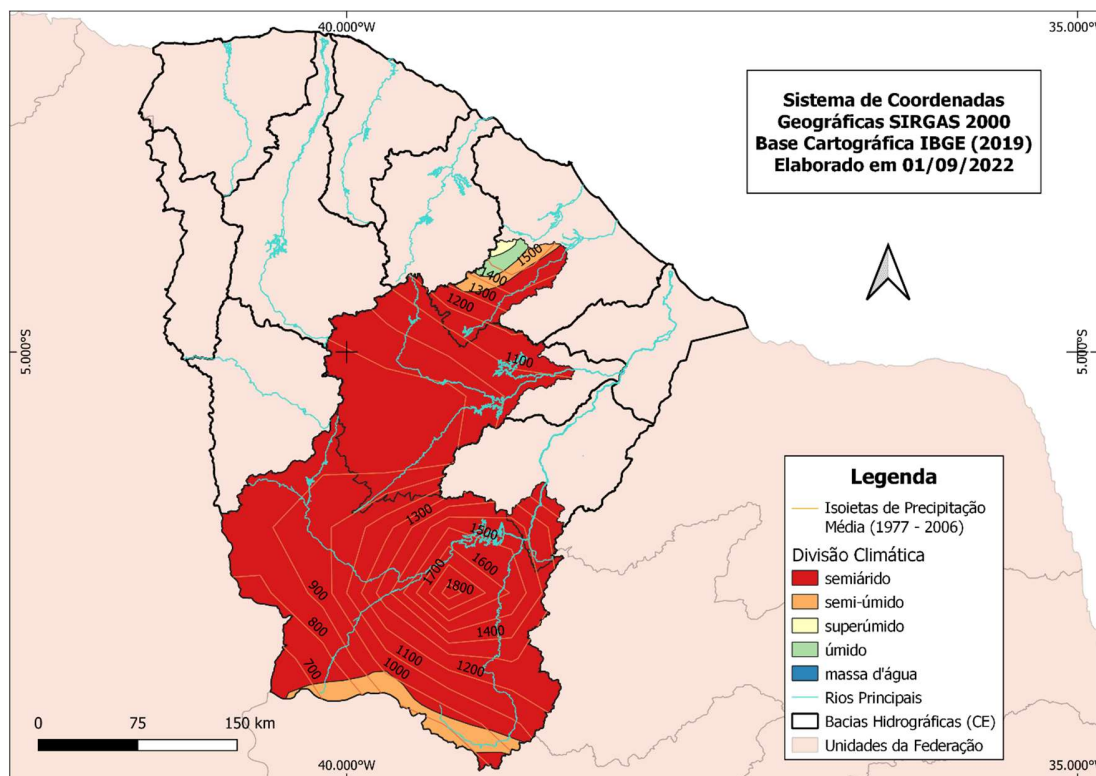
Fonte: Autora (2023).

Com relação às isoietas – linhas que indicam valores de igual precipitação medida em milímetros (ocorrendo nas formas de neve, chuva ou granizo), assim como as curvas de nível indicam linhas com mesma cota – os dados foram obtidos da Rede Hidrometeorológica Nacional da CPRM para o período de 1977 a 2006, e disponibilizados pelo Atlas Pluviométrico do Brasil, os quais são referências básicas para atividades que envolvem variáveis atmosféricas e que descrevem as condições climáticas e sua inconstância. Para a área considerada, o mapa das isoietas corresponde à Figura 9 e sua importância reside no fato da precipitação ser a parte do ciclo hidrológico responsável pelo aporte de água doce no planeta. A chuva anual foi calculada com base no ano hidrológico, com acúmulo das precipitações de outubro do ano anterior até setembro do

ano de referência (CPRM, 2011).

Pode-se constatar que a média da pluviometria total anual nesse período encontra-se entre a faixa de 700 a 1.500 milímetros, sendo este segundo extremo de ocorrência exclusiva nas zonas de clima úmido e superúmido da serra de Baturité. As maiores médias ocorrem na Chapada do Araripe, enquanto médias de chuvas abaixo dos 1.000 milímetros englobam praticamente todo o semiárido. Várias zonas do semiárido são denominadas “brejos”, um tipo de microclima de altitude, onde as precipitações são mais abundantes, temperaturas mais amenas e umidade mais forte, desempenhando forte papel na economia local, onde há sustentação de muitas nascentes de rios importantes (CADIER, 1994).

Figura 9 - Isoietas de precipitação média anual (1977-2006).



Fonte: Autora (2023).

3.1.5 Hidrogeologia

Os dados utilizados pertencem ao mapeamento hidrogeológico realizado pela CPRM a partir do agrupamento e da análise temática de dados geológicos, hidrogeológicos, hidrológicos, dentre outros disponíveis, oriundos das operações da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) e da Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS), cujo objetivo foi apresentar uma síntese da hidrogeologia nacional (CPRM, 2015).

As características da água subterrânea são definidas sobretudo pelo tipo de rocha onde é armazenada e do tipo de circulação que a água faz no interior do solo, sendo os principais tipos geológicos: as rochas sedimentares, que resultam em aquíferos porosos; rochas cristalinas, que correspondem a aquíferos fissurais e; rochas carbonáticas, caracterizando aquíferos cársticos (CPRM, 2015). Essas informações são relevantes para a análise da capacidade de armazenamento de água no reservatório profundo do solo, variável necessária para inicialização da modelagem no CAWM IV.

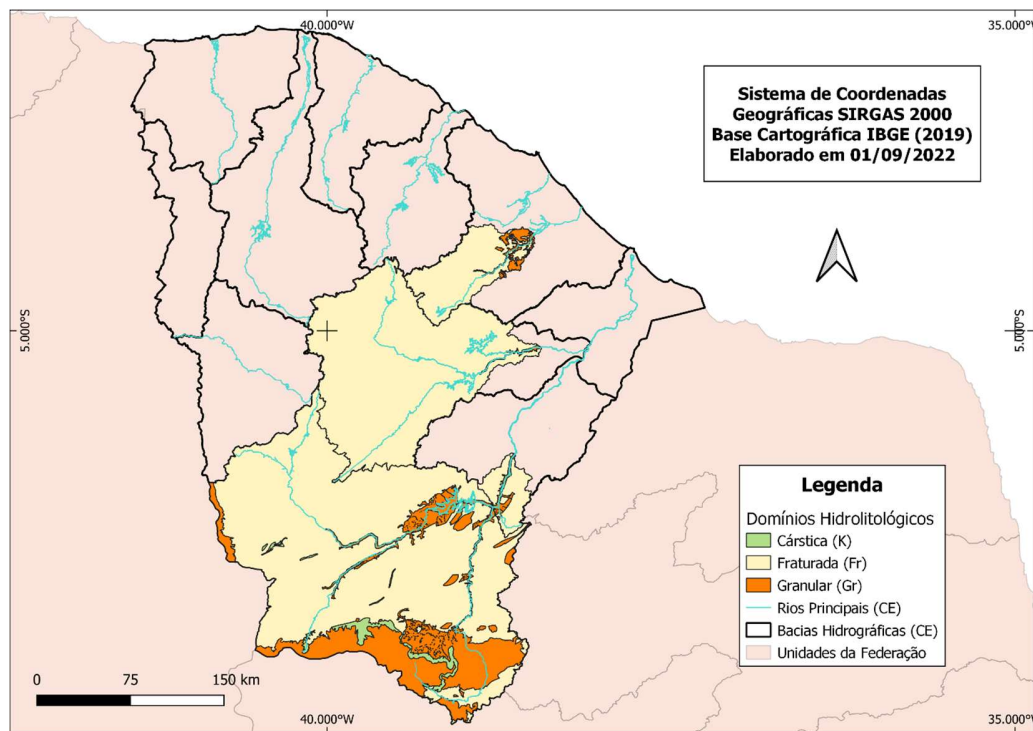
A qualidade da água subterrânea geralmente é mais elevada, sem a presença de patógenos e substâncias tóxicas que atingem as águas superficiais mais facilmente. Já a capacidade de recarga dos aquíferos remete ao conceito de potencialidade hídrica ou hidrogeológica, nesse caso, e também é definida pela característica dos tipos geológicos das rochas de formação. Devido à melhor potabilidade, águas subterrâneas estão sendo cada vez mais exploradas com fins de abastecimento humano.

Na Figura 10 constata-se o predomínio da hidrolitologia fraturada (cerca de 84% da área considerada) de rochas cristalinas, típicas do semiárido nordestino, que formam aquíferos fissurais, constituídos por rochas ígneas e metamórficas em que a água é armazenada em suas fendas e fraturas, podendo formar sistemas interconectados. Justamente nesse caso, o volume de vazões é pequeno, ao passo que a qualidade da água não é muito elevada, sendo mais exposta à ação de processos de salinização.

Representando 1,3% da zona demarcada, os aquíferos cársticos podem contribuir com altas vazões devido ao armazenamento em grandes fendas nas rochas carbonáticas, podendo formar, inclusive, canais e cavernas. Contudo, a água geralmente

apresenta significativos teores de carbonatos, a denominada “água dura”, resultante da dissolução dos carbonatos pela água, o que restringe as possibilidades de uso, devendo ser tratada para abastecimento humano. Em apenas 14,2% restante da área, a composição é de rochas sedimentares, que formam aquíferos porosos cujas águas apresentam a melhor qualidade, inseridos em sua maior parte ao sul do estado, nas bacias hidrográficas do Alto Jaguaribe e Salgado, além da zona serrana da cidade de Guaramiranga (CPRM, 2011).

Figura 10 - Domínios hidrolitológicos para a área de estudo.



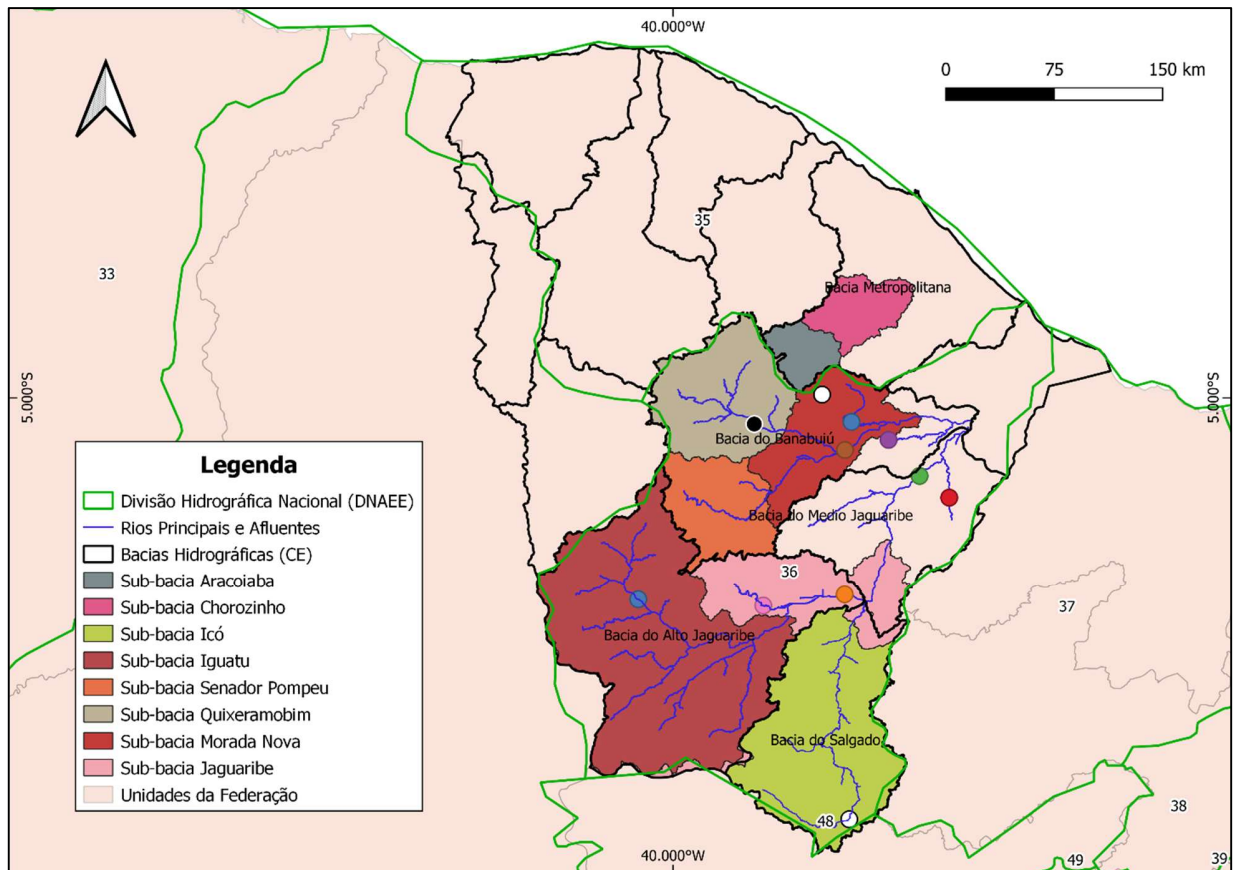
Fonte: Autora (2023).

3.1.6 Hidrografia

A caracterização hidrográfica da área de interesse envolve as bacias cujos rios principais alimentam os dados das estações fluviométricas utilizadas para a demarcação das sub-bacias, processo realizado para as simulações das vazões necessárias para esta pesquisa. As estações fluviométricas utilizadas inserem-se em 5 das 12 Bacias

Hidrográficas do estado, definidas pelo IPECE (2007) e obtidas do site do IBGE (2021), como pode-se perceber na Figura 11.

Figura 11 - Bacias hidrográficas da Divisão Hidrográfica Nacional para a área de estudo e estações fluviométricas utilizadas (SIRGAS 2000).



*Os círculos representam os açudes de porte significativo utilizados na análise hidrológica.

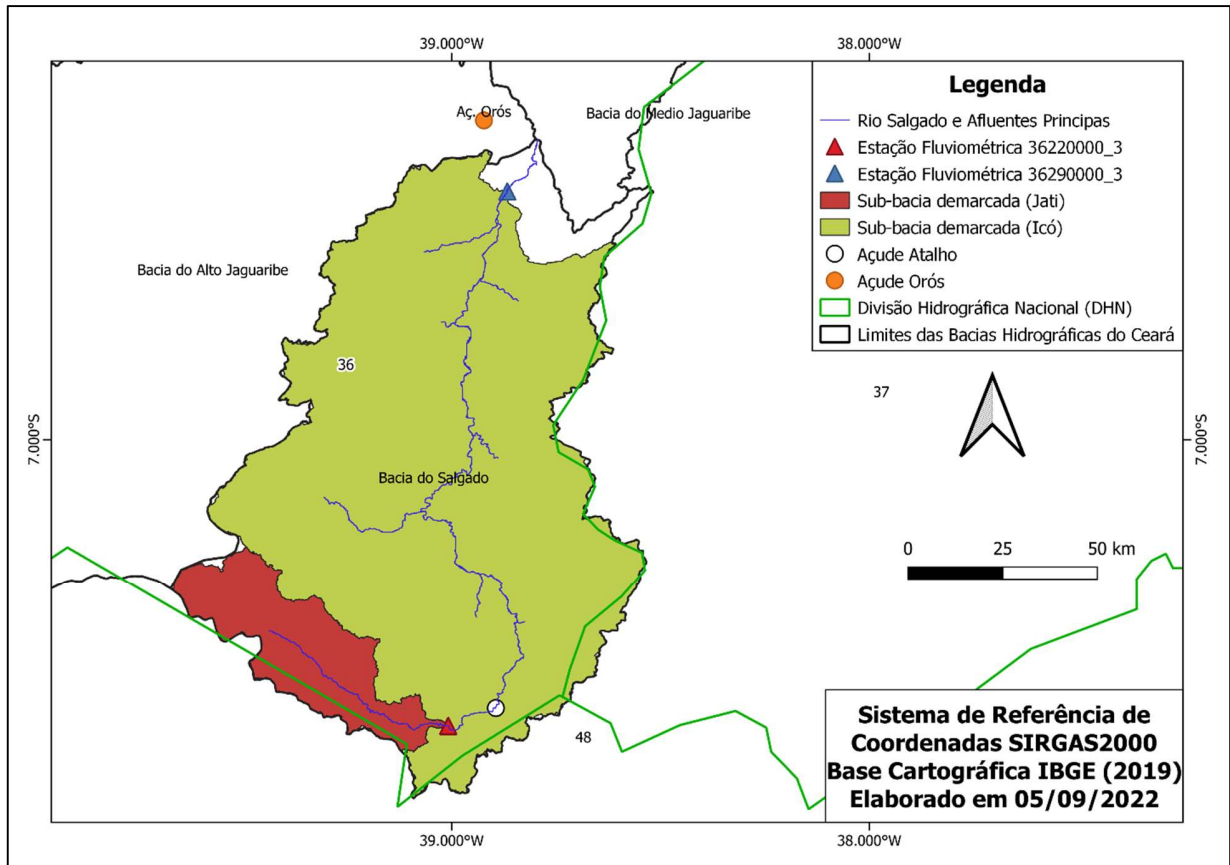
Fonte: Autora (2023).

Partindo do sul do estado, de onde serão recebidas as águas da transposição do São Francisco, temos a Bacia Hidrográfica do rio Salgado que, mais adiante, contribuirá pela margem direita, juntamente ao rio Banabuiú pela margem esquerda, como os afluentes mais importantes do rio Jaguaribe, o qual se configura como a maior fonte de recursos hídricos do estado.

A Figura 12 ilustra a trajetória do rio Salgado até a estação fluviométrica de referência, um percurso de cerca de 349,63 km, de seus afluentes principais e localiza a

presença dos açudes de macro e grande porte que influenciam o regime de vazões na área da sub-bacia demarcada na Bacia Hidrográfica do Salgado.

Figura 12 - Mapa das sub-bacias demarcadas a partir de estações fluviométricas selecionadas na Bacia Hidrográfica do rio Salgado.



Fonte: Autora (2023).

O rio Salgado nasce com o nome de rio Batateira na cidade do Crato, na soleira da serra do Araripe, avançando por 224 km até sua foz no rio Jaguaribe, conforme IBGE (2019). A região se caracteriza por relevos acentuados, hidrolitologia granular, floresta estacional Semidecidual e de transição, o que propicia maior infiltração no solo.

Para os fins desta pesquisa, foram considerados como capazes de influenciar substancialmente os regimes de vazões em suas áreas de influência os reservatórios de macro e grande porte, assim definidos pela ordem de classificação da COGERH (COGERH, 2018) conforme as capacidades volumétricas de acumulação:

- Macro Porte: acima de 750 hm³;
- Grande Porte: entre 75 e 750 hm³;
- Médio Porte: entre 7,5 a 75 hm³;
- Pequeno Porte: de 0,5 a 7,5 hm³ de acumulação.

Foram identificados 28 açudes de macro e grande porte no estado obtidos de *shapefile* disponibilizado pela COGERH no âmbito do Projeto ALOCA (Gestão de Alocação de Água para Promoção da Segurança Hídrica), do qual a autora fez parte no ano de 2020. As informações de 27 deles constam na Tabela 1 (COGERH, 2018), com exceção do açude Figueredo, por ser mais recente e ainda não estar inserido na lista de monitoramento do órgão. O açude possui capacidade de 519,6 hm³ e foi inaugurado em 2013.

Tabela 1 - Açudes de macro e grande porte monitorados pela COGERH e localizados no estado do Ceará.

AÇUDE	MUNICÍPIO	CAPACIDADE (hm ³)	ÓRGÃO EXECUTOR	CONCLUSÃO
Aç. Itauna	Chaval	77,5	SOHIDRA	2001
Aç. Jaburu I	Tianguá	210,0	SRH	2003
Aç. Sítios Novos	Caucaia	123,2	SOHIDRA	1999
Aç. Aracoiaba	Aracoiaba	170,7	SOHIDRA	2002
Aç. Carnaubal	Crateús	87,6	SRH	1990
Aç. Barra Velha	Independência	99,5	SOHIDRA	1999
Aç. Fogareiro	Quixeramobim	118,8	DNOCS	1996
Aç. Cipoada	Morada Nova	86,0	SRH	1992
Aç. Castanhão	Alto Santo	6.700,0	DNOCS/SRH	2003
Aç. Flor do Campo	Novo Oriente	111,3	SOHIDRA	1999
Aç. Arneiroz II	Arneiroz	197,1	SRH	2005
Aç. Trussu	Iguatu	301,0	SRH/DNOCS	1996
Aç. Atalho	Brejo Santo	108,2	DNOCS	1991
Aç. Pacoti	Horizonte	380,0	SRH	1981
Aç. Pacajus	Pacajus	240,0	DNOCS	1960
Aç. Pompeu sobrinho	Choró	143,0	DNOCS	1934
Aç. Ayres de Sousa	Sobral	104,4	DNOCS	1936
Aç. Araras	Varjota	891,0	DNOCS	1958
Aç. Edson Queiroz	Santa Quitéria	250,5	DNOCS	1987
Aç. Caxitoré	Pentecoste	202,0	DNOCS	1962
Aç. Pentecoste	Pentecoste	395,6	DNOCS	1957
Aç. General Sampaio	General Sampaio	322,2	DNOCS	1935

Aç. Jaburu II	Independência	116,0	DNOCS	1984
Aç. Banabuiú	Banabuiú	1.601,0	DNOCS	1966
Aç. Pedras brancas	Quixadá	434,0	DNOCS	1978
Aç. Cedro	Quixadá	126,0	DNOCS	1906
Aç. Orós	Orós	1.940,0	DNOCS	1961

Açudes de macro/grande porte mencionados nesta pesquisa.

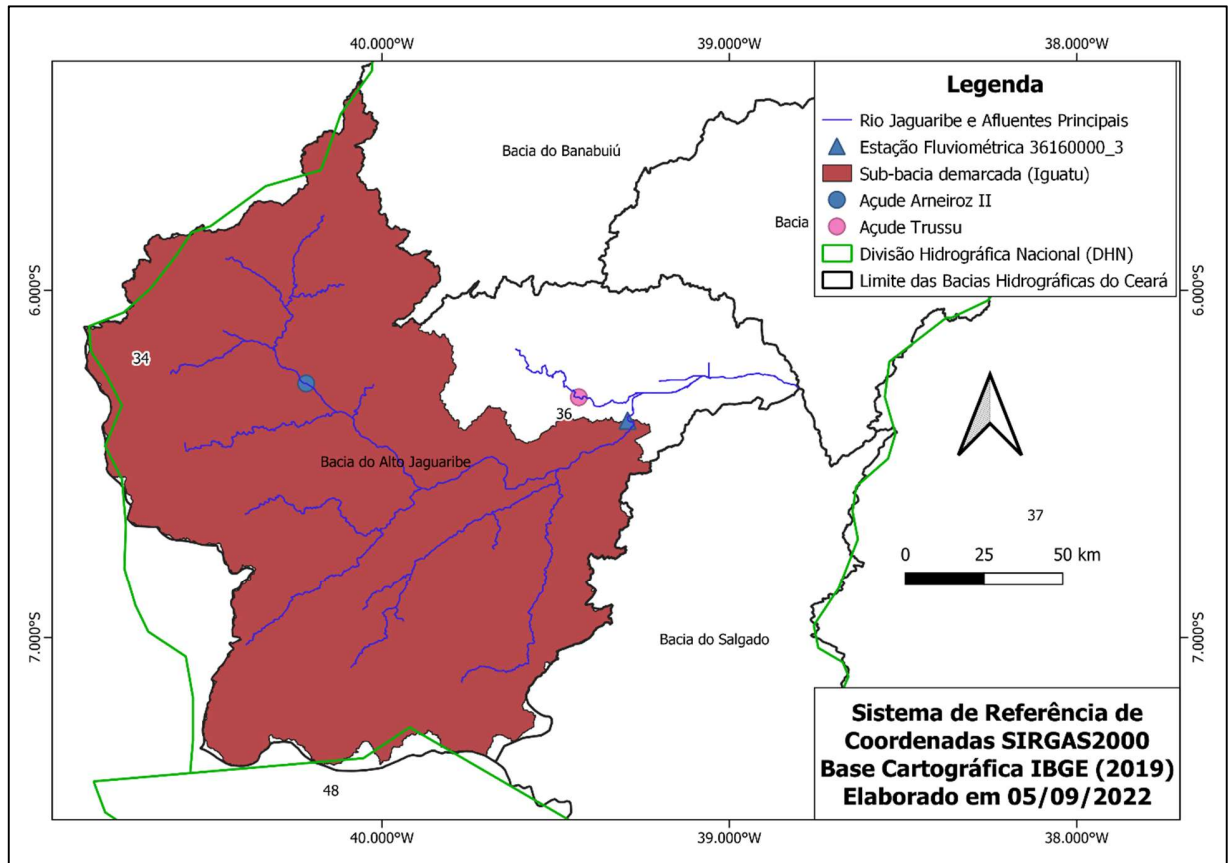
Fonte: Adaptado de COGERH (2018).

A demarcação da sub-bacia a partir da Estação Fluviométrica 36220000 da ANA, presente na Figura 12, localizada na cidade de Jati, foi realizada com o propósito de verificação da influência da construção do açude Atalho, com capacidade de 108,2 hm³, finalizada em 1991, no regime de vazões na sub-bacia analisada a partir da Estação Fluviométrica 36290000, localizada na cidade de Icó.

Ainda ao sul do Estado, temos a Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe, onde seu rio principal surge do encontro dos rios Trici e Carrapateiras, trilhando seu caminho até o açude Orós, em seguida até o açude Castanhão, cujo nome oficial é Açude Público Padre Cícero (o maior do estado em capacidade de acumulação), avançando pelas Bacias do Médio e Baixo Jaguaribe até desembocar em sua foz no oceano Atlântico. Até recentemente acreditava-se que a nascente do rio Jaguaribe localizava-se na Serra da Joanhina, na cidade de Tauá, quase fronteira com o Piauí. Entretanto, pesquisadores da Universidade Estadual do Ceará (UECE) e técnicos da COGERH descobriram que o surgimento do mais importante afluente cearense é no sentido oposto: sua verdadeira nascente é no morro da Lagoa Seca, na Serra das Pipocas, na cidade de Pedra Branca, mais ao norte do estado, sendo mais extenso do que se imaginava, o que não acarreta em mudanças substanciais na gestão hídrica da bacia (DIÁRIO DO NORDESTE, 2020).

A Figura 13 apresenta o mapeamento do percurso de cerca de 233,06 km do rio Jaguaribe desde seu nascimento até a Estação Fluviométrica 36160000 de referência, com a presença de dois reservatórios de grande porte – Açude Arneiroz II e Açude Trussu, com capacidades de 197,1 e 301 hm³, respectivamente.

Figura 13 - Mapa da sub-bacia demarcada a partir de estação fluviométrica selecionada na Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe.

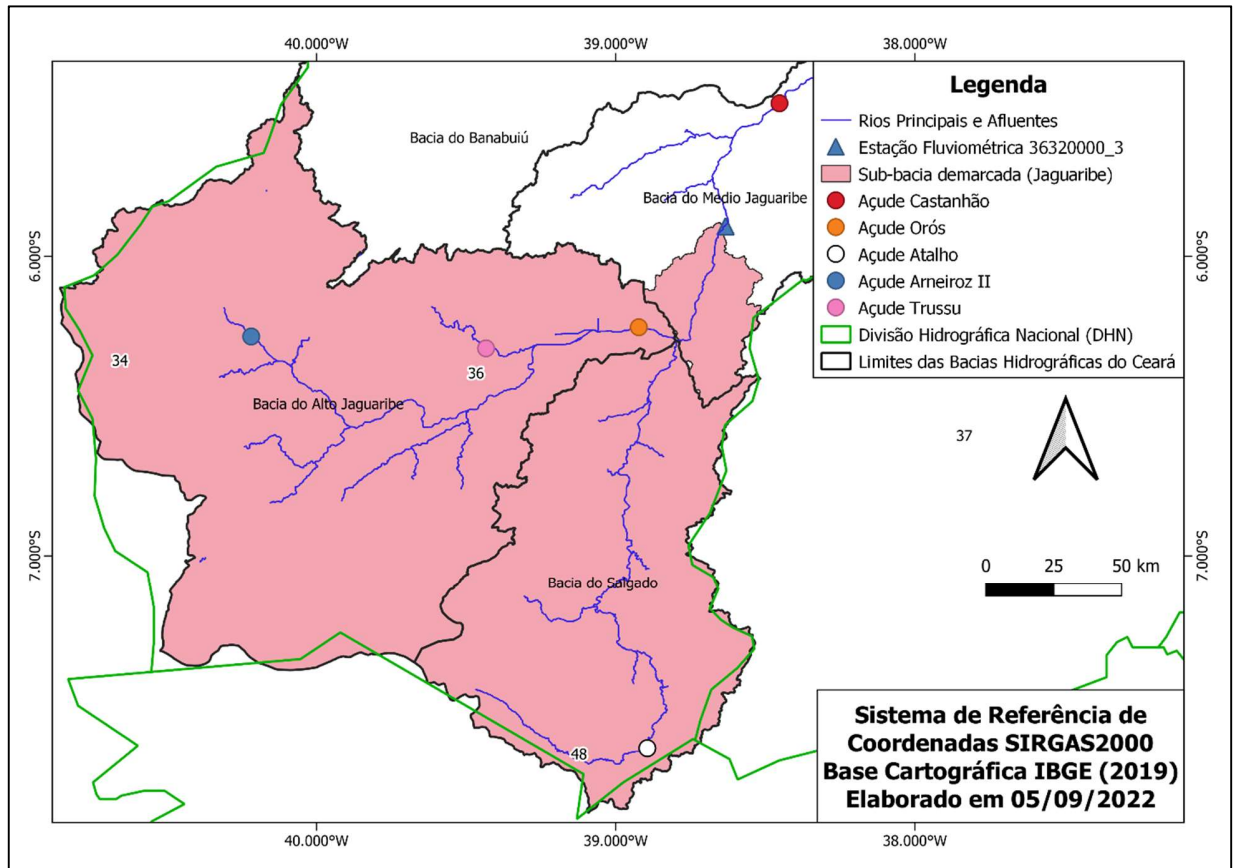


Fonte: Autora (2023).

O vale do Jaguaribe apresenta cerca de 74.000 km² de área e 610 km de extensão de seu rio principal, o qual já foi considerado o maior rio seco do mundo (CAVALCANTE; CUNHA, 2009), estando atualmente bastante regularizado através da influência de vários reservatórios de pequeno, médio e grande porte, destacando-se o Castanhão, localizado na Bacia do Médio Jaguaribe e considerado a maior garantia hídrica do estado.

A Figura 14 caracteriza a sub-bacia demarcada cuja área de influência alcança a Estação Fluviométrica 36320000 da ANA, localizada na Bacia Hidrográfica do Médio Jaguaribe, na cidade de mesmo nome, com a continuação do percurso de seu afluente principal e a presença dos açudes de grande porte que influenciam a modelagem hidrológica da área. Essa sub-bacia é a de maior extensão, possuindo cerca de 39.630,91 km² de área, englobando as Bacias do Alto Jaguaribe, Salgado e parte do Médio Jaguaribe.

Figura 14 - Mapa da sub-bacia demarcada a partir de estação fluviométrica selecionada na Bacia Hidrográfica do Médio Jaguaribe.

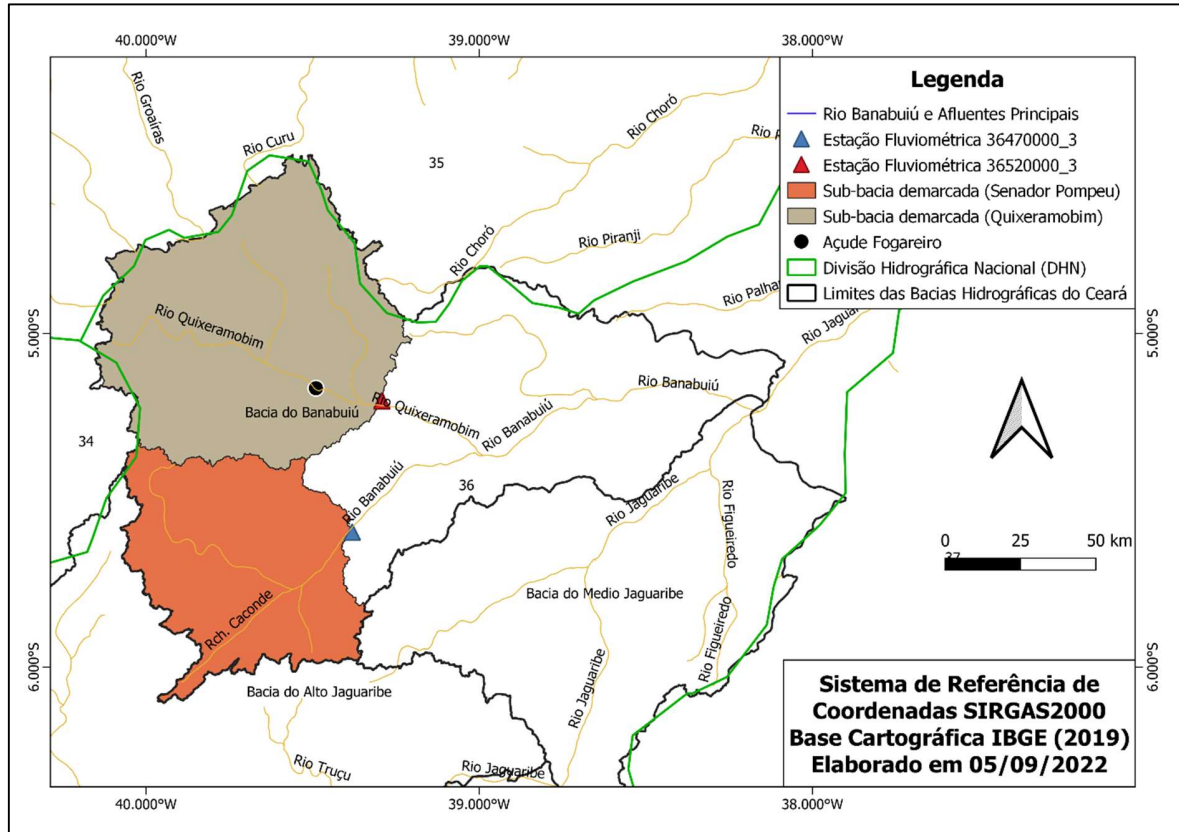


Fonte: Autora (2023).

O rio Banabuiú, principal afluente que alimenta o rio Jaguaribe pela margem esquerda, atravessa o estado por aproximadamente 314 km desde a nascente, em uma altitude de 540 m, até desaguar em Limoeiro do Norte (IBGE, 2019).

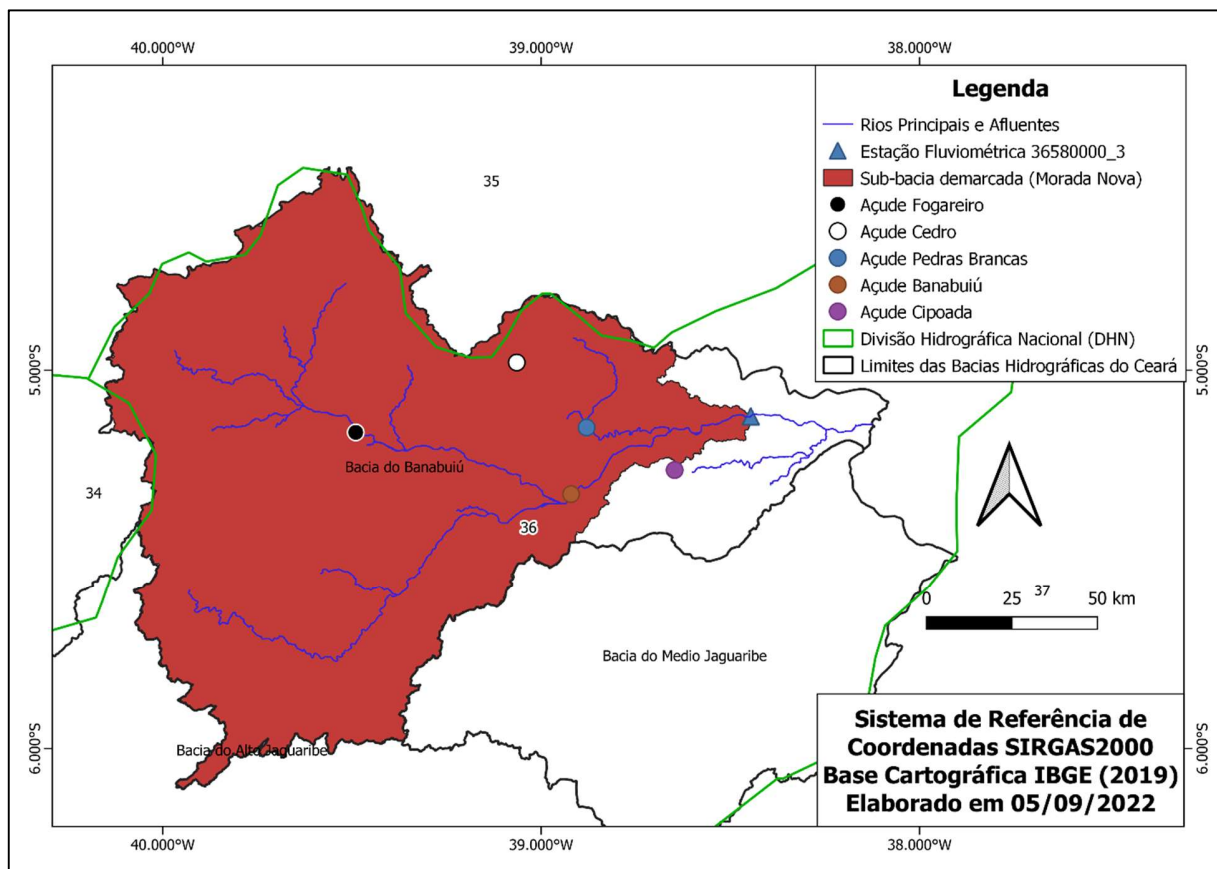
Na Bacia Hidrográfica do Banabuiú foram selecionadas três estações fluviométricas e demarcadas três sub-bacias nas cidades de Morada Nova (Figura 16), Senador Pompeu e Quixeramobim (Figura 15). A Estação Fluviométrica 36520000 localiza-se no rio Quixeramobim, ao norte da bacia, enquanto as Estações Fluviométricas 36470000 e 36580000 pertencem ao curso do rio Banabuiú.

Figura 15 - Mapa das sub-bacias demarcadas a partir de estações fluviométricas selecionadas na Bacia Hidrográfica do Banabuiú.



Fonte: Autora (2023).

Figura 16 - Mapa da sub-bacia demarcada a partir de estação fluviométrica selecionada na Bacia Hidrográfica do Banabuiú.



Fonte: Autora (2023).

Em seguida, adentra-se na Bacia Metropolitana, composta por um conjunto de bacias independentes onde se destacam as drenadas pelos rios Choró (com 200 km de extensão), Pacoti (112,5 km de extensão), São Gonçalo, Pirangi (177,5 km de extensão), Ceará e Cocó, sendo estes coletores principais de drenagem, além dos sistemas Ceará/Maranguape e Cocó/Coaçu. Esta Bacia corresponde a uma área de 15.085 km², cerca de 10% do estado do Ceará (COGERH, 2009b).

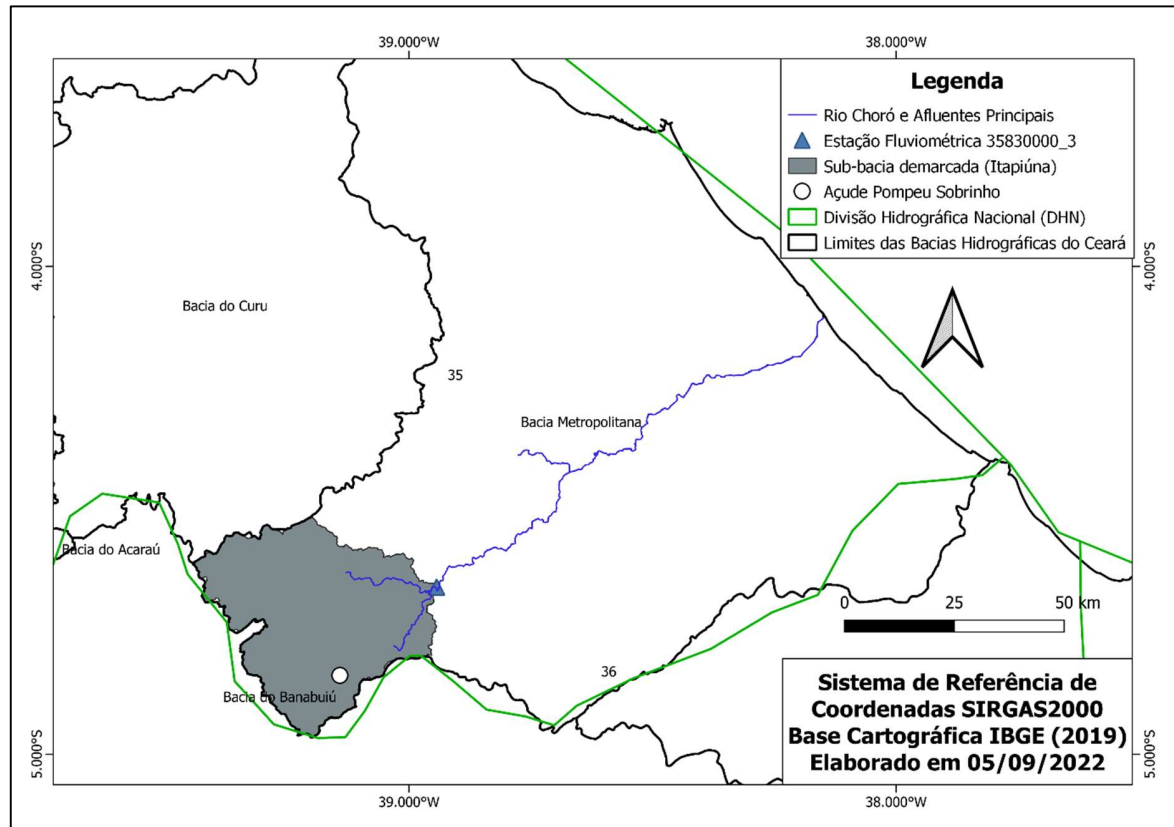
As altitudes variam entre 0 m na zona costeira até 900 m na Serra de Baturité, contudo, a maior parte da região encontra-se abaixo dos 200 m. As médias pluviométricas também variam, desde 800 mm no curso médio do rio São Gonçalo, chegando a 1.000 mm na maior parte da bacia, alcançando até os 1.400 mm no litoral (COGERH, 2009b).

Nesta bacia foram demarcadas duas sub-bacias a partir de estações fluviométricas localizadas no entorno do rio Choró, o qual possui altas declividades, sobretudo na área da nascente, na zona montanhosa das Serras do Estêvão, da Palha e da Conceição (VIRÃES, 2018).

Este rio é um dos principais da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), por conseguinte, já marcado por intensos processos de antropização, com instauração de áreas agrícolas, forte degradação das matas ciliares e do solo, sobretudo nas regiões circundantes dos reservatórios de Pompeu Sobrinho e Pacajus, conforme descrito na Revisão do Plano de Gerenciamento das Águas das Bacias Metropolitanas (VIRÃES, 2018).

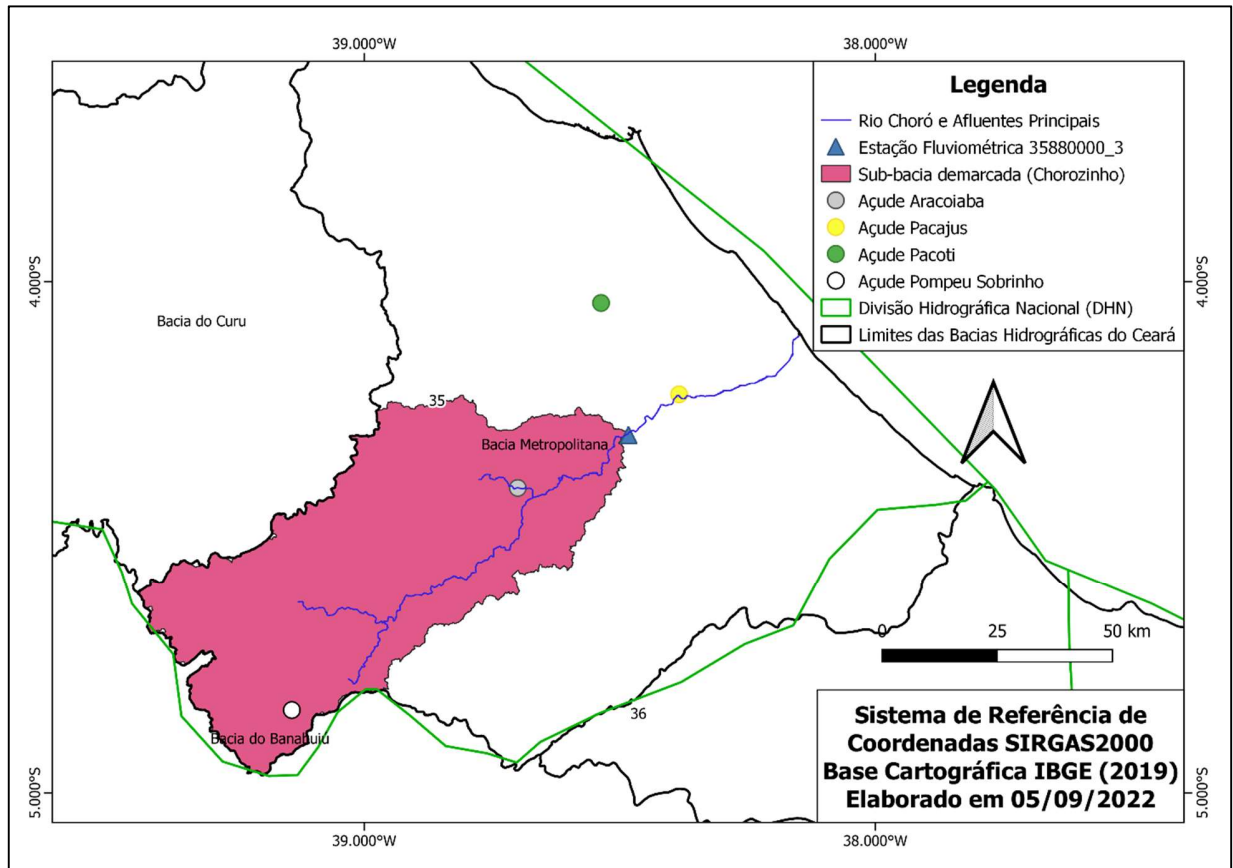
As Figuras 17 e 18 a seguir mostram a localização das estações fluviométricas, as áreas das sub-bacias demarcadas, o rio Choró e seus principais afluentes, bem como a localização dos açudes de macro e grande porte inseridos no recorte em foco: Pompeu Sobrinho, com 143,0 hm³ de capacidade, Aracoiaba, com 170,7 hm³, Pacoti, com 380,0 hm³ e Pacajus, este com 240,0 hm³ de capacidade. A sub-bacia de Chorozinho engloba a sub-bacia de Itapiúna, tendo maior área de contribuição.

Figura 17 - Mapa da sub-bacia demarcada a partir de estação fluviométrica selecionada na Bacia Hidrográfica Metropolitana.



Fonte: Autora (2023).

Figura 18 - Mapa da sub-bacia demarcada a partir de estação fluviométrica selecionada na Bacia Hidrográfica Metropolitana.



Fonte: Autora (2023).

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Modelagem hidrológica

3.2.1.1 Obtenção e tratamento dos dados geoespaciais da bacia

Primeiramente foram obtidos os dados físicos das bacias de interesse através de geoprocessamento. Parte das informações foram obtidas do levantamento realizado por Feitoza (2021) para 7 das 8 sub-bacias demarcadas, com exceção da sub-bacia cuja estação fluviométrica de referência localiza-se na cidade de Chorozinho (Estação 35880000). Os dados foram:

- Área da bacia A_b (km²);
- Comprimento total da rede de drenagem L_t (m);
- Declividade equivalente da rede de rios S_0 (m/m);
- Parâmetro de infiltração e capacidade de retenção de água do solo S (adimensional);

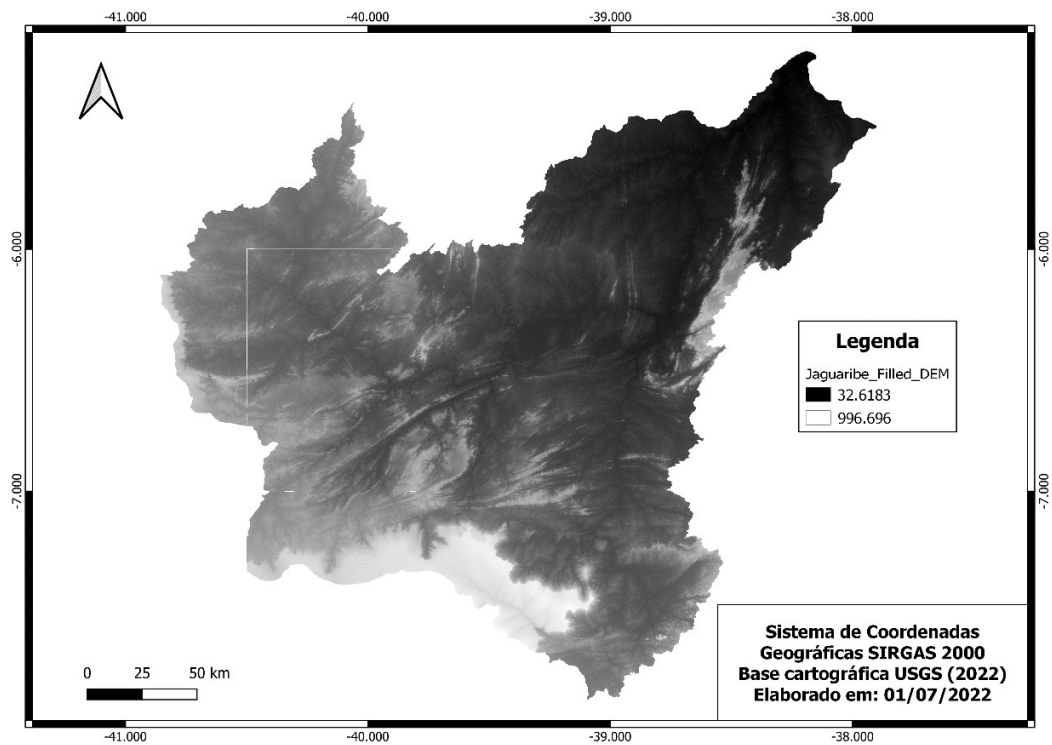
Para a demarcação de todas as sub-bacias, foi necessário adquirir os Modelos Digitais de Terreno (MDT) para toda a área do estado do Ceará, resultado do Projeto SRTM, realizado através de parceria entre a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e a NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), como objetivo de suprir a necessidade de uma base altimétrica global confiável (CIRILO *et al.*, 2014). Esses arquivos são disponibilizados gratuitamente no site do USGS (*United States Geological Survey*), favorecendo qualquer pesquisa que envolva dados geoespaciais, conhecimento topográfico, informações socioambientais, dentre outras.

Obtidos os MDTs, foi realizado tratamento com técnicas de geoprocessamento com utilização do software livre Qgis e seu complemento GRASS para preenchimento de vazios dos pixels sem dados para que a geração da rede de rios na área não fosse influenciada por erros de *input*, gerando depressões desnecessárias. Após a reprojeção dos arquivos para coordenadas geográficas SIRGAS 2000, foram processados os seguintes algoritmos para tratamento do MDT:

- 1) *R.fill.dir*: corrige as depressões geradas por pixels vazios no MDT de entrada. A saída é um arquivo raster, ou matricial, chamado *Filled_DEM* (Figura 19);
- 2) *R.watershed*: através do arquivo de entrada *Filled_DEM*, é gerada a rede de drenagem, direção do fluxo e sub-bacias para a área em arquivos rasters chamados *Drainage_direction* (Figura 20), *Stream_segments* e *Half_basins*, respectivamente. Nesse passo, para gerar a rede completa de drenagem, deve-se inserir um valor entre 300 a 500 para definição da quantidade de células na formação da rede (Figura 21), enquanto que, para gerar apenas o rio principal, é necessário elevar esse valor para cerca de 500.000 ou mais, a depender da resolução do arquivo matricial de entrada (Figura 22);

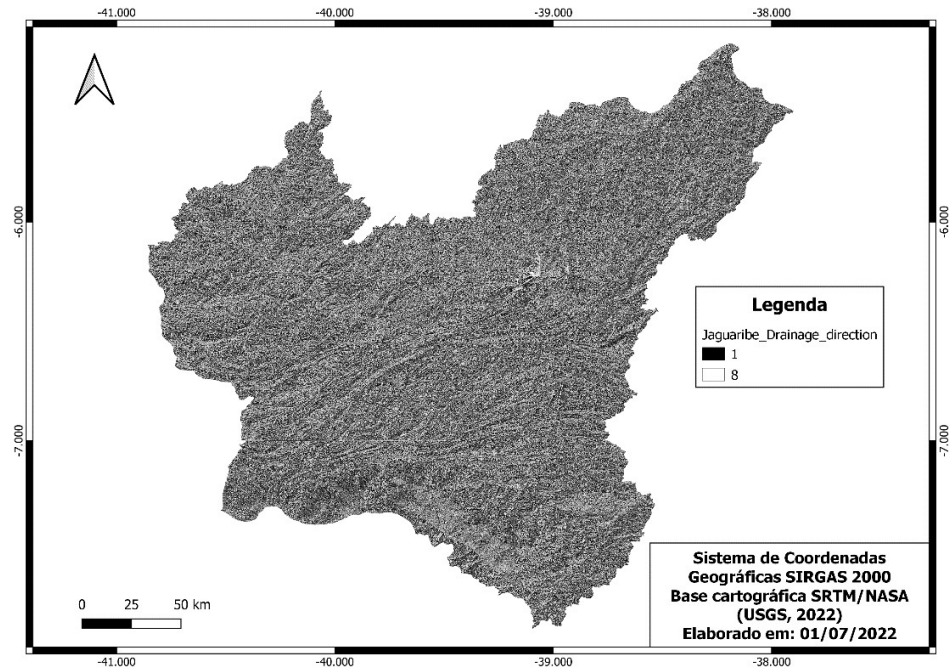
- 3) *R.to.vect*: vetorização dos arquivos rasters gerados para os cálculos do comprimento da rede de drenagem, declividade do rio principal e área das sub-bacias geradas;
- 4) *R.water.outlet*: utilizando como dados de entrada as coordenadas de cada posto fluviométrico utilizado para demarcação das sub-bacias de interesse e o arquivo raster gerado *Drainage_direction*, é delimitada a área de cada sub-bacia até a estação correspondente em arquivo raster chamado *Basin*, o qual também é submetido ao processo de vetorização pelo algoritmo *R.to.vect* (Figuras 21, 22 e 23).

Figura 19 - Raster com MDT para a área das bacias hidrográficas do Salgado, Alto Jaguaribe e Médio Jaguaribe sem depressões.



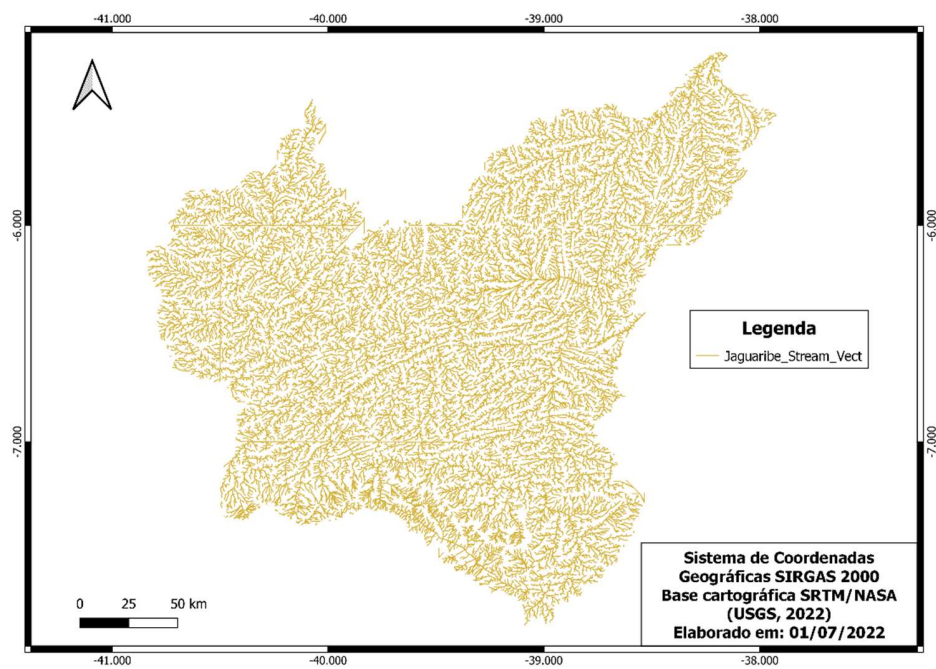
Fonte: Autora (2023).

Figura 20 - Raster gerado com a direção do fluxo para a área das bacias hidrográficas do Salgado, Alto Jaguaribe e Médio Jaguaribe.



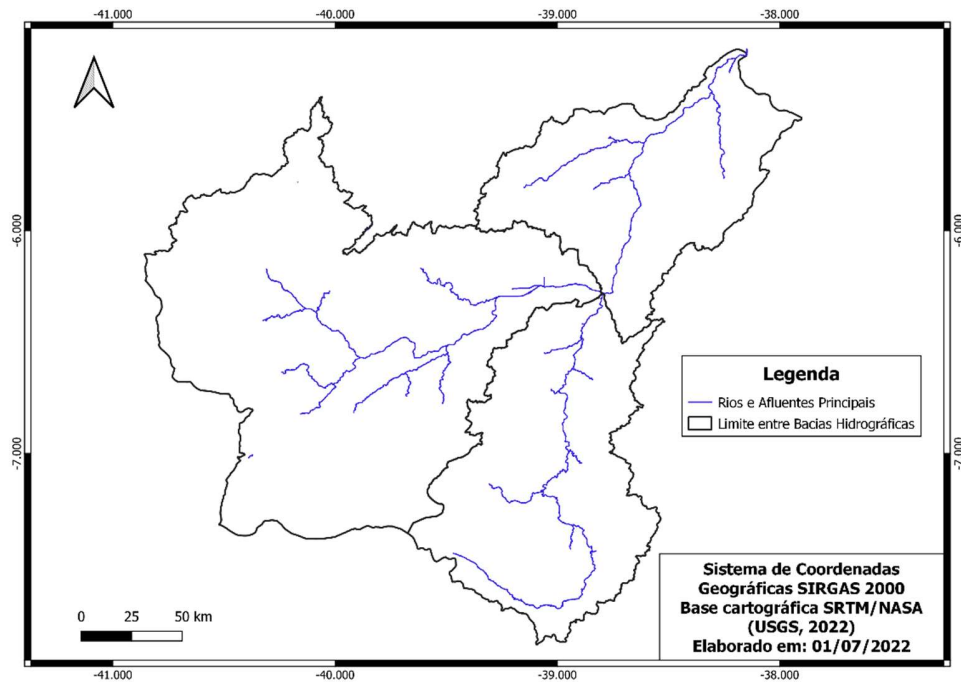
Fonte: Autora (2023).

Figura 21 - Rede de drenagem gerada para a área das bacias hidrográficas do Salgado, Alto Jaguaribe e Médio Jaguaribe, com valor de quantidade de células de 500 unidades.



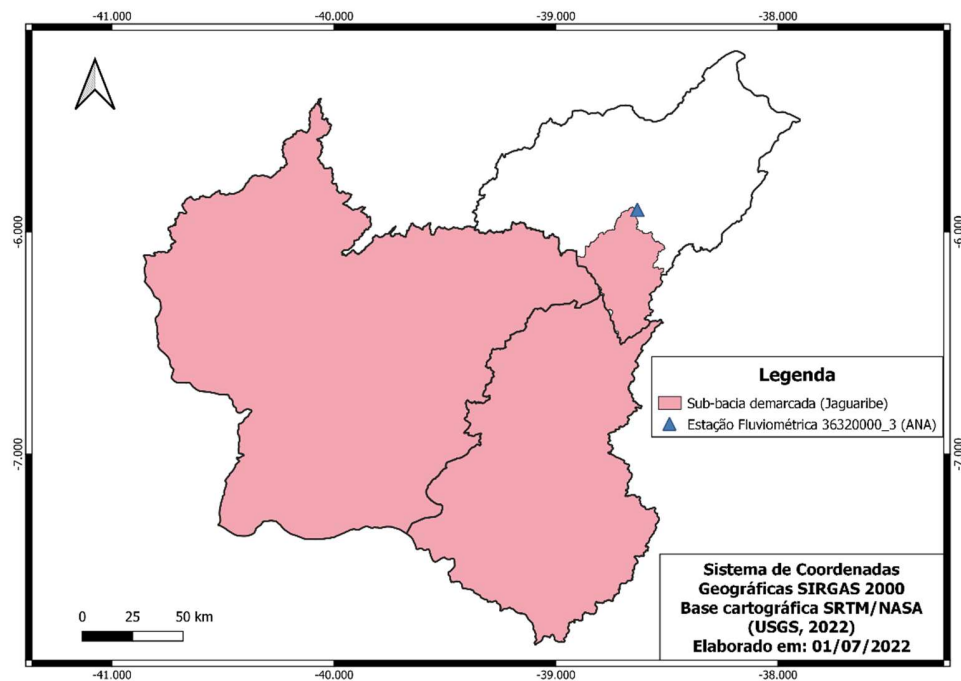
Fonte: Autora (2023).

Figura 22 - Rede de rios e afluentes principais para a área das bacias hidrográficas do Salgado, Alto Jaguaribe e Médio Jaguaribe, com valor de quantidade de células de 500.000 unidades.



Fonte: Autora (2023).

Figura 23 - Vetorização do raster gerado com a delimitação da sub-bacia de Jaguaribe.



Fonte: Autora (2023).

Os dados físicos da bacia são então calculados através da tabela de atributos do Qgis, como área, comprimento da rede de rios, declividade do rio principal e cálculo do parâmetro S através de plugin instalado e *shapefile* obtido da EMBRAPA (Figura 7). A partir desses resultados, pode-se calcular o parâmetro K , conforme Equação 18 do Anexo I.

3.2.1.2 Obtenção dos dados hidrológicos

Os dados fluviométricos e pluviométricos foram obtidos a partir de *plugin* instalado no Qgis, desenvolvido pelo Laboratório de Hidráulica Computacional da USP (LHC), habilitado para fazer o download diretamente da base de dados da ANA disponibilizada pelo Hidroweb.

Os dados fluviométricos foram obtidos a partir da seleção das estações feita por Virões (2018) em que cada posto apresenta, no mínimo, um período de 8 anos consecutivos de dados. Para a sub-bacia de Chorozinho foi escolhida a Estação 35880000, com dados consistentes com falhas de apenas 2 dias para o período de 31 de maio de 1969 a 1º de maio de 1984, menos de 5 anos. Essa foi a estação que mais apresentou dados consecutivos de vazão para a área delimitada. A Tabela 2 apresenta as informações das estações fluviométricas utilizadas para cada uma das 8 sub-bacias demarcadas.

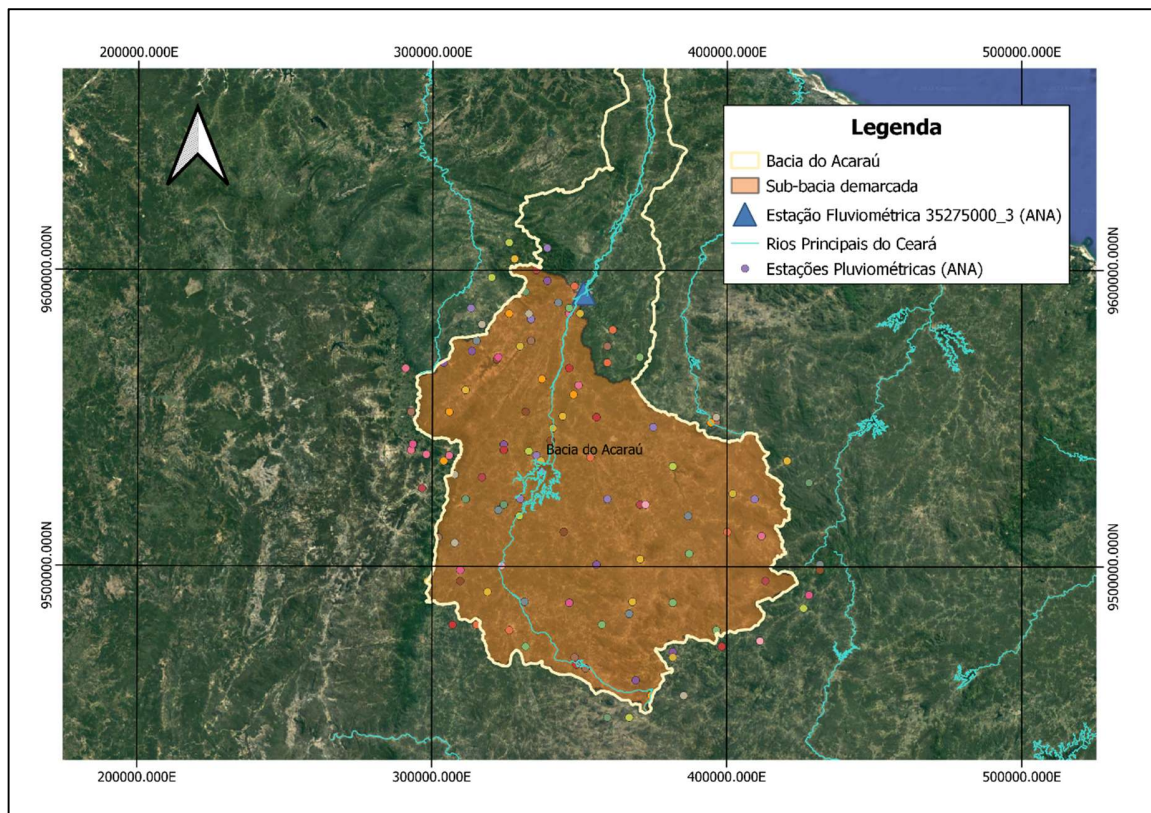
Tabela 2. Postos Fluviométricos utilizados para demarcação das sub-bacias de interesse.

Código	Cidade	Rio	Lat	Long	Área de Drenagem (km ²)
36290000_3	Icó	Salgado	-38,867	-6,407	12423,13
36160000_3	Iguatu	Jaguaribe	-39,2933	-6,3744	20407,61
36320000_3	Jaguaribe	Jaguaribe	-38,6331	-5,8997	39630,91
36470000_3	Senador Pompeu	Banabuiú	-39,3811	-5,5958	4496,86
36520000_3	Quixeramobim	Quixeramobim	-39,2922	-5,2014	6996,858
36580000_3	Morada Nova	Banabuiú	-38,4464	-5,1219	17154,836
35830000_3	Aracoiaba	Choró	-38,9433	-4,6578	1589,166
35880000_3	Chorozinho	Choró	-38,4833	-4,3	4057,751

Fonte: Autora (2023).

Os dados pluviométricos foram obtidos a partir de buffer de 0.1 referente ao *shapefile* da área de cada sub-bacia de modo a possibilitar que postos vizinhos fora do recorte demarcado fossem selecionados, o que pode influir em resultados mais representativos, como demonstrado na Figura 24 para a sub-bacia de Sobral, na bacia hidrográfica do Acaraú. Tanto as séries temporais de precipitações, vazões e dados de evapotranspiração são diários e compatilizados para corresponder ao mesmo período.

Figura 24 - Exemplo de obtenção de dados pluviométricos de estações de monitoramento da ANA no Qgis pelo *plugin* LHC.



Fonte: Autora (2023).

O número de postos pluviométricos cujos dados foram utilizados para o cálculo da chuva média para cada sub-bacia segue na Tabela 3:

Tabela 3 - Número de postos pluviométricos com dados utilizados no cálculo da chuva média para cada sub-bacia.

Nome	Rio	Nº de Postos Pluviométricos	Área de Drenagem (km ²)
Icó	Salgado	135	12423,13
Iguatu	Jaguaribe	204	20407,61
Jaguaribe	Jaguaribe	372	39630,91
Senador Pompeu	Banabuiú	52	4496,86
Quixeramobim	Quixeramobim	79	6996,858
Morada Nova	Banabuiú	177	17154,836
Aracoiaba	Choró	23	1589,166
Chorozinho	Choró	73	4057,751

Fonte: Autora (2023).

Como o modelo CAWM é do tipo concentrado, nesta pesquisa cada sub-bacia é representada pela área de drenagem da estação fluviométrica modelada. Logo, foi calculada a chuva média diária com preenchimento de falhas como representativa para cada uma das sub-bacias através do Método IDW em planilha do Excel habilitada para macros. Este método de interpolação objetiva avaliar a variabilidade espacial das precipitações de forma ponderada e considerando os n postos mais próximos como função do inverso de uma potência da distância, geralmente com o expoente dois gerando bons resultados (MELLO *et al.*, 2003; WATSON; PHILIP, 1985), recebendo a denominação de inverso do quadrado da distância ponderado. Quanto mais próximo do ponto de referência, maior é o peso atribuído ao posto amostrado (GARDIMAN JUNIOR *et al.*, 2021).

Em seguida, foram obtidos os dados de evapotranspiração do site do INMET, cujas normais climatológicas são calculadas com base no evaporímetro de Piché. Os dados possuem distribuição mensal, constantes de cada posto de monitoramento inserido nas sub-bacias em estudo. Quando a sub-bacia não continha nenhum posto, foram escolhidas estações próximas em áreas com características climáticas semelhantes. Quando era necessário considerar vários postos de influência na área, foi feita uma média aritmética dos dados de cada posto. A Tabela 4 apresenta as informações dos postos evaporimétricos utilizados.

Tabela 4 - Postos de Evapotranspiração do INMET utilizados em cada sub-bacia.

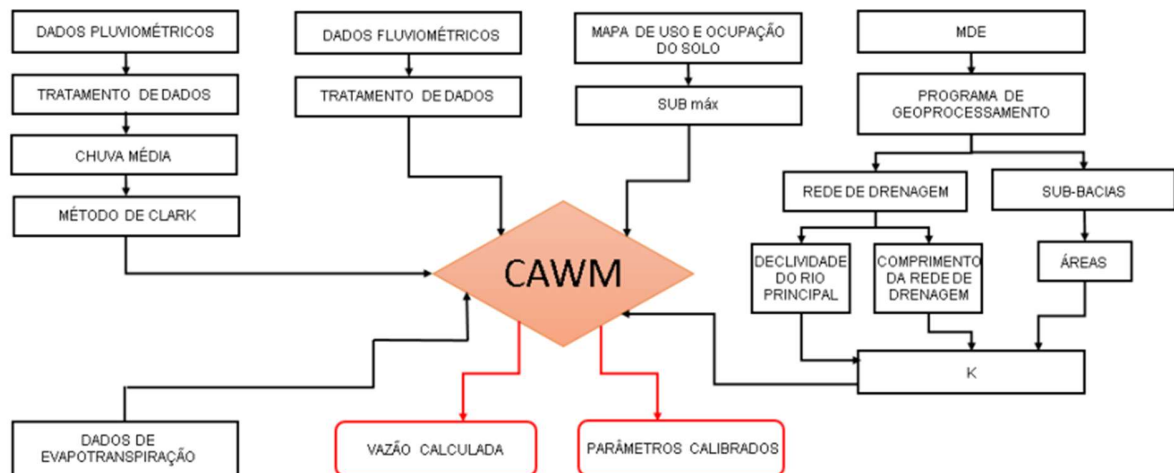
Código	Cidade	Sub-bacias
82784	BARBALHA	Icó, Jaguaribe
82777	CAMPOS SALES	Jaguaribe
82397	FORTALEZA	Aracoiaba, Chorozinho
82487	GUARAMIRANGA	Aracoiaba, Chorozinho
82686	IGUATU	Jaguaribe
82588	MORADA NOVA	Aracoiaba, Chorozinho
82586	QUIXERAMOBIM	Aracoiaba, Chorozinho, Iguatu, Morada Nova, Senador Pompeu, Quixeramobim
82683	TAUA	Jaguaribe

Fonte: INMET (2022).

Devido ao plugin do LHC instalado no Qgis, pode-se obter os dados de precipitação e vazão diretamente dos bancos de dados da ANA, enquanto os dados de evapotranspiração são adquiridos do INMET, sem a necessidade de ajuste em seus valores que já são obtidos com base no evaporímetro de Piché, o que facilita os cálculos da modelagem.

O fluxograma indicado na Figura 25 demonstra os procedimentos realizados, desde a fase de pré-processamento até a calibração e validação com o modelo CAWM IV. O período de calibração correspondeu aos primeiros 40% do período com dados disponíveis para todas as sub-bacias.

Figura 25 - Fluxograma demonstrativo da modelagem hidrológica utilizando o modelo CAWM IV.



Fonte: Feitoza (2021, p. 67).

3.2.2 Modelo de Operação de Reservatórios – CAROS

Para a realização das simulações com o modelo CAROS, é necessário, primeiramente, traçar a área do espelho d'água do reservatório em análise no arquivo *raster* correspondente de forma a traçar seu perfil hipsométrico. Essas informações constam de catálogos da ANA, mas, nesta pesquisa, optou-se por refazer esses cálculos de forma a se utilizar dados mais atualizados. Essas etapas são realizadas através de técnicas de geoprocessamento também com uso do Qgis.

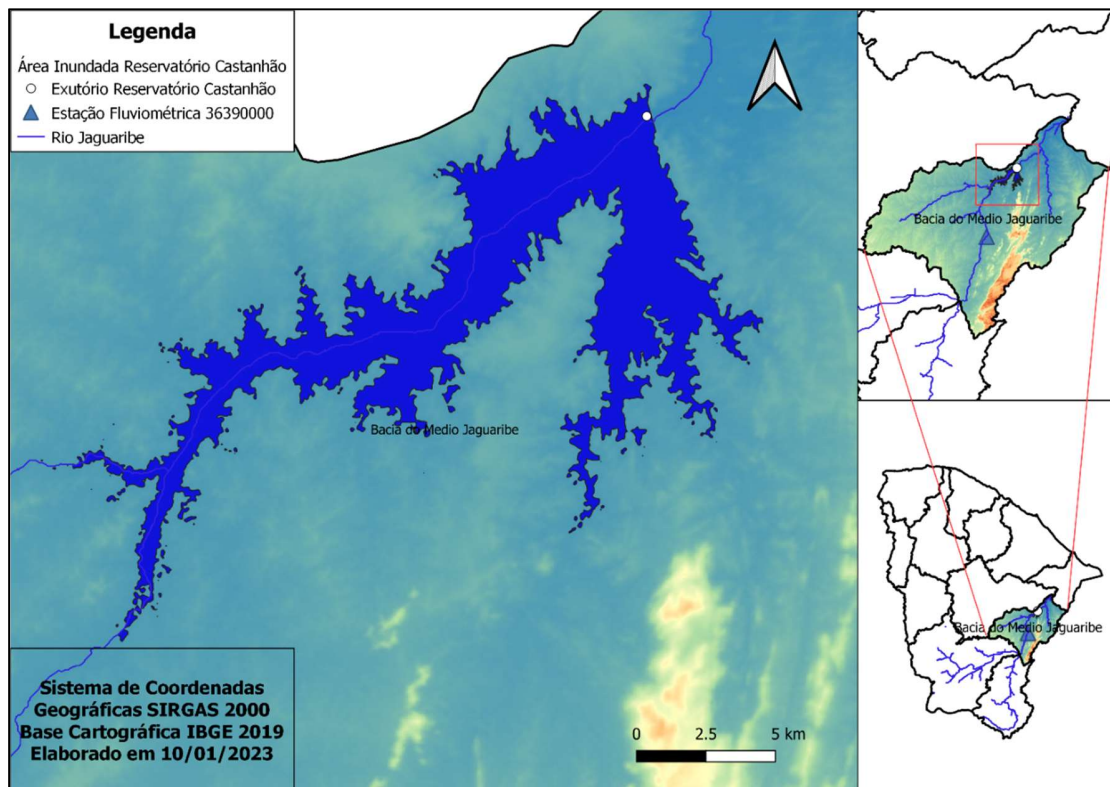
Para o traçado da área do espelho d'água, utiliza-se a ferramenta *Reclassify by table* (Reclassificação por tabela), em que o limite do traçado é a cota da soleira do reservatório. São geradas curvas de nível a cada metro e deve-se fechar o polígono da curva de nível da cota da soleira criada onde fica localizada a barragem, além de “limpar” as curvas de nível restantes, para, posteriormente, recortar essa área de forma a se utilizar esse novo arquivo para a obtenção das curvas hipsométricas com a ferramenta *Hypsometric curves*.

Após obtidas as curvas hipsométricas da área da barragem no intervalo a cada metro, calcula-se o volume, também a cada intervalo de 1 metro, considerando o formato trapezoidal. A partir dos valores de áreas, cotas e volumes obtidos, são elaboradas as

curvas cota-área-volume, volume-área e volume-cota, sendo esta última dividida em duas partes de forma a melhor ajustar as equações polinomiais de 4ª ordem utilizadas no modelo CAROS, cujos coeficientes são utilizados para o cálculo do balanço hídrico a cada cota de forma a se zonear o corpo hídrico, desde a maior capacidade até o nível considerado crítico, conforme Memorial de Cálculo apresentado no Anexo II.

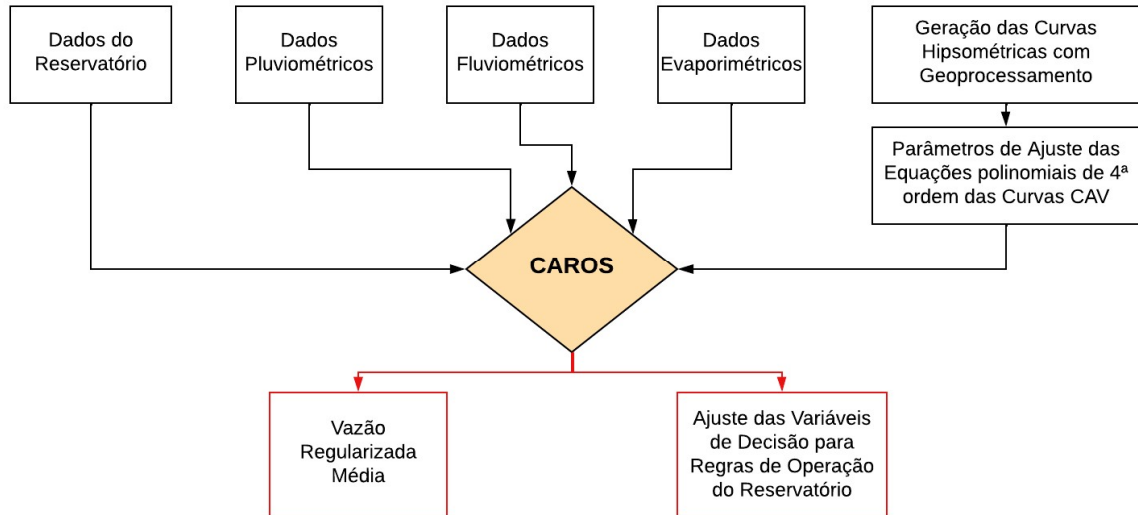
A Figura 26 corresponde à área inundada do Castanhão e a Figura 27 destaca o fluxograma representativo das entradas e saídas para realização das simulações com o CAROS.

Figura 26 - Área Inundada do reservatório Castanhão (CE).



Fonte: Autora (2023).

Figura 27 - Fluxograma demonstrativo dos dados necessários para as simulações de operações de reservatórios com o modelo CAROS.



Fonte: Autora (2023).

3.2.2.1 Sinergia hídrica

Para o cálculo da vazão regularizável em um reservatório, é necessário promover uma simulação baseada nos dados referentes aos volumes de acumulação, afluente, precipitado, evaporado e retirado, de forma a se formalizar um balanço hídrico objetivando a definição da quantidade de água que pode ser retirada sem prejuízos à operação do reservatório. Essa simulação deve corresponder ao intervalo de tempo dos dados hidrológicos disponíveis para a área a montante da barragem. Esse cálculo pode ser demonstrado resumidamente através da Equação 1:

$$V_{ri} = V_{ri-1} + V_{ai} + V_{pi} - V_{ei} - V_{qi} \quad (1)$$

Onde:

V_{ri} = Volume (m³) de água armazenado no reservatório no período i ;

V_{ri-1} = Volume (m³) de água armazenado no reservatório no período $i-1$;

V_{ai} = Volume (m³) de água afluente ao reservatório no período i ;

V_{pi} = Volume (m³) de água precipitado no reservatório no período i ;

V_{ei} = Volume (m³) de água evaporado no reservatório no período i ;

V_{qi} = Volume (m³) de água regularizado ou retirado do reservatório no período i .

Nesta pesquisa, os dados de precipitação e vazão foram os mesmos utilizados na modelagem hidrológica, sendo as precipitações correspondentes à área do reservatório Castanhão. O modelo CAROS leva em consideração que a vazão regularizável varia de acordo com a quantidade de água disponível no reservatório.

O ganho sinérgico em um reservatório, ou sistema de reservatórios, baseia-se na avaliação da sua vazão regularizada, com simulações de retirada de água segundo certas regras de operação associadas a determinadas garantias de atendimento.

Segundo Farias *et al.* (2005), para a simulação integrada de um sistema de reservatórios que considere a topologia dos mesmos, os volumes vertidos em um dado reservatório podem representar volumes afluentes em outro localizado a jusante. Por conseguinte, o balanço hídrico é melhor representado pela Equação 2:

$$Vr_i = Vr_{i-1} + Va_i + Vp_i + Vvm_i - Ve_i - Vv_i - Vqab_i \quad (2)$$

Em que Vvm_i é o volume vertido a montante no mês i em m^3 .

As seguintes restrições são apresentadas por Farias *et al.* (2005):

- Quando Vr_i (m^3) ultrapassa a capacidade máxima do reservatório, e $Vv_i > Vqabi$, considera-se que o volume regularizado ou retirado é igual a 0;
- Quando Vr_i (m^3) ultrapassa a capacidade máxima do reservatório, e $Vv_i < Vqabi$, considera-se o volume vertido subtraído do volume regularizado ou retirado.
- Quando o reservatório em um dado mês não supre a vazão retirada, vale então para esses meses que $Vq'abi < Vqab$, sendo $Vq'abi$ a vazão retirada nos meses secos extremos.

Neste último caso, caracteriza-se uma falha no suprimento. A garantia de abastecimento para uma certa vazão regularizada, que deve ser pré-fixada, se relaciona entre esse número de falhas anotadas no período de simulação (nv) e o número de períodos simulados (n), como caracterizado na Equação 3:

$$g = \left(1 - \frac{nv}{n}\right) \times 100 \quad (3)$$

A relação dada pela equação do balanço hídrico e pelo cálculo da garantia de oferta g (%) para um intervalo de valores de vazão regularizada nos fornece a curva de garantia do reservatório. No Brasil, usualmente é adotada uma garantia de abastecimento

de 90% para as atividades hidroagrícolas, 95% para atividades envolvendo produção de energia e 99-100% para abastecimento humano e industrial (FARIAS *et al.*, 2005, p. 06).

Outra maneira de verificar a disponibilidade hídrica de um reservatório se baseia no conceito de “volume de alerta”, correspondendo ao método adotado pelo modelo CAROS, utilizado nesta pesquisa. Esse volume de alerta, ou de pré-colapso, significa um determinado volume a partir do qual um percentual da vazão regularizada pode ser utilizado, sendo chamada de “vazão de emergência”. Destarte, as regras de operação do reservatório consubstanciam-se nas relações que seguem Equações 4, 5 e 6:

$$Q_{ab_i} = \begin{cases} Q_i \Leftrightarrow V_{i+1} \geq V_a \\ \%Q_r \Leftrightarrow V_a \geq V_i \geq V_{\min} \end{cases} \quad (4)$$

$$Q_{ab_i} = \begin{cases} 0 \Leftrightarrow \left[V_i + Q_{a_i} - E_i \left(\frac{A_i + A_{i+1}}{2} \right) \right] \leq V_{\min} \\ Q_v \leq \%Q_r \Leftrightarrow V_{i+1} \geq V_{\min} \end{cases} \quad (5)$$

$$V_{i+1} \leq V_{\max} \rightarrow i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

Em que V_i , V_{i+1} , A_i , A_{i+1} são, respectivamente, os volumes e as áreas do espelho d'água nos instantes de tempo i e $i+1$ da simulação, em m^3 e m^2 , respectivamente; V_a é o volume de alerta, em m^3 ; $\%Q_r$ significa a vazão de emergência, em m^3s^{-1} ; Q_{ab_i} é a vazão retirada, em m^3s^{-1} ; E_i representa a parcela evaporada, em m ; Q_{a_i} é a vazão afluente ao reservatório, em m^3s^{-1} ; Q_v representa a vazão de falha, em m^3s^{-1} , e; n caracteriza o número de intervalo de tempo simulados. Todas as variáveis encontram-se no intervalo i da simulação. $V_{\min}$ e $V_{\max}$ são o volume mínimo operacional e a capacidade máxima do reservatório, em m^3 , nessa ordem.

Após conhecidas as vazões regularizadas dos reservatórios considerando apenas seus balanços hídricos naturais, a sinergia do sistema pode ser obtida através de novas simulações do mesmo sistema, com o acréscimo das afluições transpostas do rio São Francisco. O volume extra que ultrapassa a adução hídrica ao sistema é considerado o resultado sinérgico positivo do sistema. Em termos matemáticos, a sinergia pode ser representada pela Equação 7.

$$\text{Sinergia} = Q_{r-ct} - Q_{r-st} - Q_{sf} \quad (7)$$

Sendo: Q_{r-ct} a vazão ponderada contínua obtida da vazão regularizada pelo reservatório para uma determinada adução, em m^3s^{-1} ; Q_{r-st} a vazão ponderada contínua

obtida da vazão regularizada pelo reservatório sem aduções extras, em m^3s^{-1} ; Q_{sf} é a vazão média aduzida continuamente, em m^3s^{-1} .

Qualquer vazão considerada extra que não seja proveniente da transposição do rio São Francisco, como a adução de águas subterrâneas de forma integrada ao sistema de reservatórios ou modificações no regime de afluições providas de vertimentos a montante, deve ser computada na equação da sinergia hídrica, que pode ser reescrita conforme Equação 8.

$$\text{Sinergia} = Q_{r-ct} - Q_{r-st} - Q_{sf} - Q_{ext} - \Delta Q_{af} \quad (8)$$

Em que Q_{ext} e ΔQ_{af} são o aporte médio contínuo não provindo da transposição de bacias e a possível diferença no regime de afluições resultantes de vertimentos a montante que podem decorrer de mudanças de operação dos reservatórios, respectivamente.

Dessa forma, a sinergia hídrica representa o melhor aproveitamento das águas exógenas ao sistema considerado pela redução de vertimentos e evaporações. Nesse sentido, há que se observar a variação dos volumes vertidos (ΔV_{vert}), evaporados (ΔV_{evap}) e acumulados (ΔV_{acum}), todos na unidade de m^3 , antes e depois da transposição, como exposto na Equação 9.

$$\text{Sinergia} = \Delta V_{vert} + \Delta V_{evap} + \Delta V_{acum} \quad (9)$$

A parcela da diferença do volume acumulado no reservatório torna-se relevante quando os volumes úteis são superiores aos 4 bilhões de m^3 , como observado por Farias *et al.* (2005), sendo o caso do Castanhão, localizado na bacia cearense do Médio Jaguaribe, e escolhido para a simulação nesta pesquisa.

Para o cálculo da sinergia hídrica foram consideradas as vazões naturais e incrementais afluentes ao reservatório Castanhão. Cabe destacar que na área da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe existem outros reservatórios de porte considerável e receptores das águas do São Francisco, dentre eles, o Orós, construído em 1961, e Atalho, construído em 1991. O posto fluviométrico de referência abrange as áreas de drenagem desses dois reservatórios, conforme exposto nas Figuras 12, 13 e 14.

Não foi realizado pré-tratamento de dados de vazão, sendo indicado para preenchimento de falhas, pois quando estas ocorrem em período chuvoso interferem nos resultados. Os dados de vazão foram os utilizados na modelagem hidrológica, que, como

auferiu bons resultados, foram mantidos. Todas as informações técnicas necessárias (Anexo II) foram obtidas das Fichas Técnicas dos reservatórios do semiárido elaboradas pela ANA.

De acordo com a Ficha Técnica dos reservatórios mantida pela COGERH, a vazão regularizada é de $21,89 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e, por isso, para a simulação com as vazões naturais a este reservatório, a variável Vazão Máxima Regularizável recebeu este valor.

Na determinação das vazões afluentes ao Castanhão, também foi observada a pesquisa de Farias *et al.* (2005), onde se obedeceu as demandas relacionadas ao reservatório de Sobradinho, bem como a demanda destinada à CHESF de forma a atender a produção de energia com uma garantia correspondente. Foi ainda considerada a utilização das águas do São Francisco que não seriam necessárias para atendimento das demandas da bacia doadora, inclusa a exigência de se manter uma vazão na foz do rio de $1.300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Dessa forma, o autor utiliza uma vazão incremental média diária de $4,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e uma vazão máxima aduzida de $45,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (utilizada como Vazão Máxima Regularizável) das águas do São Francisco para o Castanhão, as quais foram utilizadas para a primeira simulação.

Para uma análise mais atualizada, também foi observado parecer sobre o Plano de Gestão Anual referente ao ano de 2022 para o Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional – PISF, elaborado pela ANA (2022). O parecer apresenta como vazões mínimas requisitadas pela COGERH em alocações de água para os reservatórios interligados ao PISF: $12 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, para os meses de janeiro a julho, e de $1,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a partir de agosto, uma média de $7,42 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ anual, visando usos associados ao reservatório Castanhão, as quais foram utilizadas na segunda simulação. O período de simulação foi de 45 anos (1977-2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados e discussões da simulação de vazões com utilização do modelo hidrológico CAWM IV e do cálculo da sinergia hídrica através de resultados obtidos com o modelo de operação CAROS aplicado ao reservatório Castanhão.

Em relação aos aprimoramentos realizados no modelo hidrológico CAWM IV pelo Grupo de Estudos em Recursos Hídricos da UFPE implementados a partir do final de 2022 no tocante ao refinamento do processo de regionalização, como a adequação do cálculo do parâmetro K_L a partir do balanço hídrico de longo prazo e a relação do parâmetro K com a área da bacia de modo a se evitar distorções do efeito de escala do arquivo MDT utilizado, conforme descrito no subcapítulo 3.2, optou-se por realizar a simulação da bacia de Morada Nova também com a nova base de cálculo de forma a se comparar os resultados (CIRILO, 2022).

4.1 SIMULAÇÃO DE VAZÕES

Os valores utilizados para as calibrações dos parâmetros no CAWM IV para cada uma das 8 sub-bacias analisadas constam na Tabela 5. No estudo de Cirilo *et al.* (2020), referente à regionalização de parâmetros para bacias localizadas no semiárido nordestino, o parâmetro K_s foi regionalizado com sucesso e, dessa forma, utilizado para todas as sub-bacias no valor constante de 0,0119, valor igualmente utilizado por Feitoza (2021). Porém, nesta pesquisa, optou-se por calculá-lo, se mantendo no intervalo entre 0 a 0,0156 para todas as sub-bacias.

Os parâmetros b e B_e se mantiveram fixos em 5/3 e 2, respectivamente, de acordo com as equações do modelo. Os parâmetros calibráveis foram, portanto, K_s e K_L , este último se adequando ao intervalo 0 a 0,75. O parâmetro K foi calculado de acordo a formulação do modelo, em função da área da bacia, declividade de seu rio principal, comprimento da rede de drenagem e da capacidade de retenção de água no solo S , se mantendo entre o intervalo recomendado. Em relação aos parâmetros do expoente de

perdas p e das recargas, estes foram considerados iguais a 1 em todas as sub-bacias, o que significa um equilíbrio entre perdas e recargas.

Igualmente ao realizado por Feitoza (2021), o parâmetro α , variável, foi fixado em seu *default* de 1,4 para todas as sub-bacias. Esse valor corresponde aos casos em que o balanço global da simulação mostra equilíbrio entre os volumes precipitados, evapotranspirados e escoados. Em outro extremo, um valor $\alpha = 0$ seria usado para situações com a evapotranspiração superdimensionada e $\alpha = 10$ é recomendável para sub-bacias onde a evapotranspiração mostrou-se subdimensionada.

Tabela 5 - Parâmetros utilizados na calibração do modelo CAWM IV para cada sub-bacia delimitada.

Estação Fluviométrica		K _L	K _S	K _{CALC}	S	A (km ²)	I (m/m)	L _t (m)
Código	Cidade							
35830000_3	Aracoiaba (1ª Simulação)	0,000	0,009	0,0380	75,737	1613,700	0,001	1541625
35830000_3	Aracoiaba (2ª Simulação)	0,226	0,000	0,0380	75,737	1613,700	0,001	1541625
35880000_3	Chorozinho	0,373	0,006	0,0141	75,737	4057,750	0,001	4041215
36160000_3	Iguatu	0,000	0,000	0,0154	112,200	20407,610	0,001	9106915
36290000_3	Icó	0,704	0,004	0,024	113,797	12423,130	0,001	5193687
36320000_3	Jaguaribe	0,624	0,000	0,011	110,085	39630,910	0,001	11912866
36470000_3	Senador Pompeu	0,478	0,0146	0,053	102,717	4524,910	0,001	1879700
36520000_3	Quixeramobim	0,754	0,0156	0,011	66,061	7037,880	0,002	6788114
36580000_3	Morada Nova	0,479	0,005	0,021	76,131	17236,950	0,001	5293457

Fonte: Autora (2023).

Os indicadores de eficiência estatísticos anuais para cada sub-bacia modelada se encontram no Apêndice B e contribuem para uma melhor compreensão do comportamento hidrológico temporal das vazões. Percebe-se que na maioria das estações as vazões mais baixas não foram muito bem representadas (NSE_{LOG}), assim como em Feitoza (2021). Também o valor de referência aceitável para o percentual de sucesso alcançado para o parâmetro P_{bias} mostrou-se elevado entre algumas simulações mesmo com bons valores do coeficiente de determinação R^2 . Como os períodos de verificação correspondem a anos com diminuição de estações de monitoramento pluviométrico, os resultados foram nitidamente afetados, enquanto os bons resultados no período de calibração aferem resultados aceitáveis no balanço global.

Outras formas de avaliação dos resultados correspondem a hidrogramas, gráficos e verificação de possíveis fatores de influência, como presença de barragens e perda de monitoramento hidrológico. São apresentados os gráficos dos períodos de calibração por dia Juliana e as curvas de permanência de cada sub-bacia modelada, estas em escala logarítmica para evidenciar as medidas das vazões mais baixas e as relações entre os dados. O Anuário de Monitoramento Quantitativo dos açudes controlados pela COGERH (COGERH, 2009a) possui registros de ocorrência de eventos extremos – permanência no volume morto e sangramento de açudes – desde o ano de 1976. Percebe-se que nos anos 2004 e 2009 houve registros de eventos extremos de cheias e consequentes sangramentos em quase todos os açudes monitorados, o que provavelmente influenciou os resultados das modelagens.

O Ceará conta com o monitoramento de reservatórios e coleta de dados hidrológicos da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), criada em 1974, e que está na base do processamento, produção e interpretação desses dados. A análise segue o proposto nas pesquisas de Virões (2018) e Feitoza (2021), em que o primeiro utilizou o modelo MODHAC com passo de tempo mensal, enquanto a segunda utilizou o CAWM IV com simulações diárias.

4.1.1 Estação 35830000 – Aracoiaba

Pertencente à bacia hidrográfica metropolitana, para esta sub-bacia foram realizadas duas simulações. A primeira entre o período de 1984 a 2021, a qual não gerou bons resultados nem para o período de calibração – com valores de RSR e R^2 insuficientes e NSE_{LOG} negativo – nem para o período de validação, com todos os coeficientes de Nash abaixo de 0,36, NSE_{LOG} com valor negativo e extrapolação do coeficiente Pbias. O elevado valor de RSR e baixo coeficiente de determinação R^2 mostram que as vazões calculadas não se ajustam bem ao comportamento hidrológico da área.

Foram obtidos dados de chuva de 23 estações pluviométricas da ANA na região para cálculo da chuva média. Os resultados estatísticos e visuais podem ser conferidos na Tabela 6, juntamente ao gráfico da simulação para o período de calibração e à curva de permanência (Figuras 28 e 29, nessa ordem), a qual sugere efeito de regularização por presença de reservatórios.

Segundo Virões (2018), os postos utilizados para o cálculo da série de precipitações no período entre 2000 e 2007 continham apenas dados de estações localizadas fora da área da sub-bacia, as quais, provavelmente, não representam bem o comportamento hidrológico da região, enquanto no período de 1985 a 2000 existiam medições de 3 postos na área interna, o que tornou os resultados um pouco melhores, mas ainda insuficientes. Isso pode ser corroborado pela modelagem da sub-bacia de Chorozinho (Estação 35880000), a qual dispõe de uma área maior, abrangendo a sub-bacia de Aracoiaba e que apresentou melhores resultados, talvez por conter mais dados de chuva representativos.

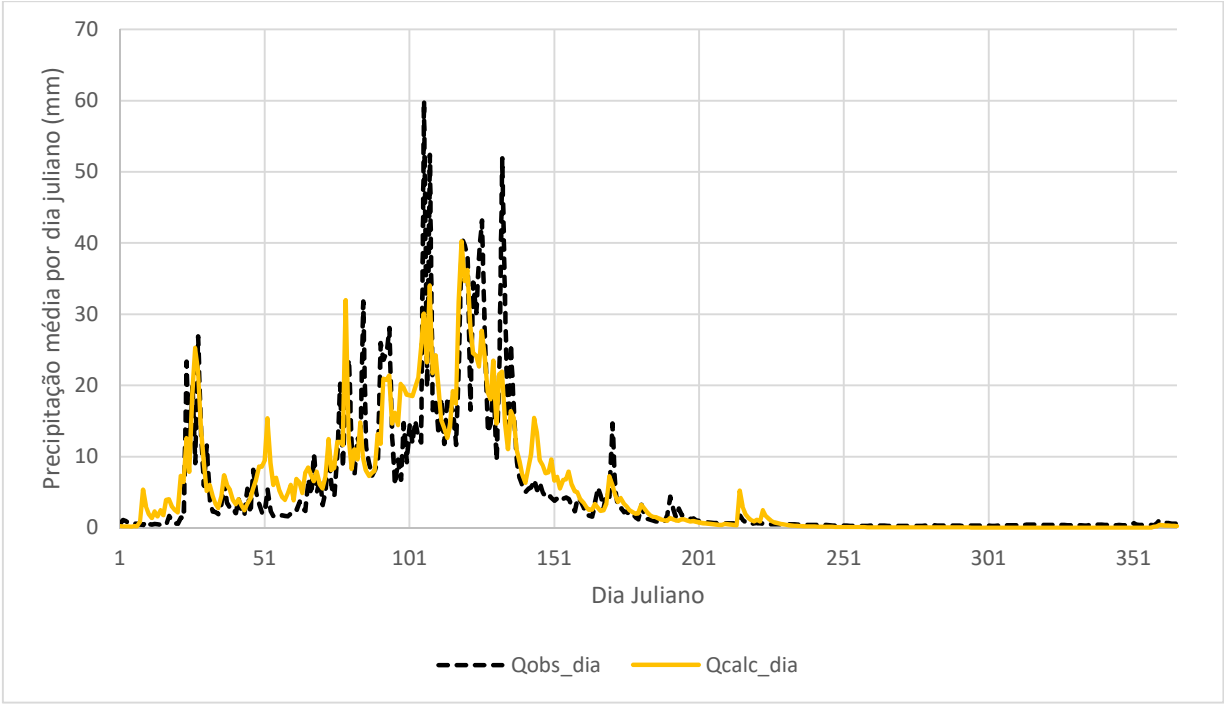
Em relação a barramentos, o Açude Pompeu Sobrinho localiza-se a montante da estação e possui capacidade de 143 hm³. Segundo o Anuário de Monitoramento Quantitativo dos açudes controlados pela COGERH, ocorreram eventos de sangramento nos anos 1986 e 1989, enquanto nos anos 1995, 1998, 1999, 2001 e 2002 o açude permaneceu no volume morto. Porém, esses eventos não explicam os pobres ajustes ocorridos na modelagem desta estação (COGERH, 2009a).

Tabela 6 - Coeficientes estatísticos obtidos na 1ª modelagem da estação 35830000 – Aracoiaba.

Indicadores de Eficiência do Modelo CAWM IV							
NSE	NSESQRT	NSELOG	Pbias	RMSE	MAE	RSR	R²
Calibração							
0,46	0,67	-1,88	4,83	20,81	4,54	0,73	0,47
Verificação							
0,30	0,12	-13,15	139,05	14,95	2,85	0,84	0,37
Global							
0,43	0,58	-3,09	26,00	18,69	3,87	0,75	0,44

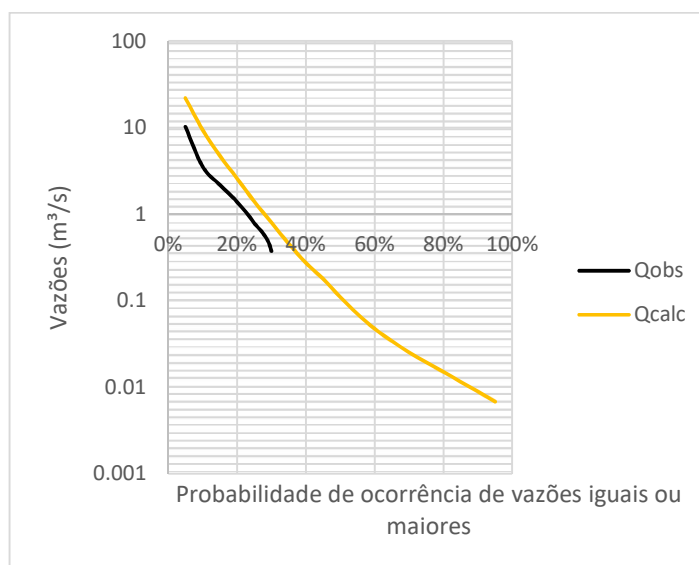
Fonte: Autora (2023).

Figura 28 - Vazão média no período de calibração por dia do ano na Estação 35830000 – Aracoiaba (Rio Choró).



Fonte: Autora (2023).

Figura 29 - Curva de Permanência da 1ª simulação para a sub-bacia de Aracoiaba.



Fonte: Autora (2023).

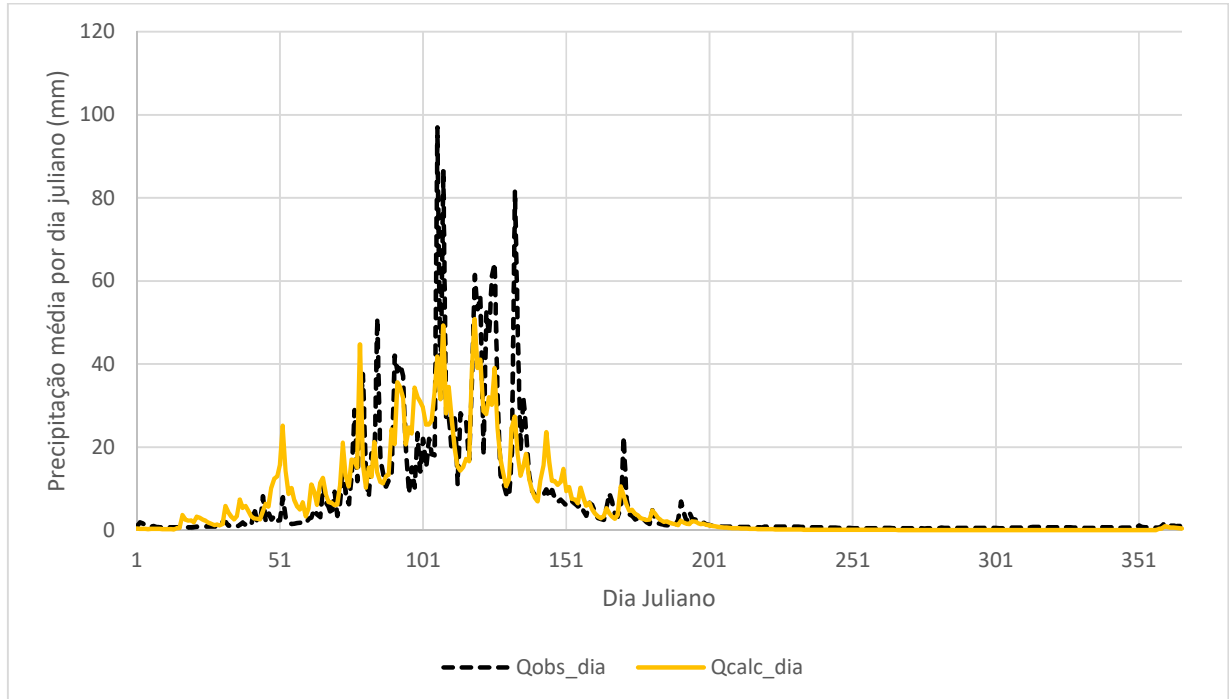
Na segunda simulação, optou-se por excluir o período entre 2001 e 2021, de forma a verificar se haveria alguma melhora nos resultados. Para a segunda simulação, realizada para o período de 1984 a 2000, foram obtidos resultados melhores, mas ainda insuficientes, que podem ser conferidos na Tabela 7, além do gráfico da simulação do período de calibração e curva de permanência nas Figuras 30 e 31.

Tabela 7 - Coeficientes estatísticos obtidos na 2ª modelagem da estação 35830000 – Aracoiaba.

Indicadores de Eficiência do Modelo CAWM IV							
NSE	NSE _{SQRT}	NSE- LOG	Pbias	RMSE	MAE	RSR	R ²
Calibração							
0,42	0,65	-1,31	-5,84	24,94	5,81	0,75	0,42
Verificação							
-4,07	-1,44	-9,59	530,11	9,21	2,52	2,52	0,34
Global							
0,43	0,60	-1,76	3,46	22,69	5,15	0,76	0,41

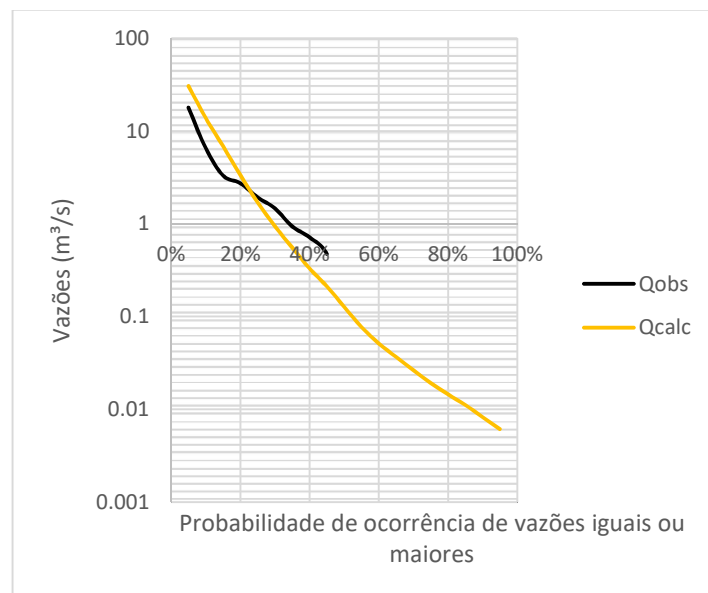
Fonte: Autora (2023).

Figura 30 - Vazão média no período de calibração por dia do ano na 2ª simulação na Estação 35830000 – Aracoiaba (Rio Choró).



Fonte: Autora (2023).

Figura 31 - Curva de Permanência da 2ª simulação para a sub-bacia de Aracoiaba.



Fonte: Autora (2023).

4.1.2 Estação 35880000 – Chorozinho

Essa sub-bacia também está inserida na bacia hidrográfica metropolitana e engloba a área da sub-bacia de Aracoiaba. A estação fluviométrica modelada é a 35880000, igualmente localizada no rio Choró. Os mesmos dados de evapotranspiração da sub-bacia Aracoiaba foram utilizados, além de selecionadas 73 estações pluviométricas da ANA dentro e na vizinhança da área demarcada. O período de simulação engloba 25 anos, indo de 3 de maio de 1969 a 20 de maio de 1994.

Os resultados obtidos foram bem melhores do que os resultados na modelagem hidrológica da sub-bacia de Aracoiaba, o que pode estar relacionado com a não inclusão do período dos anos 2000 em diante, confirmando que os dados observados de chuva são inconsistentes para a região de acordo com Virões (2018).

Conforme observado na Tabela 8, todos os coeficientes Nash apresentaram bons resultados, sendo muito bons o NSE e NSE_{SQRT} da calibração, e valores considerados bons de NSE_{LOG} , resultando em bons ajustes globais. Valores de Pbias foram, igualmente, bons a muito bons, tendo alcançado um melhor valor na verificação. O coeficiente RSR ficou no intervalo de valores considerados bons. O coeficiente de determinação R^2 também adquiriu valores significativos.

Tabela 8 - Coeficientes estatísticos obtidos na modelagem da estação 35880000 – Chorozinho.

Indicadores de Eficiência do Modelo CAWM IV							
NSE	NSE_{SQRT}	NSE_{LOG}	Pbias	RMSE	MAE	RSR	R^2
Calibração							
0,77	0,88	0,68	14,73	22,49	7,88	0,48	0,76
Verificação							
0,72	0,84	0,66	1,57	28,73	8,74	0,53	0,71
Global							
0,74	0,86	0,67	8,21	25,80	8,31	0,51	0,72

Fonte: Autora (2023).

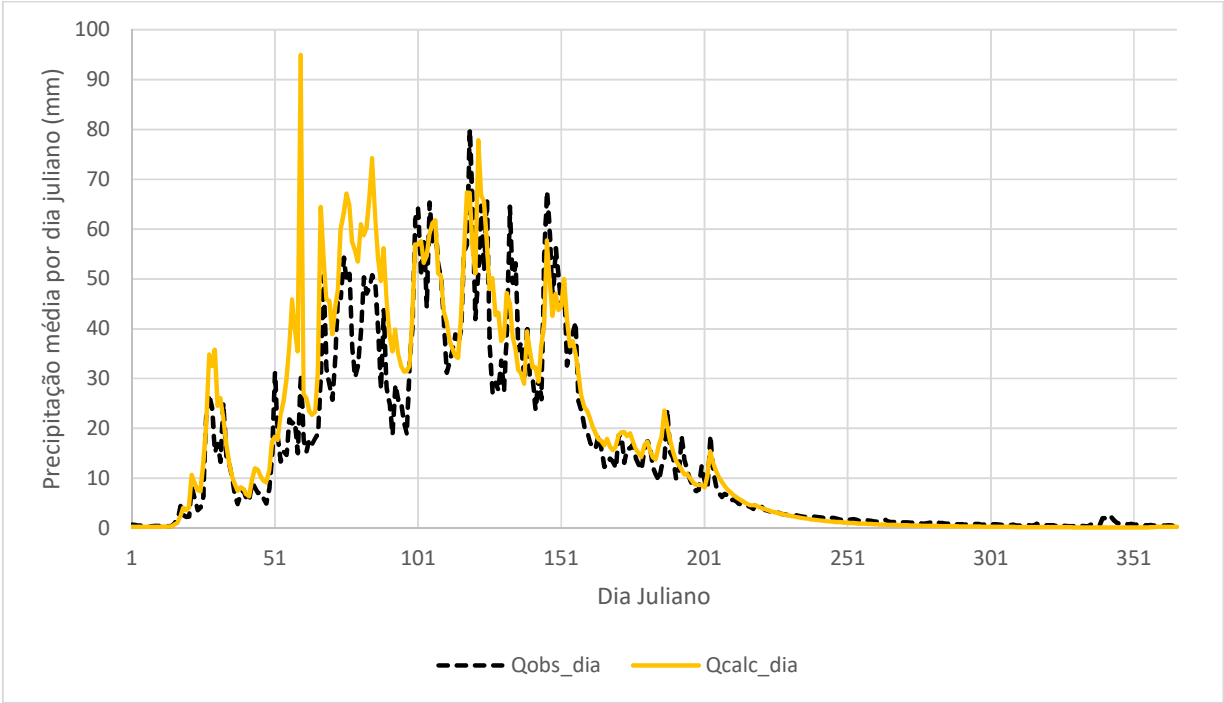
Em relação à análise de presença de barragens, segundo o Anuário de Monitoramento Quantitativo da COGERH (COGERH, 2009a), quase todos os eventos registrados estão fora do período da modelagem, com exceção do Açude Pompeu Sobrinho, o qual registrou eventos de sangramento nos anos 1986 e 1989, enquanto em 1995, 1998, 1999, 2001 e 2002 permaneceu no volume morto, como mencionado. Houve eventos de sangramento no açude Aracoiaba, inaugurado em 2002, (capacidade de 170,7 hm³) entre os anos 2004 a 2007 e 2009. O Açude Pacoti (capacidade de 340 hm³) possui registrados eventos dessa natureza nos anos de 1995, 1996, 2002 a 2004 e em 2009, enquanto eventos de permanência no volume morto ocorreram nos anos 1993 e 1999. O Açude Pacajus (capacidade de 240 hm³) sangrou em 1994 a 1997, 2002 a 2006 e 2009, e permaneceu no volume morto em 1992, 1993 e 1999.

Observa-se que, no período da simulação, os eventos de vertimentos e permanência em volume morto revezam-se temporalmente nos registros dos açudes Pacoti e Pacajus, ressaltando a variabilidade temporal das precipitações. O ano de 1974 apresenta um pico de vazão calculada sem relação correspondente com o volume precipitado observado. Segundo Nunes e Medeiros (2020, p. 11):

Nessas décadas (1960 e 1970), houve uma seca hidrológica, relacionada ao aumento da população e consequentemente da demanda hídrica. Mesmo com os açudes Orós (1961) e Banabuiú (1966) recém construídos, o que elevou a capacidade de acumulação a 1,4 hm³/1000 hab no fim da década de 1960, aportes hídricos significativos só ocorreram em 1964 (Orós) e 1974 (Orós e Banabuiú). Portanto, esses reservatórios foram efetivos para o abastecimento hídrico somente a partir de anos com elevada pluviometria, ou seja, algum tempo após sua implantação.

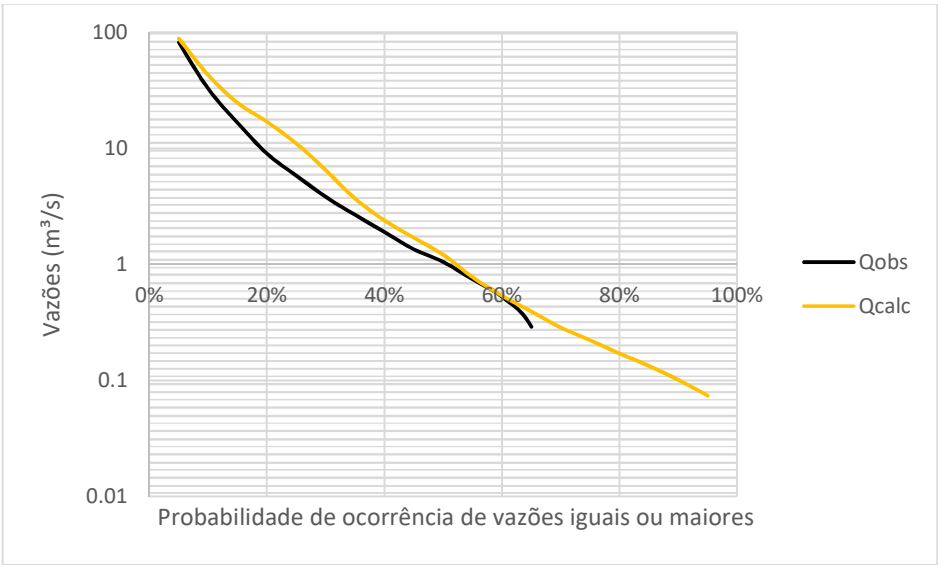
As Figuras 32 e 33 apresentam graficamente o período de calibração e a curva de permanência para a modelagem da sub-bacia de Chorozinho.

Figura 32 - Vazão média no período de calibração por dia do ano na Estação 35880000 – Chorozinho (Rio Choró).



Fonte: Autora (2023).

Figura 33 - Curva de Permanência para a sub-bacia de Chorozinho.



Fonte: Autora (2023).

4.1.3 Estação 36160000 – Iguatu

Para esta sub-bacia foram simulados dados correspondentes a 49 anos de observações (1973 a 2021) com dados de 204 estações pluviométricas, porém, com erros na simulação no ano 2001. Segundo Virões (2018), para o período entre 2001 e 2009 as vazões calculadas por técnicos da ANA no histórico do banco de dados Hidroweb chegam a apresentar desvios na ordem de 1.540,9% em relação à vazão observada e não há esclarecimentos quanto a possíveis modificações da curva-chave para cálculos posteriores, além de, em 2004, o histórico não apresentar vazões observadas nos meses de fevereiro a junho por falta de réguas linimétricas, o que influencia na modelagem.

Consta no Anuário de Monitoramento Quantitativo dos açudes controlados pela COGERH que houve um evento extremo de sangramento envolvendo o açude Trussu, localizado a montante da estação fluviométrica modelada, em 2004 (COGERH, 2009a, p. 107 e 108). Logo, o período interferiu negativamente nos resultados. Da mesma forma, a diminuição de postos de monitoramento na área apresentou influência negativa.

Para esta sub-bacia, Virões (2018) analisou a influência dos dados evaporimétricos no resultado da modelagem, avaliando essa sensibilidade através da comparação do uso dos dados do INMET a partir de suas normais climatológicas da estação de Iguatu, com dados da média de quatro estações climatológicas utilizadas no Projeto Atlas Nordeste da ANA em diferentes modelagens no MODHAC. O resultado dos coeficientes de correlação R e de determinação R^2 com utilização dos dados do INMET foram melhores pois seus valores menores de evapotranspiração resultaram em maiores vazões calculadas.

O coeficiente NSE indicou uma performance satisfatória em 41,7% dos anos simulados. Já para o NSE_{SRQT} , esse número sobre para 58,3% e para o NSE_{LOG} a performance satisfatória alcança 70,8% das simulações (Apêndice B), sendo uma região onde houve sucesso na representação das vazões mais baixas. O coeficiente Pbias mostrou-se muito bom para o período de calibração e satisfatório para o período de verificação. O indicador RSR obteve performance avaliada como boa, ao passo que o coeficiente de determinação R^2 obteve valores acima de 0,5 em 66,7% dos eventos.

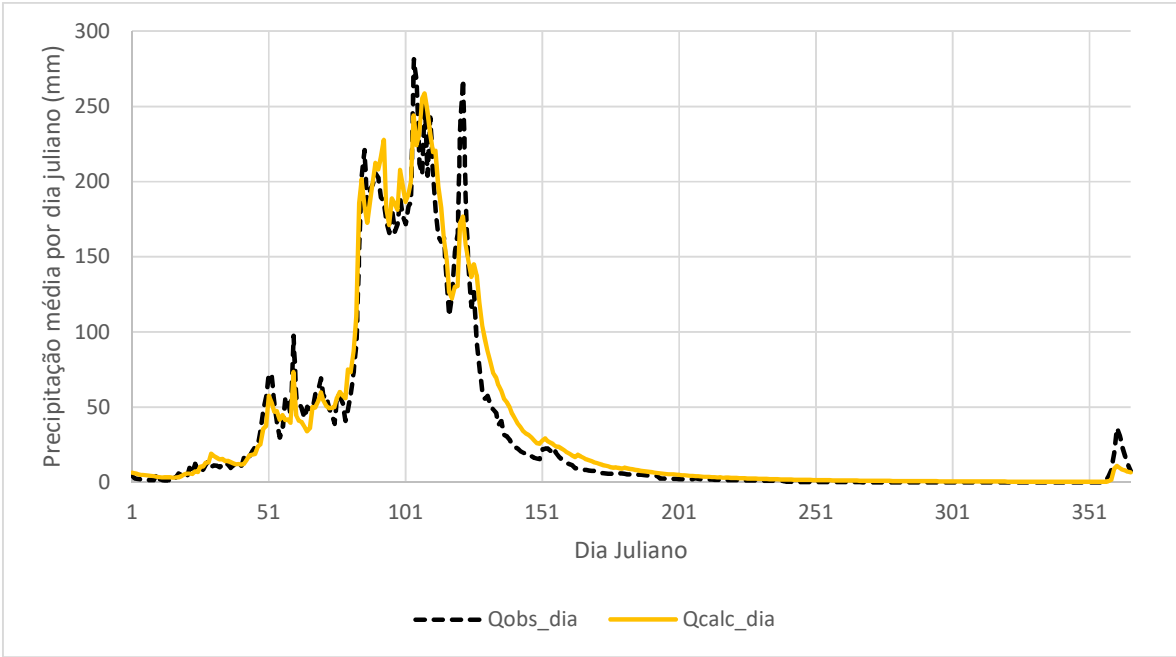
Na Tabela 9 estão os valores dos coeficientes estatísticos e as Figuras 34 e 35 demonstram os resultados do período de calibração através da comparação das vazões observadas e calculadas, onde se observa uma menor performance em relação aos picos das vazões, corroborada pela análise estatística, bem como a curva de permanência para a sub-bacia de Iguatu, onde se observa efeitos de regularização por reservatórios.

Tabela 9 - Coeficientes estatísticos obtidos na modelagem da estação 36160000 – Iguatu.

Indicadores de Eficiência do Modelo CAWM IV							
NSE	NSESQRT	NSELOG	Pbias	RMSE	MAE	RSR	R²
Calibração							
0,74	0,85	0,83	7,75	75,89	19,58	0,51	0,74
Verificação							
0,65	0,71	0,68	30,57	55,02	14,59	0,59	0,66
Global							
0,72	0,80	0,78	15,32	66,28	17,09	0,53	0,72

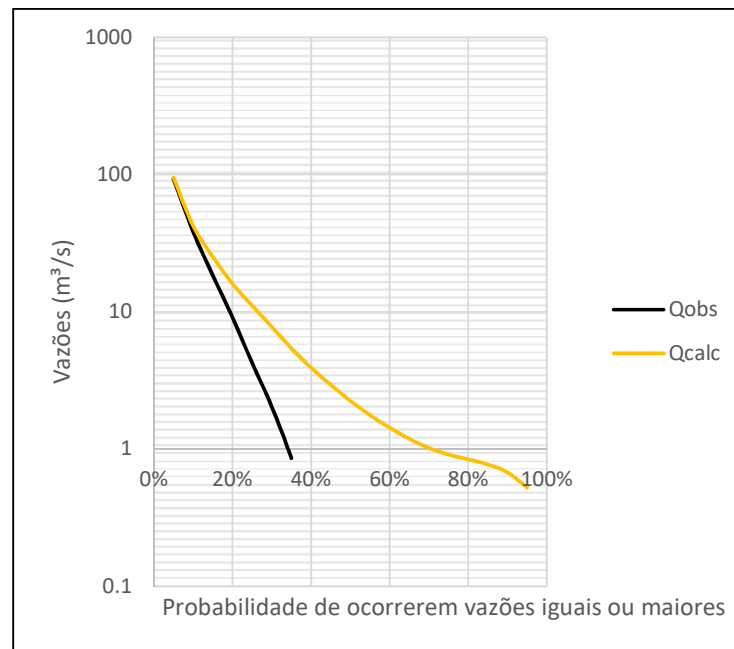
Fonte: Autora (2023).

Figura 34 - Vazão média no período de calibração por dia do ano na Estação 36160000 – Iguatu (Rio Jaguaribe).



Fonte: Autora (2023).

Figura 35 - Curva de Permanência para a sub-bacia de Iguatu.



Fonte: Autora (2023).

4.1.4 Estação 36290000 – Icó

Para esta sub-bacia foram simulados dados correspondentes a 49 anos de observações (1973 a 2021) através de dados de 135 estações pluviométricas. Segundo Virões (2018), o período de 1988 a 1993 apresentou valores de vazões nulos entre julho a dezembro, meses da estação seca, o que não corresponde às observações dos 20 anos anteriores. Entre os anos 1990 a 1996, período em que houve estiagem, ocorreram picos de escoamentos sem eventos de chuvas relacionados. Para o autor, uma possível explicação seria a confluência do riacho São João com o rio Salgado a montante da estação fluviométrica modelada. Nesse afluente, encontra-se o açude Lima Campos, com capacidade de 66,38 hm³, o qual pode ter liberado volumes de água sazonalmente com objetivos de regularização, diminuindo a eficiência da modelagem.

De acordo com o Anuário de Monitoramento Quantitativo dos açudes controlados pela COGERH, esse reservatório passou por eventos extremos nos anos de 1977, 1978, 1981, 1982, 1986 a 1989, 1996, 1997, 1999, 2000, 2004, 2008 e 2009. Conforme as

informações pluviométricas e fluviométricas para o período, corresponde a um evento de seca, podendo ter sido acionada a necessidade de abertura de comportas para regularização. Além do Açude Lima Campos, localiza-se o Açude Atalho, cuja capacidade volumétrica é de 108,2 hm³ e que registrou eventos extremos para os anos de 2004 e 2008 (COGERGa, 2009, p. 108).

O coeficiente NSE indicou uma performance satisfatória em 59,2% dos anos simulados. Já para o NSE_{SQRT} esse número sobre para 65,3% e para o NSE_{LOG} diminui para 46,9%, sendo o indicador de Nash que apresentou resultados mais baixos, porém, ainda satisfatórios. O coeficiente Pbias mostrou-se insatisfatório no período de verificação, enquanto o coeficiente de determinação R² obteve valores muito bons em cerca de 93,9% das simulações.

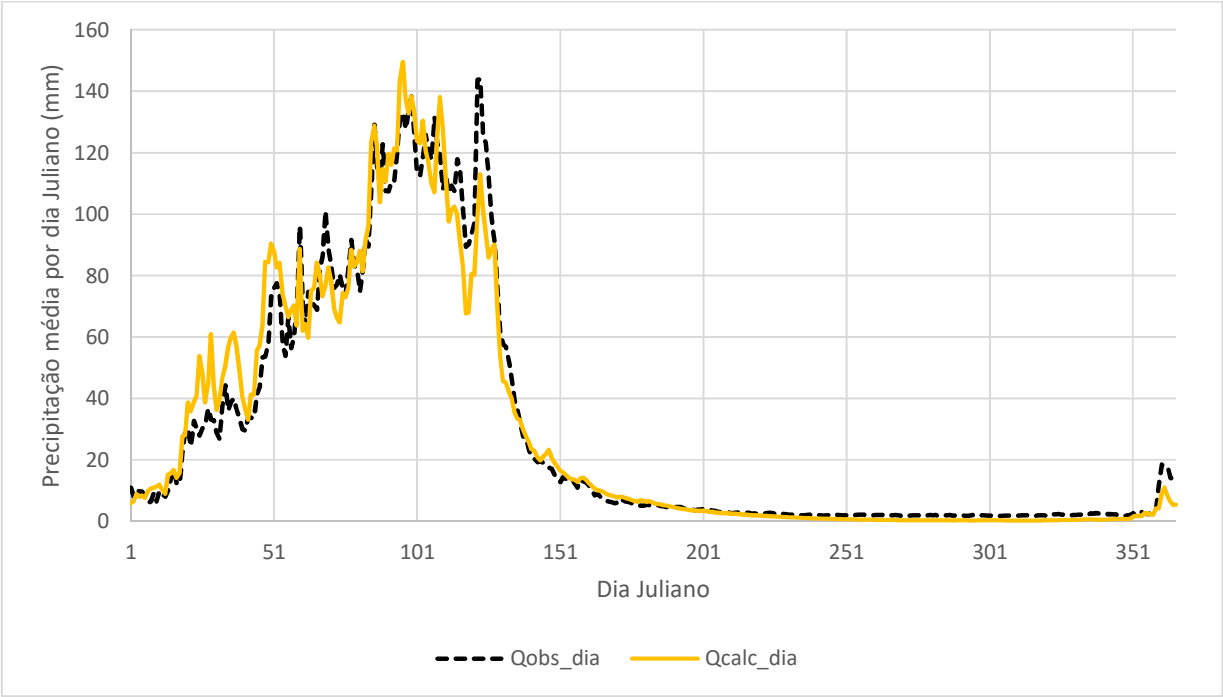
A Tabela 10 informa os valores dos coeficientes estatísticos e as Figuras 36 e 37 correspondem à simulação de longo período e a curva de permanência para a sub-bacia de Icó.

Tabela 10 - Coeficientes estatísticos obtidos na modelagem da estação 36290000 – Icó.

Indicadores de Eficiência do Modelo CAWM IV							
NSE	NSE_{SQRT}	NSE_{LOG}	Pbias	RMSE	MAE	RSR	R²
Calibração							
0,76	0,83	0,60	-0,16	44,33	15,73	0,49	0,76
Verificação							
0,75	0,71	0,53	39,00	36,38	14,51	0,50	0,77
Global							
0,76	0,80	0,78	8,40	42,10	15,37	0,49	0,76

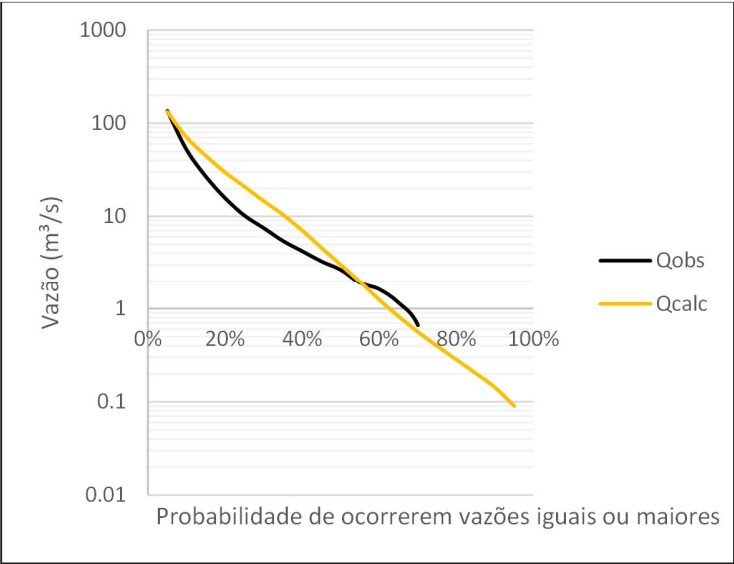
Fonte: Autora (2023).

Figura 36 - Vazão média no período de calibração por dia do ano na Estação 36290000 – Icó (Rio Salgado).



Fonte: Autora (2023).

Figura 37 - Curva de Permanência para sub-bacia de Icó.



Fonte: Autora (2023).

4.1.5 Estação 36320000 – Jaguaribe

A estação fluviométrica utilizada para a modelagem da sub-bacia Jaguaribe localiza-se entre dois reservatórios de macro porte: açude Orós, um dos mais antigos do estado e com capacidade volumétrica de 1.940 hm^3 , e o Castanhão, com capacidade de 6.700 hm^3 , sendo o maior reservatório do país. Esta é a sub-bacia de maior área, com $39.630,91 \text{ km}^2$, abrangendo as áreas das bacias hidrográficas do Alto Jaguaribe e Salgado, além de uma porção da área da bacia do Médio Jaguaribe.

Por conta da presença desses grandes reservatórios, essa estação apresenta efeitos de regularização nos resultados das simulações, o que também foi observado por Feitoza (2021). Na curva de permanência pode-se perceber esse efeito quando se compara as vazões medidas e calculadas. Os coeficientes estatísticos NSE, NSE_{SQRT} e R^2 foram todos de bons a muito bons. Já o NSE_{LOG} no período de calibração foi insuficiente, enquanto na verificação alcançou um valor que pode ser considerado aceitável, resultando em um balanço global aceitável. Valores de RSR foram bons, bem como os valores de R^2 . O período de simulação, incluindo calibração e validação, foi de 45 anos, entre 1977 e 2021 com dados de 372 estações pluviométricas da ANA para cálculo da chuva média. As vazões calculadas não acompanharam bem os picos de vazões observadas para a maioria dos eventos. Apesar disso a calibração demonstrou um bom comportamento.

Em sua pesquisa, Virões (2018) estudou os efeitos da regionalização utilizando os parâmetros das estações mais próximas, Iguatu e Icó, obtendo bons resultados em ambas as simulações. Contudo, o autor observa uma diminuição na qualidade dos ajustes em relação ao período de 2000 a 2007, ao que ele atribui a perda do monitoramento das chuvas na região, com desativação de postos para determinação da série pluviométrica média, caindo de 107 postos para apenas 44, além da influência das incertezas provenientes dos dados utilizados.

Conforme registros do Anuário de Monitoramento Quantitativo dos açudes controlados pela COGERH, o açude Orós sangrou nos anos 1978, 1980, 1981, de 1986 a 1990, 2004, 2008 e 2009, o que evidencia os altos volumes precipitados que resultaram

nesses vertimentos em um açude de macro porte. Não existem registros de permanência no volume morto (COGERH, 2009a).

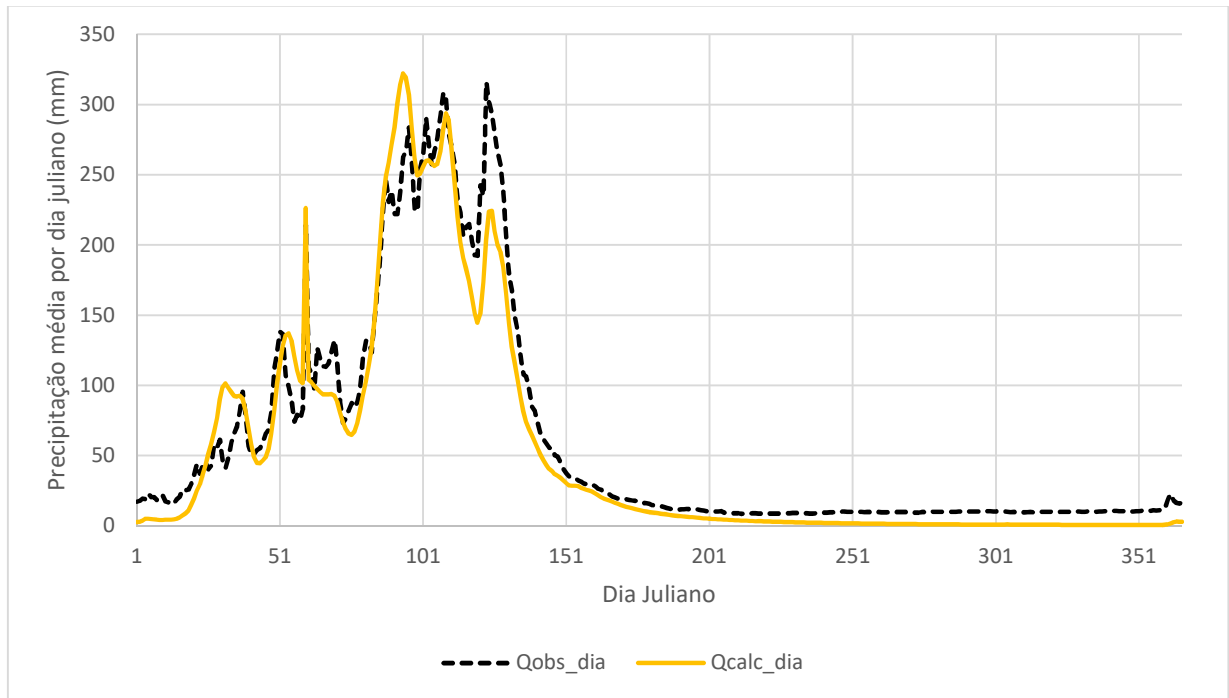
Na Tabela 11 estão os valores dos coeficientes estatísticos e nas Figuras 38 e 39 estão demonstrados graficamente os resultados do período de calibração através da comparação das vazões observadas e calculadas, onde se observa uma menor performance em relação aos picos das vazões, como na sub-bacia de Iguatu, bem como a curva de permanência, respectivamente.

Tabela 11 - Coeficientes estatísticos obtidos na modelagem da estação 36320000 – Jaguaribe.

Indicadores de Eficiência do Modelo CAWM IV							
NSE	NSE_{SQRT}	NSE_{LOG}	Pbias	RMSE	MAE	RSR	R²
Calibração							
0,71	0,76	0,07	-13,88	120,47	35,81	0,54	0,71
Verificação							
0,69	0,71	0,62	30,85	52,98	19,25	0,55	0,78
Global							
0,71	0,76	0,39	-6,87	104,89	30,85	0,54	0,71

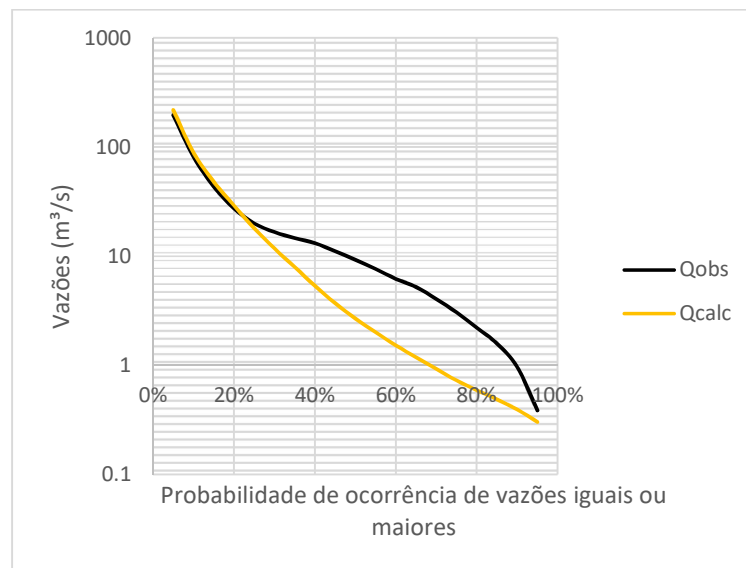
Fonte: Autora (2023).

Figura 38 - Vazão média no período de calibração por dia do ano na Estação 36320000 – Jaguaribe (Rio Jaguaribe).



Fonte: Autora (2023).

Figura 39 - Curva de Permanência para a sub-bacia Jaguaribe.



Fonte: Autora (2023).

4.1.6 Estação 36470000 – Senador Pompeu

Para essa sub-bacia, foram simulados dados correspondentes a 49 anos de observações (1973 a 2021) através de dados de 52 estações pluviométricas da ANA, sem obtenção de resultados satisfatórios para todos os indicadores. Segundo Virões (2018), entre os anos 1973 a 1999, os resultados estatísticos foram de bons a muito bons, porém, o período de 2000 a 2007 apresentou queda na qualidade da modelagem devido à perda de monitoramento de chuvas. Já Feitoza (2021) realizou a modelagem a partir de 1995 devido a constantes falhas nas vazões observadas.

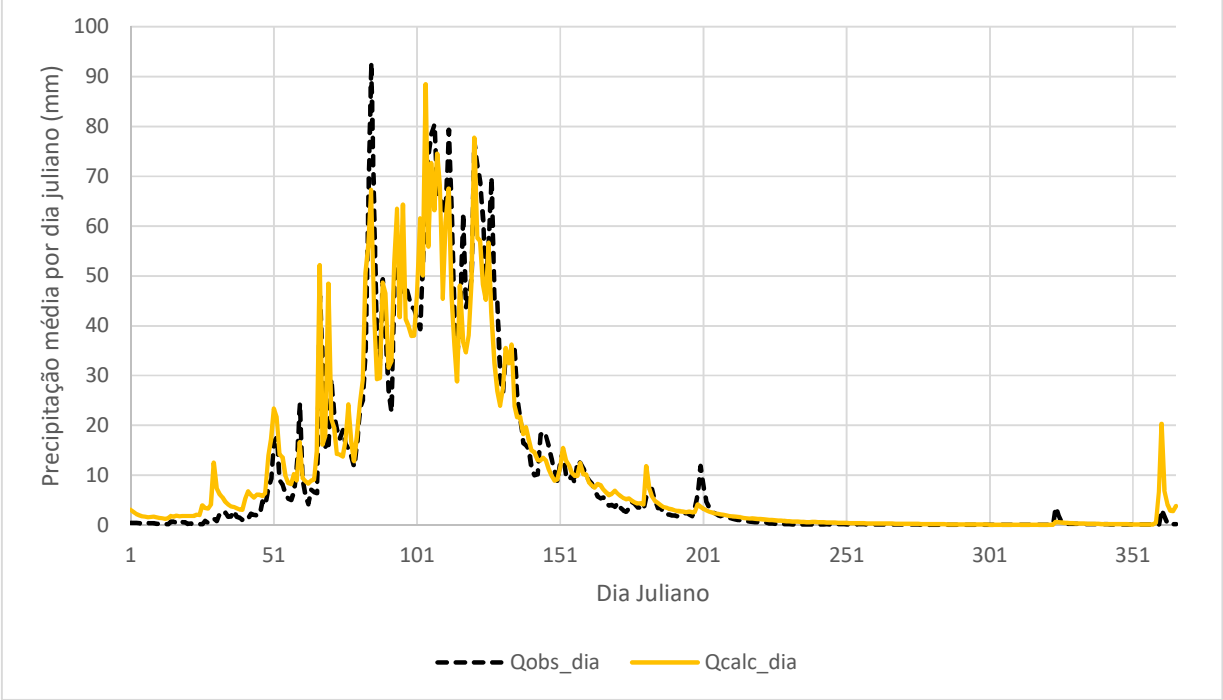
Para o período de calibração, os resultados da análise estatística mostram valores satisfatórios. Porém, os indicadores Pbias, RSR, NSE e NSE_{LOG} para o período de verificação foram insuficientes, além de uma queda no valor de R^2 , mesmo assim, o balanço global mostrou-se satisfatório, com exceção do indicador NSE_{LOG}. A Tabela 12 informa os valores dos coeficientes estatísticos obtidos, a Figura 46 apresenta o gráfico do período de calibração e a Figura 41 apresenta a curva de permanência do comportamento hidrológico da modelagem para a sub-bacia em análise. Pela Figura 40 observa-se um pico de vazão calculada sem relação com a vazão observada em 1974, ano marcado por elevadas precipitações. Na região não há presença de reservatórios de porte significativo a montante da área de drenagem, somente a jusante.

Tabela 12 - Coeficientes estatísticos obtidos na modelagem da Estação 36470000 – Senador Pompeu (Rio Banabuiú).

Indicadores de Eficiência do Modelo CAWM IV							
NSE	NSE _{SQRT}	NSE _{LOG}	Pbias	RMSE	MAE	RSR	R ²
Calibração							
0,68	0,82	0,23	1,63	26,97	6,78	0,55	0,69
Verificação							
0,15	0,45	-0,13	31,64	29,87	5,70	0,91	0,36
Global							
0,52	0,71	0,13	11,16	28,46	6,24	0,68	0,56

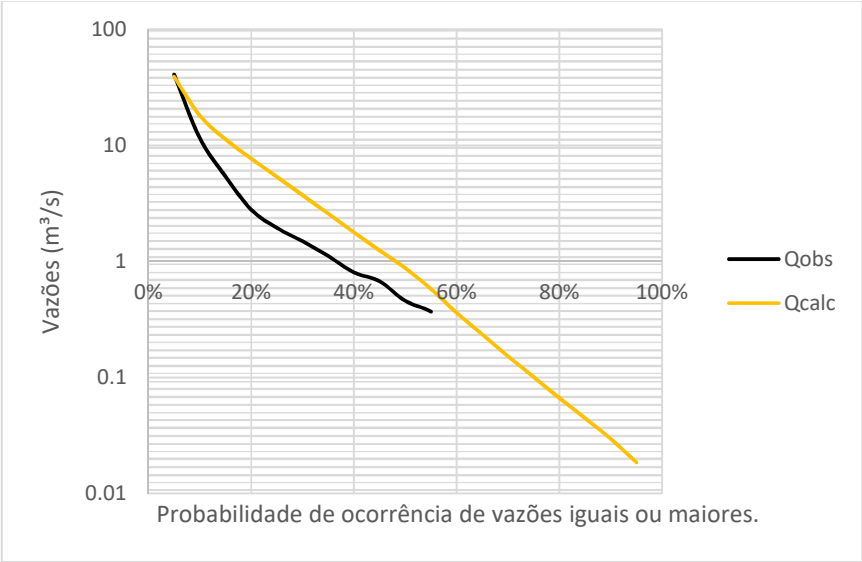
Fonte: Autora (2023).

Figura 40 - Vazão média no período de calibração por dia do ano na Estação 36470000 – Senador Pompeu (Rio Banabuiú).



Fonte: Autora (2023).

Figura 41 - Curva de Permanência para a sub-bacia de Senador Pompeu.



Fonte: Autora (2023).

4.1.7 Estação 36520000 – Quixeramobim

Os coeficientes estatísticos NSE, NSE_{SQRT} e R^2 foram todos de aceitáveis a bons. O período de simulação, incluindo calibração e validação, foi de 49 anos, entre 1973 e 2021, com dados de 79 estações pluviométricas da ANA para cálculo da chuva média. O Açude Fogareiro, com capacidade de 118,8 hm³ e inaugurado em 1996, está inserido na área de drenagem e possui registros de vertimentos nos anos 1996, 1997, 2002 a 2004, 2008 e 2009 (COGERH, 2009a). As vazões calculadas não acompanharam bem os picos de vazões observadas para a maioria dos eventos. Apesar disso a calibração demonstrou um bom comportamento. Em 1974 houve, assim como na sub-bacia de Senador Pompeu, um pico de vazão observada sem correspondência na modelagem.

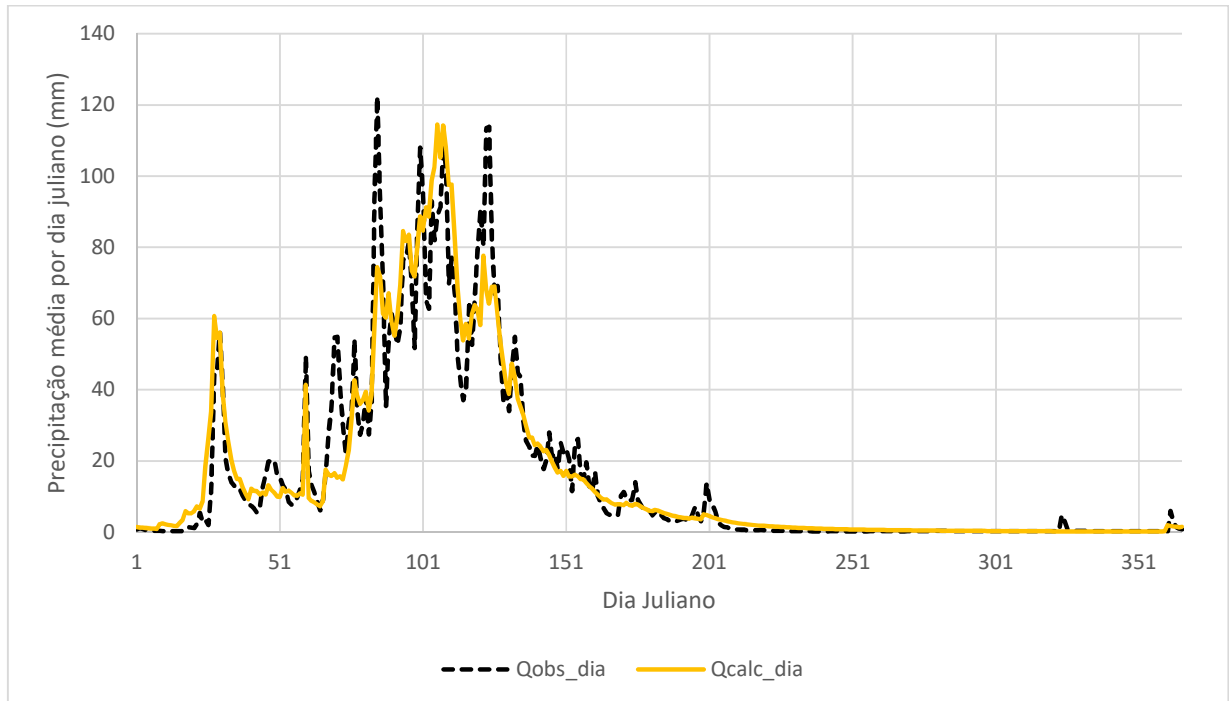
A simulação apresentou erros em diversos anos até 2004 (Apêndice B), mesmo com correção de falhas nos dados de vazão. Na Tabela 13 estão os valores dos coeficientes estatísticos e nas Figuras 42 e 43 estão demonstrados graficamente os resultados do período de calibração através da comparação das vazões observadas e calculadas, onde se observa uma menor performance em relação aos picos das vazões, como na sub-bacia de Iguatu, bem como a curva de permanência, respectivamente.

Tabela 13 - Coeficientes estatísticos obtidos na modelagem da Estação 36520000 – Quixeramobim (Rio Quixeramobim).

Indicadores de Eficiência do Modelo CAWM IV							
NSE	NSE_{SQRT}	NSE_{LOG}	Pbias	RMSE	MAE	RSR	R^2
Calibração							
0,62	0,81	0,64	0,43	50,54	10,92	0,62	0,62
Verificação							
0,59	0,56	0,40	29,38	29,23	5,38	0,64	0,60
Global							
0,62	0,77	0,60	7,59	47,55	8,96	0,62	0,62

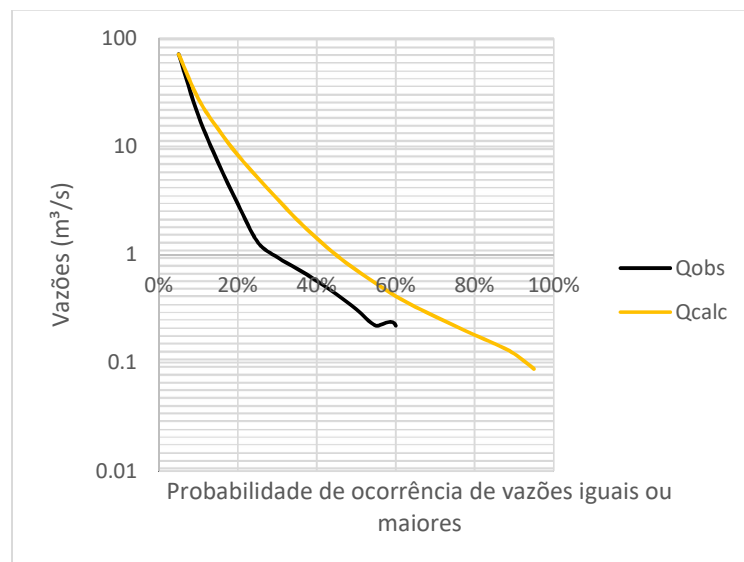
Fonte: Autora (2023).

Figura 42 - Vazão média no período de calibração por dia do ano na Estação 36520000 – Quixeramobim (Rio Quixeramobim).



Fonte: Autora (2023).

Figura 43 - Curva de Permanência para a sub-bacia de Quixeramobim.



Fonte: Autora (2023).

4.1.8 Estação 36580000 – Morada Nova

Para esta estação, a qual incorpora as áreas das duas sub-bacias anteriores (Senador Pompeu e Quixeramobim), foram utilizados 177 postos pluviométricos para o cálculo da chuva média. A simulação foi realizada para um período de 48 anos, de 1973 a 2021, com exceção do ano 2016 (Apêndice B). É uma área que sofre influência de cinco açudes de macro e grande porte (COGERH, 2009a):

- Açude Fogareiro: inaugurado em 1996 e que, como mencionado no subitem anterior, possui capacidade de 118,8 hm³. Há registros de vertimentos nos anos 1996, 1997, 2002 a 2004, 2008 e 2009;

- Açude Cedro: que apresenta capacidade de 126 hm³. Há registros de permanência no volume morto em 1983 e 1998 a 2002. Eventos de vertimentos ocorreram em 1986 e 1989. Foi inaugurado em 1906;

- Açude Pedras Brancas: inaugurado em 1978, possui capacidade de 434 hm³. Apresentou eventos de sangramento nos anos 1985, 1986 e 1989;

- Açude Banabuiú: de macro porte, inaugurado em 1966 possuindo capacidade de 1.601 hm³. Segundo o Anuário de Monitoramento Quantitativo dos açudes controlados pela COGERH, quando este reservatório sangrou nos anos de 1986, 1988 e 1989, ele não dispunha da comporta existente atual, que elevou a cota de sangria;

- Açude Cipoada: inaugurado em 1992 com capacidade de 86 hm³. Há registros de permanência no volume morto em 1995, 1998, 2000 e 2001. Eventos de sangramento registrados apenas em 2009.

A simulação apresenta picos de vazão calculada nos anos 1984 e 2004, o que pode estar relacionado a eventos de cheias na bacia hidrográfica do Médio Jaguaribe e amortecimento pelos reservatórios presentes na área.

Para o período de calibração, os resultados da análise estatística mostram valores entre satisfatórios (RSR) e bons (NSE e NSE_{SQRT}), com valor negativo para NSE_{LOG}. Porém, os indicadores RSR, R², NSE e variantes para o período de verificação foram insuficientes, além de uma queda no valor de R², semelhante ao comportamento da sub-bacia Senador Pompeu. Segundo Virões (2018), houve uma redução de 56 estações pluviométricas para 21 a partir dos anos 2000, o que pode ter ligação com a

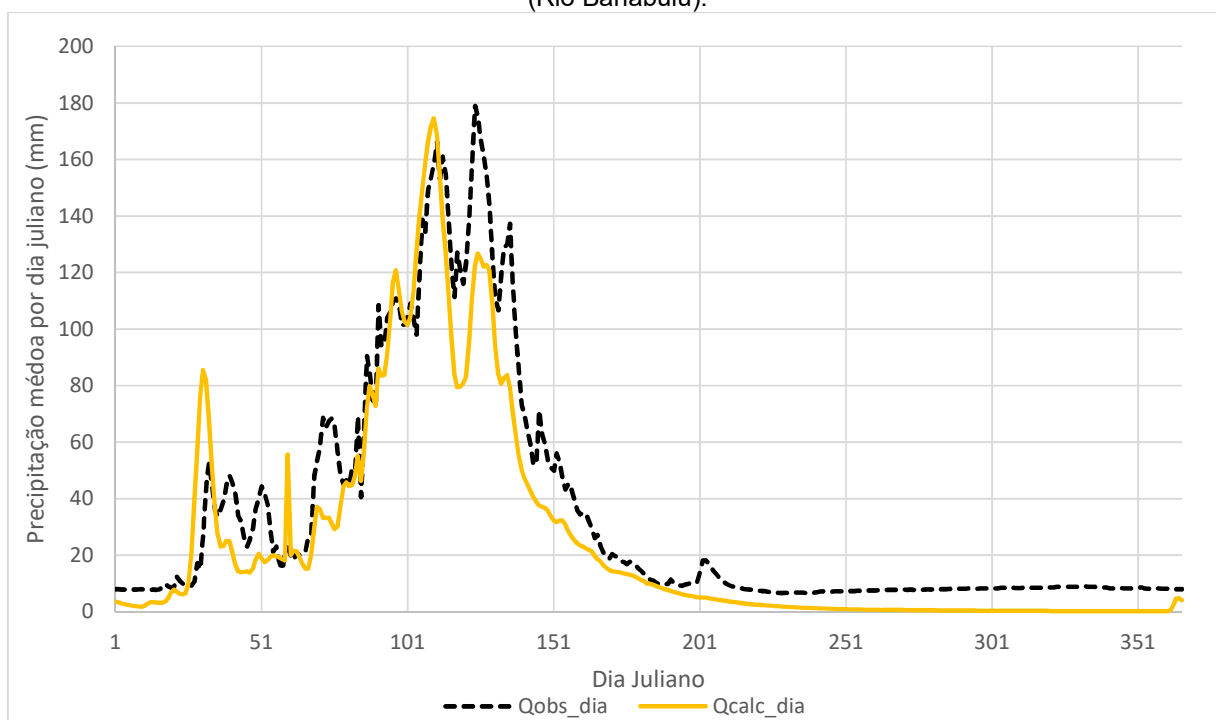
perda da qualidade da modelagem. A Tabela 14 informa os valores dos coeficientes estatísticos obtidos. Na Figura 44 encontra-se o gráfico do período de calibração e a Figura 45 apresenta a curva de permanência, evidenciando o não ajustamento entre as vazões mais baixas medidas e calculadas, já indicado pelos valores negativos de NSE_{LOG} .

Tabela 14 - Coeficientes estatísticos obtidos na modelagem da Estação 36580000 – Morada Nova (Rio Banabuiú).

Indicadores de Eficiência do Modelo CAWM IV							
NSE	NSE _{SQRT}	NSE _{LOG}	Pbias	RMSE	MAE	RSR	R ²
Calibração							
0,61	0,60	-1,54	-25,92	80,23	23,49	0,63	0,61
Verificação							
0,37	0,23	-1,53	14,75	51,24	12,41	0,79	0,42
Global							
0,59	0,58	-1,12	-21,22	72,76	20,17	0,64	0,59

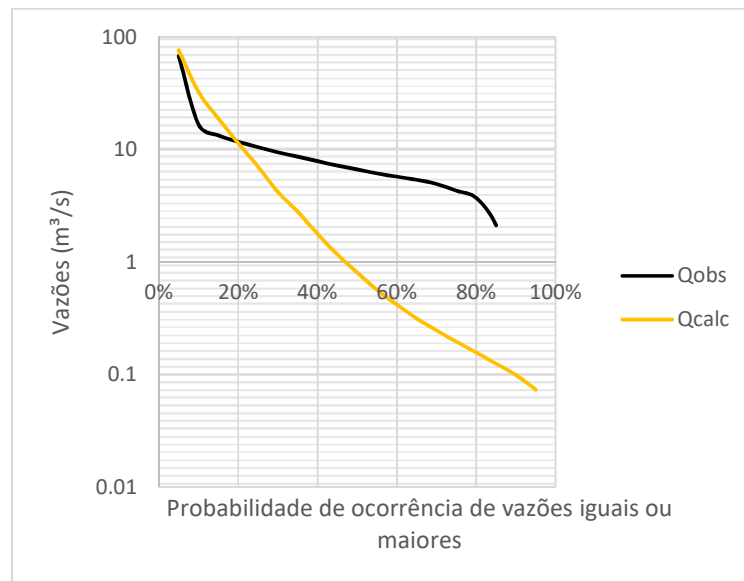
Fonte: Autora (2023).

Figura 44 - Vazão média no período de calibração por dia do ano na Estação 36580000 – Morada Nova (Rio Banabuiú).



Fonte: Autora (2023).

Figura 45 - Curva de Permanência para a sub-bacia de Morada Nova.



Fonte: Autora (2023).

Como já mencionado, foram realizados aprimoramentos na base de cálculo do modelo hidrológico CAWM em relação ao parâmetro K_L , bem como tentativas de se relacionar K com a área da bacia, a fim de evitar distorções geradas pelo arquivo MDT utilizado para obtenção dos dados físicos necessários para a modelagem. Uma nova simulação foi realizada para a sub-bacia de Morada Nova, de modo a comparar os resultados após as modificações, o que pode ser observado na Tabela 15.

Tabela 15 - Comparação dos resultados da modelagem hidrológica para a sub-bacia de Morada Nova antes e depois dos aprimoramentos realizados no CAWM IV.

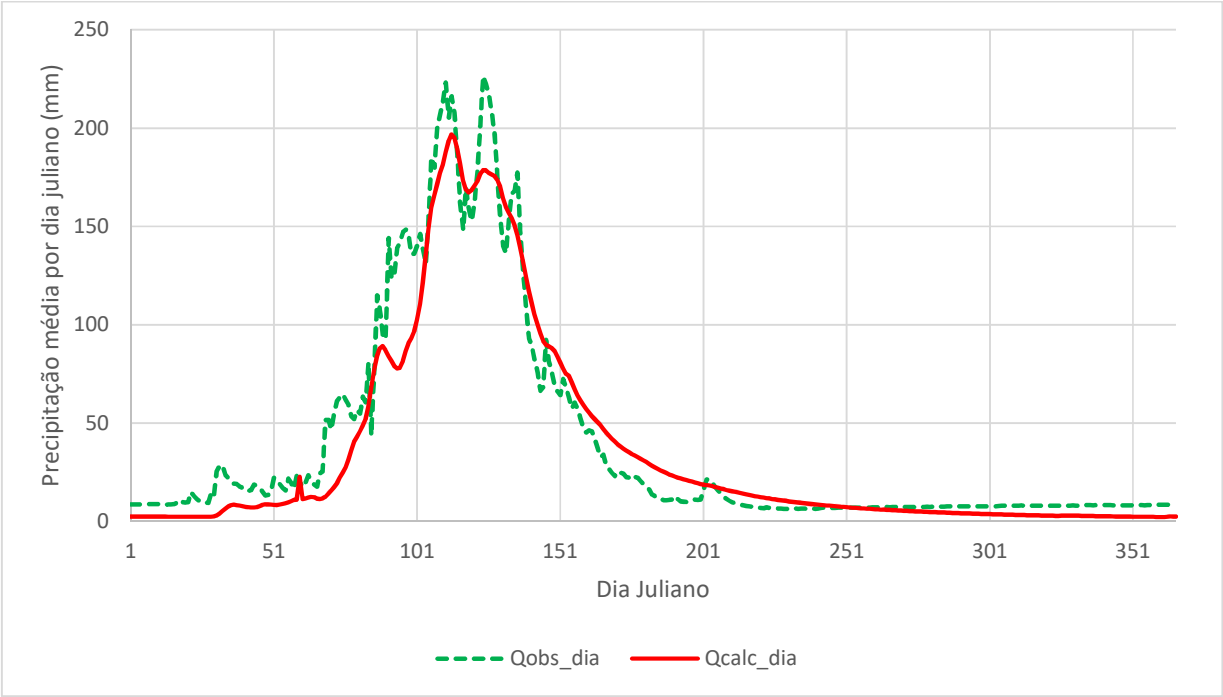
Indicadores de Eficiência do Modelo CAWM IV								
	NSE	NSE_{SQRT}	NSE_{LOG}	Pbias	RMSE	MAE	RSR	R²
Calibração								
2ª Simulação	0,64	0,66	0,28	-11,05	85,36	26,40	0,60	0,64
1ª Simulação	0,54	0,58	-0,91	-16,63	97,08	30,11	0,68	0,54
Verificação								
2ª Simulação	0,71	0,44	-1,06	-0,97	36,32	10,93	0,54	0,71
1ª Simulação	0,49	0,49	-1,06	-8,39	80,41	23,01	0,72	0,50
Global								
2ª Simulação	0,66	0,63	0,21	-8,71	65,59	18,66	0,58	0,66
1ª Simulação	0,59	0,58	-1,12	-21,22	72,76	20,17	0,64	0,59

Fonte: Autora (2023).

Observa-se um incremento considerável nos resultados da modelagem em todos os coeficientes estatísticos utilizados para avaliação global, com exceção do NSE_{LOG} no período de verificação. Destaca-se os coeficientes Nash e o coeficiente de determinação R², demonstrando que as mudanças são promissoras para tornar a modelagem com o CAWM IV ainda mais robusta e eficiente.

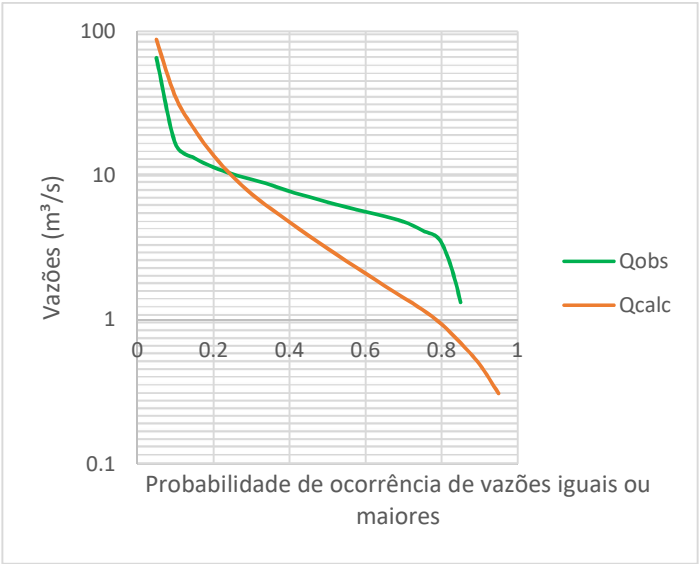
As Figuras 46 e 47 apresentam o gráfico do período de calibração por dia do ano e a curva de permanência, respectivamente, evidenciando uma maior aproximação entre os valores de vazão observados e calculados após as modificações realizadas no modelo CAWM em comparação com as Figura 44 e 45.

Figura 46 - Vazão média no período de calibração por dia do ano na Estação 36580000 – Morada Nova (Rio Banabuiú) para a 2ª simulação após mudanças no CAWM IV.



Fonte: Autora (2023).

Figura 47 - Curva de Permanência para a sub-bacia de Morada Nova para a 2ª simulação com o CAWM IV.



Fonte: Autora (2023).

4.2 DIFICULDADES ENCONTRADAS NA MODELAGEM HIDROLÓGICA

A priori, o modelo hidrológico CAWM surgiu da necessidade de regionalização de parâmetros para regiões semiáridas, passando por adaptações para abranger outras regiões, úmidas e subúmidas, o que foi consolidado em sua versão V. Já foi aplicado para mais de 100 bacias hidrográficas de diferentes perfis climáticos com resultados satisfatórios.

Por ser um modelo alimentado com dados físicos da área da bacia, possui limitações no tocante à obtenção desses dados, feita através de *softwares* de geoprocessamento, como Qgis, Arcgis e, mais recentemente, *Google Earth Engine* (GEE). A qualidade dos arquivos obtidos interfere nos resultados do geoprocessamento, os quais por sua vez, interferem nos resultados dos cálculos no CAWM IV.

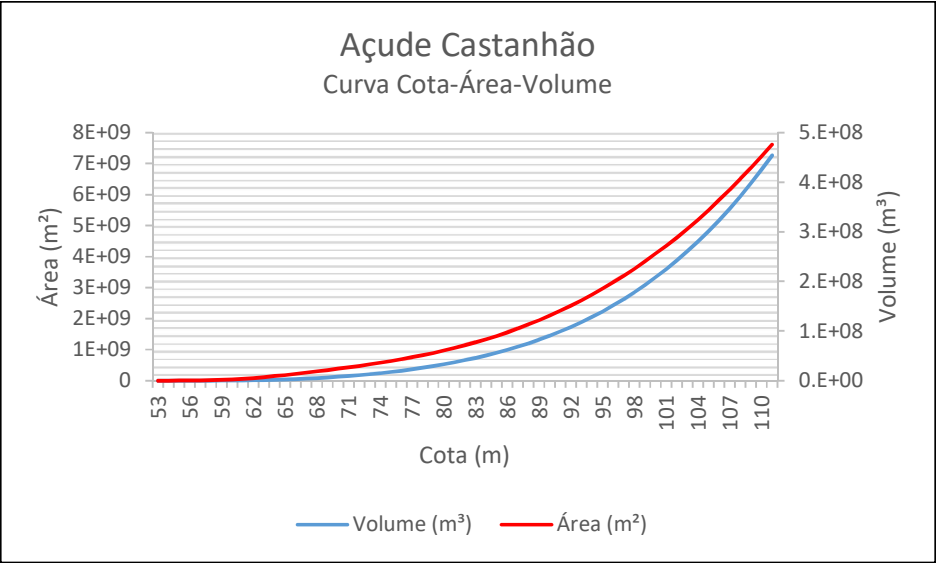
Outra dificuldade que pode ser considerada é a inserção dos dados de inicialização do modelo, como a reserva inicial de água no solo, no reservatório profundo e nas calhas dos rios. Essas variáveis são inferidas a partir de observações como: período correspondente ao início da simulação, se chuvoso ou seco; se os rios estão cheios (caso seja uma bacia caracterizada por rios intermitentes); tipo de solo, hidrolitologia e valor de taxa de infiltração, onde se infere se há ou não possibilidade de percolação profunda.

A grande vantagem é que ele atualmente possui apenas um parâmetro a calibrar para regiões áridas e semiáridas, em vez dos 14 exigidos pelo MODHAC, o que facilita a transferência dos dados para regionalização da modelagem.

4.3 CÁLCULO DA SINERGIA HÍDRICA

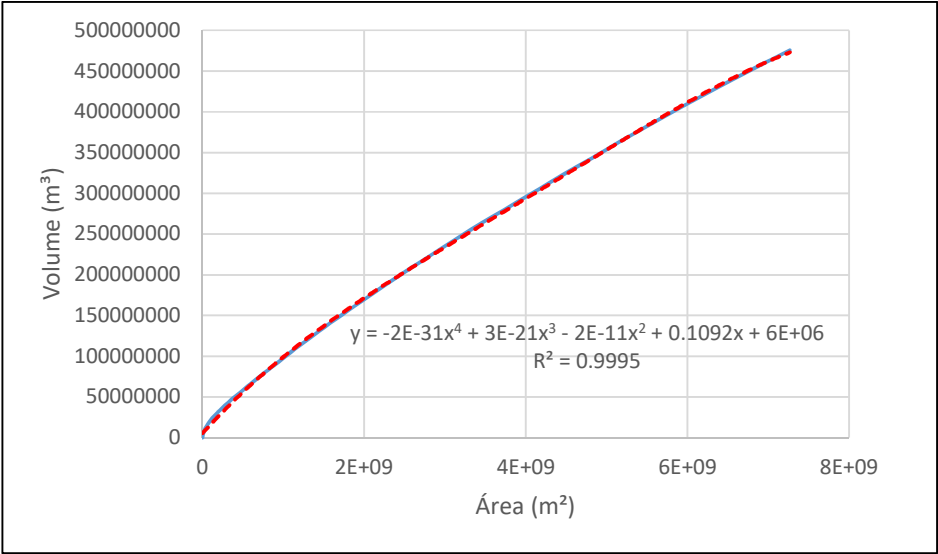
Após obtidas os dados de áreas, cotas e volumes, foi confeccionada a curva cota-área-volume do açude Castanhão, constante na Figura 48, observando que a capacidade de 4.451,6 hm³ corresponde à cota da soleira. As curvas, juntamente às linhas de tendência e às equações polinomiais, constam nas Figuras 49, 50 e 51. A Tabela 16 refere-se às informações técnicas utilizadas nas simulações.

Figura 48 - Curva Cota-Área-Volume do reservatório Castanhão.



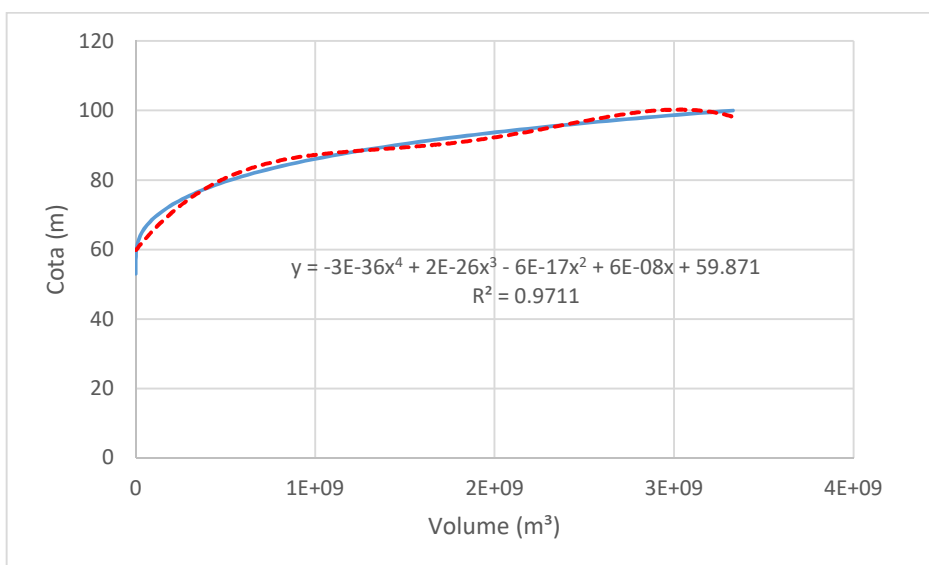
Fonte: Autora (2023).

Figura 49 - Curva Volume-Área do açude Castanhão.



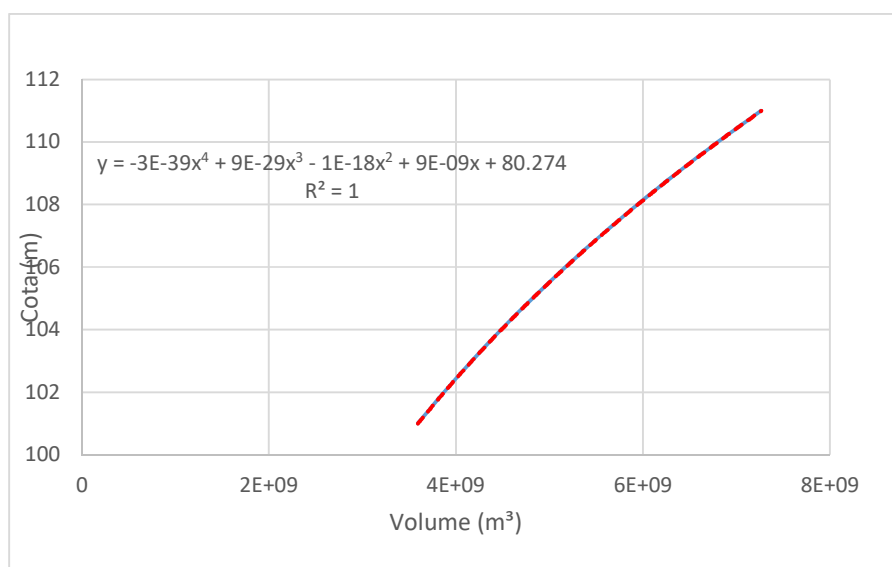
Fonte: Autora (2023).

Figura 50 - Curva Volume-Cota do açude Castanhão até o volume de 3.328,49 hm³.



Fonte: Autora (2023).

Figura 51 - Curva Volume-Cota a partir do volume de 3.328,49 hm³.



Fonte: Autora (2023).

Tabela 16 - Informações utilizadas a respeito do reservatório Castanhão e valores das vazões incrementais após as simulações com o modelo CAROS.

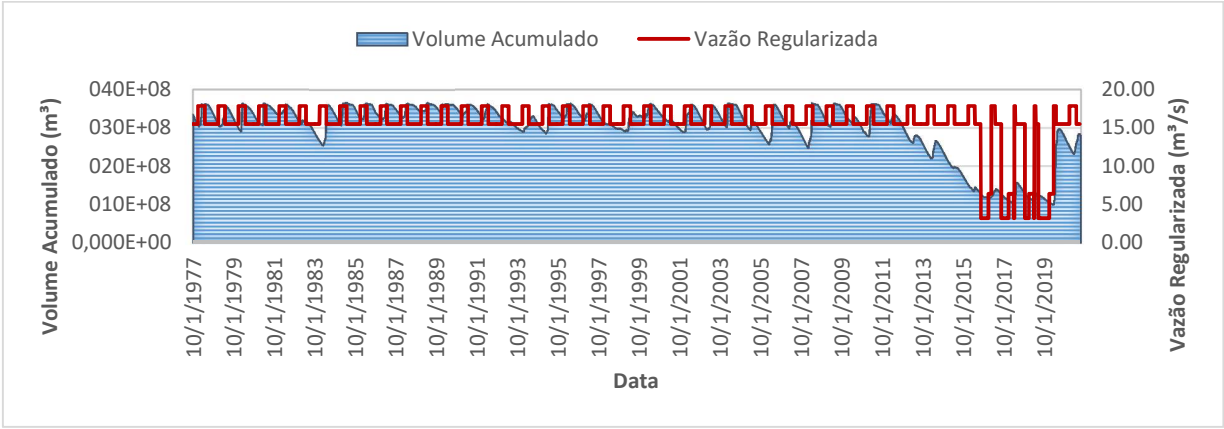
Reservatório	Capacidade (hm ³)*	Cota do Coroamento (m)*	Cota da Soleira (m)*	Extensão do Vertedouro (m)*	Área da bacia não controlada (km ²)	Vazão Média Anual (m ³ /s)	Vazão Regularizada Média (m ³ /s) – 1ª Simulação	Vazão Regularizada Média (m ³ /s) – 2ª Simulação	Percentual de Acumulação Inicial	Coefficiente de escoamento
Castanhão	6.700	111	106	3.450	44.951,40	15,6	43,05	43,02	0,5	2,2

Fonte dos dados: ANA (2022).

A Figura 52 caracteriza a simulação de retirada variável do reservatório Castanhão antes do aporte das águas do São Francisco, enquanto na Tabela 17 estão as informações sobre a vazão média regularizável e valores da razão entre os volumes máximo e mínimo correspondentes a cada curva-guia. Note-se a diminuição do volume acumulado entre os anos 2013 a 2019, quando o estado passou por uma seca prolongada e o reservatório atingiu volumes críticos. Já a primeira simulação, após a transposição, com os dados utilizados por Farias *et al.* (2005), pode ser visualizada na Figura 53, e na Tabela 18 as novas informações após o ganho sinérgico.

A segunda simulação com dados do Plano de Gestão Anual do PISF para 2022 elaborado pela ANA está representada na Figura 54, enquanto a Tabela 19 informa os valores de vazões regularizadas.

Figura 52 - Operação do reservatório Castanhão antes do aporte das águas do São Francisco.



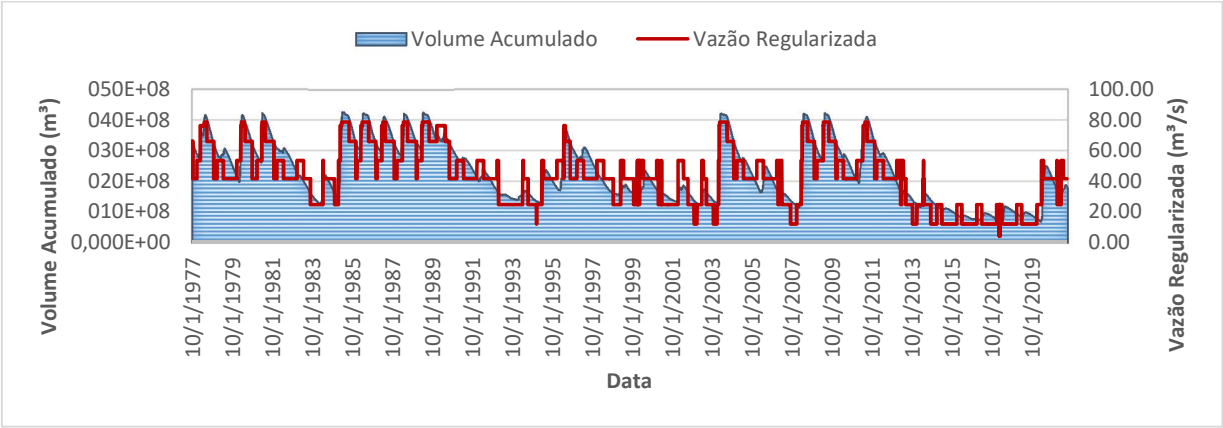
Fonte: Autora (2023).

Tabela 17 - Vazão média regularizada pelo Castanhão antes da transposição do São Francisco.

Meses para cada ciclo			
Menor Restrição		Maior Restrição	
Zona 1	1 a 5	6 a 11	
Zona 2	1 a 4	5 a 11	
Zona 3	1 a 3	4 a 11	
Zona 4	-	-	
Vazão Regularizada Média	15,60	V1max/V1min	1,03
Quantidade de dias em colapso	0	V2max/V2min	3,18
Quantidade de dias em pré-colapso	0	V3max/V3min	3,00

Fonte: Autora (2023).

Figura 53 - Operação do reservatório Castanhão após o aporte das águas do São Francisco (1ª Simulação).



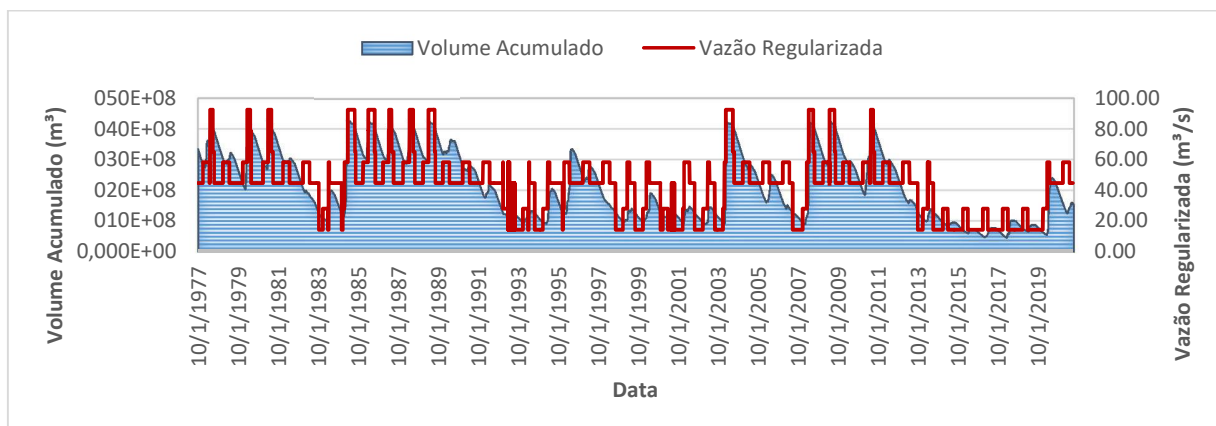
Fonte: Autora (2023).

Tabela 18 - Vazão média regularizada pelo Castanhão após a transposição do São Francisco (1ª Simulação).

Meses para cada ciclo			
Menor Restrição		Maior Restrição	
Zona 1	1 a 5	6 a 11	
Zona 2	1 a 4	5 a 11	
Zona 3	1 a 3	4 a 11	
Zona 4	-	-	
Vazão Regularizada Média	43,05	V1max/V1min	1,25
Quantidade de dias em colapso	0	V2max/V2min	2,00
Quantidade de dias em pré-colapso	5	V3max/V3min	2,00

Fonte: Autora (2023).

Figura 54 - Operação do reservatório Castanhão após o aporte das águas do São Francisco (2ª Simulação).



Fonte: Autora (2023).

Tabela 19. Vazão média regularizada pelo Castanhão após a transposição do São Francisco (2ª Simulação).

Meses para cada ciclo			
Menor Restrição		Maior Restrição	
Zona 1	1 a 5	6 a 11	
Zona 2	1 a 4	5 a 11	
Zona 3	1 a 3	4 a 11	
Zona 4	-	-	
Vazão Regularizada Média	43,02	V1max/V1min	1,03
Quantidade de dias em colapso	0	V2max/V2min	3,18
Quantidade de dias em pré-colapso	0	V3max/V3min	3,00

A análise sinérgica da primeira simulação realizada com vazões incrementais na ordem de $4,80 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ mostra que as vazões regularizadas com e sem a transposição do rio São Francisco foi de $43,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e $15,60 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente. Contudo, houve um aumento na média dos vertimentos e no volume evaporado de $0,15 \text{ hm}^3$ e $0,13 \text{ hm}^3$, nessa ordem, compensados pelo ganho na média de volume acumulado de $706,93 \text{ hm}^3$, o que pode ser observado na Tabela 20. Houve, igualmente, dias em que o reservatório encontrou-se em pré-colapso.

Para a segunda simulação, com vazões incrementais de $12,00 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ entre os meses de janeiro a julho e de $1,00 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no restante do ano, a vazão média regularizada com as águas transpostas foi de $43,02 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Houve aumento do volume acumulado e diminuição dos vertimentos e do volume evaporado provocando uma sinergia hídrica de $850,27 \text{ hm}^3$ na média dos anos simulados, sem ocorrência de períodos em pré-colapso.

Tabela 20 - Volumes vertidos, evaporados e acumulados (hm^3) para o cálculo da Sinergia Hídrica após simulações com o modelo CAROS.

$\Delta\text{vert} (\text{m}^3)$	$\Delta\text{evap} (\text{hm}^3)$	$\Delta\text{acum} (\text{hm}^3)$	Sinergia Hídrica (hm^3)
1ª Simulação			
-0,1518	-0,1251	706,9362	706,6593
2ª Simulação			
0,2628	0,2644	849,7386	850,2659

Fonte: Autora (2023).

Tal análise dialoga com o fato de que a transposição de bacias e a oferta extra de volumes de água, quando necessário, pode gerar um melhor aproveitamento das afluições naturais, com redução de água evaporada ou vertida pelos reservatórios. Porém, não necessariamente um maior aporte contínuo de água gera uma maior sinergia hídrica, sendo importante a análise da operação dos reservatórios ou sistemas de reservatórios interligados. Nesse caso, uma menor adução – referente à 1ª simulação – resultou em uma vazão regularizada muito semelhante com a 2ª simulação, sendo que foram realizadas simulações com uma vazão anual contínua de $4,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e outra com vazões diferenciadas para determinados meses, com média de $7,42 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Porém, há que se observar as maiores perdas volumétricas em evaporações e vertimentos com relação à primeira simulação.

Ainda, deve-se frisar, como alerta Farias *et al.* (2005), que se deve considerar a variação de volumes acumulados no início e final da simulação, demonstrando um melhor aproveitamento das águas acumuladas. Nesse caso, os volumes acumulados iniciais antes e após a transposição são semelhantes (cerca de 3.345 hm^3) nas duas simulações, enquanto os volumes finais apresentaram diferença de $252,51 \text{ hm}^3$, demonstrando um

melhor aproveitamento das águas acumuladas na 2ª simulação, o que pode ser visualizada na Tabela 21.

Tabela 21 - Diferença entre os volumes acumulados no início e fim do período das simulações.

	1ª Simulação	2ª Simulação
V inicial (hm³)	V inicial (hm³)	V inicial (hm³)
3346,62	3342,75	3344,16
V final (hm³)	V final (hm³)	V final (hm³)
2792,18	1769,02	1516,51

Fonte: Autora (2023).

5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa visa contribuir com a constante busca por informações relacionadas à gestão de recursos hídricos no semiárido, um recurso vital e ao mesmo tempo escasso nessas regiões. Através da modelagem hidrológica e da modelagem de operação de reservatórios busca-se auxiliar adequações efetivas nos processos decisórios de alocação de água, como demonstrado pela robusta performance do modelo CAWM, versão IV, a qual serviu de base para a aquisição dos dados utilizados na análise de operação de reservatórios e sinergia hídrica proveniente da transposição das águas do rio São Francisco.

A constante desativação de postos de monitoramento hidrológico, a presença de barragens que interferem nas vazões naturais dos rios, a descontinuidade e a própria deficiência dos dados são fatores que influenciam na qualidade da modelagem, como observado principalmente em relação às baixas vazões e nos ajustes das curvas de permanência nos resultados amostrados das sub-bacias analisadas aqui. Com o advento de novas ferramentas de geoprocessamento, assim como através de novas adequações realizadas no CAWM, espera-se resultados ainda mais promissores, com poucos parâmetros a calibrar, o que é notável. Os resultados obtidos confirmam a aplicabilidade desse modelo hidrológico para as bacias áridas e semiáridas com poucos dados disponíveis.

Em relação à transposição de bacias, a análise do ganho sinérgico proveniente das águas exógenas à bacia receptora aponta que essa oferta ultrapassa o volume extra aduzido, gerando uma melhor performance na operação do reservatório, ou sistema de reservatórios, e um melhor aproveitamento das afluições naturais o que, somado a regras de operação que levem em consideração o volume de água acumulado, transforma volumes antes evaporados, vertidos ou simplesmente parados, em vazões regularizadas aptas a serem destinadas às crescentes demandas.

O conceito de sinergia hídrica, quando positiva, antes e após a transposição de águas de bacias doadoras se explica por esse melhor aproveitamento e redução de perdas. Deve-se frisar que a sinergia hídrica deve ser analisada separadamente em cada reservatório, e que ela se torna mais evidente quando se considera açudes de grande e

macro porte, como é o caso do Castanhão. Para isso, é necessário um modelo eficaz e eficiente de simulação, como o CAROS, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em recursos Hídricos da UFPE, que considera as variações de volumes acumulados, vertidos, evaporados e afluentes a passo temporal de 4 horas, abrangendo as variações intradiárias. Dessa forma, é possível analisar de forma integrada, espacial e temporalmente, um conjunto de reservatórios e as influências de seus vertimentos à jusante.

Como recomendação para a continuidade desta pesquisa, futuras contribuições podem advir do incremento dos cálculos de sinergia hídrica considerando todos os reservatórios de médio e grande porte localizados no caminho da transposição das águas do São Francisco para o estado do Ceará e Nordeste Setentrional, apontando quais reservatórios podem ter suas vazões captáveis incrementadas a ponto de serem mais direcionados ao atendimento de demandas locais e quais devem ter como principal objetivo o controle de cheias, sempre considerando de forma mais aprofundada o meio físico, cujos conhecimentos podem ser úteis para novas adequações nos modelos utilizados.

REFERÊNCIAS

AB'SABER, A.N. Os Domínios de Natureza no Brasil – potencialidades paisagísticas. São Paulo: **Ateliê Editorial**, 159p, 2003.

ALLASIA, D. G. Impacto das incertezas no custo de uma rede de macrodrenagem. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Parecer Técnico nº 1/2022/COMAR/SER**. Documento nº 02500.006136/2022-31. Referência: 02501.004397/2021-26. Plano de Gestão Anual – PGA do PISF 2022 - Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional – PISF, no que diz respeito às disposições atinentes à ANA, 2022.

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

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, n. 1, p. 43-69, 1979.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF 09/01/1997, P. 470. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm Acesso em 31 de agosto 2022.

CABRAL, S. L.; SAKURAGI, J.; SILVEIRA, C. S. Incertezas e erros na estimativa de vazões usando modelagem hidrológica e precipitação por RADAR. **Revista Ambiente & Água**, v. 12, n. 1, p. 57, 2017. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua>

CADIER, E.; LANNA, A. E; MENEZES, M; CATNPELLO, M. S. Avaliação dos estudos referentes aos recursos hídricos das pequenas bacias do Nordeste Brasileiro. Anais do VII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Salvador, **ABRH**. Vol. 2, p. 225-239. 1987.

CADIER, E. Hidrologia das pequenas bacias do Nordeste semi-árido: Transposição hidrológica. v. 31, n. **Hidrologia**, p. 447. 1994.

CAVALCANTE, A. A.; CUNHA, S. B. da. Caracterização do sistema fluvial do rio Jaguaribe no semiárido cearense. **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Campo Grande, MS, 2009.

CELESTE, A. B.; MENEZES, T. L. A.; FONTES, V. A. Modelagem do processo chuva-vazão pelo Tank Model e por redes neurais artificiais na bacia do rio Japarutuba ,

Sergipe. **Scientia Plena**, v. 10, p. 1–13, 2014.

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

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

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

CIRILO, J. A. MODELOS CAWM IV E V – MEMORIAL DESCRITIVO. [s.d.], 2021. Disponível em: <https://www.ufpe.br/grh>. Acesso em: 20 de setembro de 2022.

CIRILO, J. A. MODELOS CAWM IV E V – MEMORIAL DESCRITIVO. [s.d.], 2022. Disponível em: <https://www.ufpe.br/grh>. Acesso em: 20 de dezembro de 2022.

CIRILO, J. A. MODELO CAROS – MEMORIAL DESCRITIVO [s.d.], 2021. Disponível em: <https://www.ufpe.br/grh>. Acesso em: 30 de dezembro de 2022.

COGERG. Companhia de Gestão de Recursos Hídricos. **Anuário de Monitoramento dos Açudes Gerenciados pela Cogehr**. p. 1–63, 2009a.

COGERH. Companhia de Gestão de Recursos Hídricos. **Caderno Regional Da Bacia Metropolitana**. [S.l.]: [s.n.], vol.1, 2009b.

COGERH. Companhia de Gestão de Recursos Hídricos. **Ficha Técnica dos açudes**. 2018. Disponível em <https://portal.cogerh.com.br/ficha-tecnica-dos-acudes-158/> Acesso em: 10 set. 2022.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Atlas Pluviométrico do Brasil**. 2011. Escala 1:5.000.000. Arquivo Digital. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapase-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html> Acesso em: 01 set. 2022.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Síntese Hidrogeológica do Nordeste ao Milionésimo. 2015. Escala 1:1.000.000. 1 DVD. Disponível em <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Estudos-Hidrologicos-e-Hidrogeologicos/Mapa-Hidrogeologico-do-Brasil-ao-Milionesimo-756.html> Acesso em: 02 set. 2022.

DANTAS, M. E.; EDGAR, S.; BRANDÃO, R. DE L.; FREITAS, L. C. B.; TEIXEIRA, W. G. Ministério de Minas e Energia. Secretaria De Geologia, Mineração E Transformação

Mineral. Geodiversidade Do Estado Do Ceará. **Geodiversidade do Estado do Ceará**. p. 214, 2014.

DANTAS, P. S. Dimensionamento e Gestão de Reservatórios: Breve Discussão Acerca da Experiência do Estado do Ceará/Brasil. **Revista Verde Grande: Geografia e Interdisciplinaridade**, v. 2, n. 01, p. 25–36, 2020.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Rio de Janeiro, RJ. Súmula da 10ª Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 83p, 1979.

DIÁRIO DO NORDESTE. Estudo aponta nova nascente para o rio Jaguaribe, maior do Ceará. Caderno Regional, Fortaleza, 12 de dezembro de 2020. Disponível em <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/regiao/estudo-aponta-nova-nascente-para-o-rio-jaguaribe-maior-do-ceara-1.3021675> Acesso em: 06 set. 2022.

FARIAS, J. A. M.; JOCA, E. L. L.; ARAUJO, F. F. V.; MEDEIROS, P. H. A.; MOLINAS, P. A. *et al.* SINERGIA HÍDRICA EM SISTEMAS INTEGRADOS DE RESERVATÓRIOS: estudos de casos relacionados com a Transposição das Águas do rio São Francisco. **XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, n. XVI, 2005.

FEITOZA, M. A. B. Aplicação de modelo de simulação hidrológica com regionalização de parâmetros para regiões semiáridas. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2021.

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

GARDIMAN JUNIOR, B. S.; MAGALHÃES, I. A. L.; FREITAS, C. A. A. DE.; CECÍLIO, R. A. Análise de técnicas de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na bacia do rio Itapemirim (ES) / Analysis of interpolation techniques for spatial rainfall distribution in river basin Itapemirim (ES). **Revista Ambiência**, v. 8, n. 1, p. 61–71, 2021.

GOLMOHAMMADI, G.; PRASHER, S.; MADANI, A.; RUDRA, R. Evaluating three hydrological distributed watershed models: MIKE-SHE, APEX, SWAT. **Hydrology**, v. 1, n. 1, p. 20–39, 2014.

GOMES, M. M. DE A.; MELO VERÇOSA, L. F. DE; CIRILO, J. A. Hydrologic models coupled with 2D hydrodynamic model for high-resolution urban flood simulation. [S.l.]: **Springer Netherlands**. V. 108, 2021.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Portal Brasileiro de Dados Abertos. Projeto RADAMBRASIL - Vegetação 1:250.000, 1992. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/vegetacao/22453-cartas-1-250-000.html?edicao=22454&t=downloads> Acesso em: 30 ago. 2022.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Base cartográfica. Escala 1:250.000, 2019. Disponível em: <https://ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/bases-cartograficas-continuas/15759-brasil.html?=&t=acesso-ao-produto> Acesso em: 02 set. 2022.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Divisão Hidrográfica Nacional DHN250**. Documentação Técnica, Versão 2021.09.24. Diretoria de Geociências. Coordenação de Recursos Naturais e Meio Ambiente. Disponível em https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/estudos_ambientais/bacias_e_divisoes_hidrograficas_do_brasil/2021/Divisao_Hidrografica_Nacional_DHN250/vetores/Documentacao_Tecnica_DHN250.pdf Acesso em: 31 ago. 2022.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Introdução ao Geoprocessamento. 2020. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_geo.html Acesso em: 20 ago. 2022.

IPECE. INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. Bacias Hidrográficas. 2007. Disponível em: www.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12/129x.htm Acesso em: 05 set. 2022.

KNIGHT, D. Introduction to flooding and river basin modelling. River Basin Modeling for flood risk mitigation. Londres: **Taylor & Francis**, p. 1-20, ISBN: 0415383447, 2006.

KUCZERA, G.; RENARD, B.; THYER, M.; KAVETSKI, D. There are no hydrological monsters, just models and observations with large uncertainties. **Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques**, v. 55(6), p. 980-991, 2006.

LANNA, A. E. MODHAC: Modelo Hidrológico Auto-Calibrável. Porto Alegre: IPH/UFRGS, p. 55, 1997.

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

MACHADO, B.G.F. Análise econômica aplicada à decisão sobre alocação de água entre os usos irrigação e produção de energia elétrica: o caso da Bacia do rio Preto. 160f. Dissertação (Mestrado), Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2009.

MAIDMENT, D. R. GIS and Hydrologic Modeling - an Assessment of Progress. **Third International Conference on GIS and Environmental Modeling**. Santa Fe, New Mexico. p. 1–12, 1996.

MAMÉDIO, F.; CASTRO, N.; CORSEUIL, C. Tempo de concentração para Bacias Rurais Monitoradas na Região do Planalto Basáltico no Sul do Brasil. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 15, n. 1, p. 4–4, 2018.

MELLO, C. R. de; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M.; SILVA, M. S. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.5, p.925-933, 2003.

MICHEL, C.; PERRIN, C.; ANDRÉASSIAN, V. The exponential store: a correct formulation for rainfall-runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 48, n. 1, p. 109- 124, 2003.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885–900. 2007.

NUNES, L. F. C. V.; MEDEIROS, P. H. A. Análise histórica da severidade de secas no Ceará: efeitos da aquisição de capital hidráulico sobre a sociedade. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, 17 e 18, 2020. <https://doi.org/10.21168/reg.v17e18>

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

SANTOS, B. V. C. D. Dos; FONTES, A. S. Modelagem Hidrológica De Sistema Hídrico Complexo Do Semiárido Baiano. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 2, n. 1, p. 152, 2014.

SANTOS, M. C. Solos do semiárido do Brasil. **Caderno do Semiárido – Riquezas e Oportunidades**. CREA/PE, 2017.

SILVA, S. M. O. DA; SOUZA FILHO, F. De A.; AQUINO, S. H. S. Avaliação do risco da alocação de água em período de escassez hídrica: O caso do sistema Jaguaribe–Metropolitano. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 4, p. 749–760, 2017.

SOUSA, Á. S. A. de; TEIXEIRA, A. A. da R.; CIRILO, J. A.; VERÇOSA, L. F. de M.; FERRAZ, G. de F. Estrutura de base de dados físicos para regionalização de parâmetros de modelos hidrológicos - Parte II: aplicação à região da bacia do Rio Parnaíba. November, 2020.

TRAORE, V. B.; SAMBOU, S.; TAMBA, S.; FALL, S.; DIAW, A. T.; CISSE, M. T. Calibrating the Rainfall-Runoff Model GR4J and GR2M on the Koulountou River Basin, a Tributary of the Gambia River. **American Journal of Environmental Protection**, 3(1), 36-44, 2014. [http:// dx.doi.org/10.11648/j.ajep.20140301.15](http://dx.doi.org/10.11648/j.ajep.20140301.15).

TUCCI, C. E. M. Modelos hidrológicos. Ed. Universidade /UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 668p, 1998.

TUCCI, C.; COLLISCHONN, W. Simulação Hidrológica de grandes Bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 1, p. 95–118, 2001.

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

2005.

USACE-HEC Hydrologic Modeling System, HEC-HMS – Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, March 2000.

VERTESSY, R. A.; HATTON, T. J.; O'SHAUGHNESSY, P. J.; JAYASURIYA, M. D. A. Predicting water yield from a mountain ash forest catchment using a terrain analysis based catchment model. **Journal of Hydrology**, v. 150, n. 2–4, p. 665–700, 1993.

VIRÃES, M. V. Regionalização de parâmetros de modelo hidrológico para a Região Semiárida do Nordeste Brasileiro. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

VIRÃES, M. V.; CIRILO, J. A. Regionalization of hydrological model parameters for the semi-arid region of the northeast Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, 2019.

WATSON, D. F.; PHILIP, G. M. A Refinement of inverse distance weighted interpolation. **Geoprocessing**, v.2. p. 315-327, 1985.

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

APÊNDICE A – DEMONSTRAÇÃO DA MODELAGEM REALIZADA PELO MODELO CAWM IV E RESULTADOS OBTIDOS

CAWM_macros_Oros_3o_teste_melhor - Microsoft Excel

ARQUIVO PÁGINA INICIAL INSERIR LAYOUT DA PÁGINA FÓRMULAS DADOS REVISÃO EXIBIÇÃO DESENVOLVEDOR

Calibri 11 A A

Colar

Fonte

Alinhamento

Número

Estilo

Células

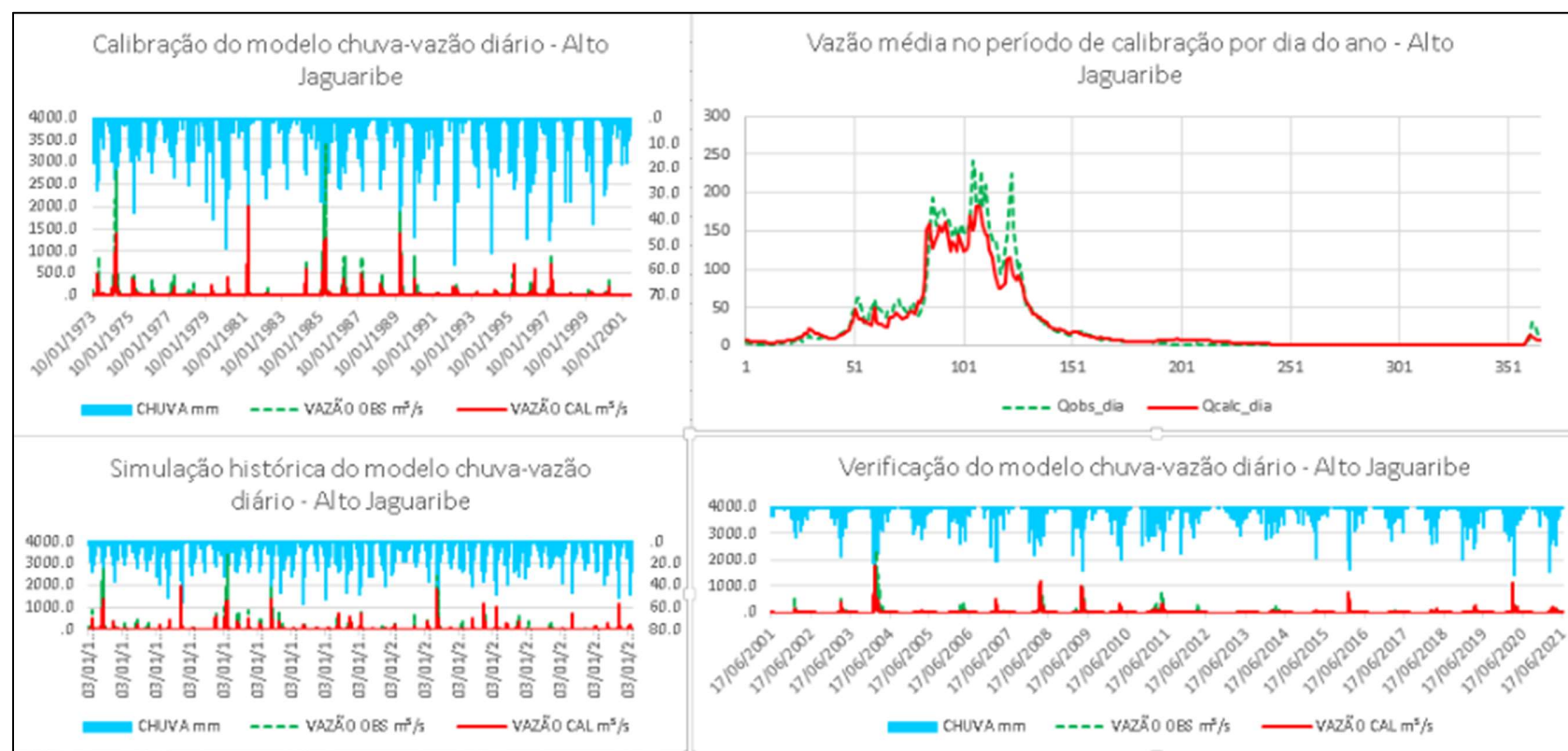
Edição

B12 : X ✓ fx Alto Jaguaribe

	A	B	C	D	E	F
1	MODELO CHUVA-VAZÃO CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL (CAWM)					
2						
3	Desenvolvido pelo prof. José Almir Cirilo (contato: almir.cirilo@gmail.com)					
4	Versão com aprimoramento computacional feito pelos doutorandos da UFPE Othon Oliveira, Felipe Alves e Vitor Melo. Dezenas de estudantes da UFPE merecem agradecimentos por suas contribuições nas aplicações e testes.					
5	Citação: CIRILO, J. A.; VERÇOSA, L. F. de M.; GOMES, M. M. de A.; FEITOZA, M. A. B.; FERRAZ, G. de F.; SILVA, B. de M. Development and application of a rainfall-runoff model for semi-arid regions. RBRH, Porto Alegre, v. 15, n. 1, p. 1-12, 2008.					
6	https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190106					
7						
8	Obs.: Modificar apenas as células com preenchimento amarelo.	LIMPAR DADOS DE SIMULAÇÃO E PLANILHA(S)	CRIAÇÃO DA(S) PLANILHA(S) DO CAWM	AJUSTAR PERÍODOS DE CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO	CALIBRAÇÃO	
9	As células marcadas em verde devem ser ajustadas se necessário.					
11	PARÂMETROS DA BACIA					
12	Nome da bacia	Alto Jaguaribe				
13	Área da bacia - Ab (km²)	20407.61				
14	Comprimento total da drenagem - Lt (m)	9106915.31				
15	Declividade equivalente dos rios - I (m/m)	0.000872523				
16	Largura equivalente da seção dos rios - Be (m) (típico: entre 1 e 5)	2				
17	Coefficiente de rugosidade de Manning - n	0.03				
18	Gerar planilha?	Sim				
19	Nome da planilha com o modelo CAWM da bacia	CAWM#oros				
20	Tipo de planilha	Calibração				
21	Tamanho sugerido do período de verificação (para calibração)	40%				
22	Função objetivo da calibração	Max(NSEmed)	Sugestão: começar maximizando NSE, depois refinar os resultados com os parâmetros marcados em verde.			

SetUp CAWM#oros

PRONTO



**APÊNDICE B – INDICADORES DE EFICIÊNCIA ANUAIS PARA CADA SUB-BACIA
MODELADA**

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO POR ANO – Estação 35830000 – Aracoiaba (1ª Simulação)									
EVENTO	DATA 1	DATA 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	PEPF	RMSE	R2
			0.243	0.297	0.000	0.243			0.405
1	5/1/1984	12/31/1984	0.242	0.789	-1.691	-28.748	75.989	15.034	0.249
2	1/1/1985	12/31/1985	0.461	0.711	0.087	-21.575	-17.012	42.894	0.468
3	1/1/1986	12/31/1986	0.385	0.742	-0.091	-22.597	70.999	41.683	0.412
4	1/1/1987	12/31/1987	-1.583	0.086	-15.256	164.312	-25.232	3.941	0.475
5	1/1/1988	12/31/1988	0.268	0.728	-1.457	-66.513	68.222	43.200	0.476
6	1/1/1989	12/31/1989	0.505	0.543	-4.506	-46.936	66.431	43.336	0.630
7	1/1/1990	12/31/1990	-34.444	-5.024	-45.744	14.578	-689.598	10.078	0.224
8	1/1/1991	12/31/1991	0.030	0.270	-48.002	-65.122	95.289	6.456	0.055
9	1/1/1992	12/31/1992	-1.613	-0.397	-3.726	93.264	-104.201	12.125	0.334
10	1/1/1993	12/31/1993	-0.602	-0.249	-27.951	-71.822	13.606	1.296	0.000
11	1/1/1994	12/31/1994	-2.121	-0.227	-0.722	235.671	-74.019	10.496	0.443
12	1/1/1995	12/31/1995	-0.472	0.455	-0.918	155.095	-45.486	11.792	0.636
13	1/1/1996	12/31/1996	0.545	0.700	-0.542	19.142	-24.295	17.473	0.624
14	1/1/1997	12/31/1997	-1.667	0.541	-26.746	42.854	-155.658	5.442	0.518
15	1/1/1998	12/31/1998	-67.007	-8.920	0.141	1,892.497	-710.082	1.142	0.263
16	1/1/1999	12/31/1999	0.409	0.267	-29.182	164.884	-0.803	5.525	0.711
17	1/1/2000	12/31/2000	-59.586	-6.315	-2.313	1,362.387	-419.650	14.357	0.507
18	1/1/2001	12/31/2001	-4.913	-1.986	-3.761	640.902	-65.941	4.745	0.306
19	1/1/2002	12/31/2002	-2.039	-0.083	-4.107	240.652	-24.482	14.273	0.495
20	1/1/2003	12/31/2003	0.526	0.740	-2.711	-3.224	49.443	7.506	0.565
21	1/1/2004	12/31/2004	0.732	0.897	-0.875	-15.850	22.708	26.726	0.738
22	1/1/2005	12/31/2005	-17.888	-0.641	-10.152	343.044	-316.590	6.824	0.525
23	1/1/2006	12/31/2006	0.834	0.869	-1.773	24.347	10.360	9.947	0.837
24	1/1/2007	12/31/2007	-1.777	0.308	-9.655	210.642	-75.829	3.408	0.671
25	1/1/2008	12/31/2008	-0.683	0.471	-4.884	126.053	-42.193	17.237	0.399
26	1/1/2009	12/31/2009	0.641	0.878	0.089	-16.425	56.813	37.958	0.737
27	1/1/2010	12/31/2010	-21.611	-1.825	-4.372	736.475	-420.618	13.902	0.893
28	1/1/2011	12/31/2011	0.049	0.438	-6.278	90.067	-14.450	3.920	0.427
29	1/1/2012	12/31/2012	-34.624	-2.492	-0.828	841.219	-496.797	2.867	0.530
30	1/1/2013	12/31/2013	-51.202	-10.773	-0.427	2,183.260	-384.307	4.390	0.258
31	1/1/2014	12/31/2014	-290.331	-30.046	-0.143	5,445.173	-635.511	6.511	0.027
32	1/1/2015	12/31/2015	-48.465	-7.323	-0.635	1,674.870	-693.938	3.786	0.502
33	1/1/2016	12/31/2016	#DIV/0!	#DIV/0!	#NÚM!			2.379	

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO POR ANO – Estação 35830000 – Aracoiaba (1ª Simulação)									
EVENTO	DATA 1	DATA 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	PEPF	RMSE	R2
			0.243	0.297	0.000	0.243			0.405
34	1/1/2017	12/31/2017	-55.606	-19.339	-3.032	3,776.982	-221.929	24.254	0.013
35	1/1/2018	12/31/2018	0.343	0.437	-10.462	14.813	69.172	14.761	0.409
36	1/1/2019	12/31/2019	-84.166	-15.073	-0.415	3,025.229	-371.325	5.638	0.233
37	1/1/2020	12/31/2020	-14.761	-6.242	-3.918	1,238.377	-210.323	17.060	0.003
38	1/1/2021	6/30/2021	-75.037	-18.295	-1.842	3,415.014	-408.304	10.331	0.054

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO POR ANO – 35830000 – Aracoiaba (2ª Simulação)									
EVENTO	DATA 1	DATA 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	PEPF	RMSE	R2
			0.235	0.353	0.000	0.176			0.412
1	5/1/1984	12/31/1984	0.226	0.778	-1.440	-9.094	67.796	15.191	0.241
2	1/1/1985	12/31/1985	0.448	0.680	0.087	-4.236	-29.300	43.405	0.464
3	1/1/1986	12/31/1986	0.398	0.725	0.008	-3.562	63.490	41.231	0.399
4	1/1/1987	12/31/1987	-5.320	-0.471	-14.924	275.204	-83.101	6.165	0.483
5	1/1/1988	12/31/1988	0.348	0.767	-1.260	-57.539	60.945	40.789	0.509
6	1/1/1989	12/31/1989	0.549	0.573	-3.944	-36.717	61.449	41.399	0.622
7	1/1/1990	12/31/1990	-51.635	-5.847	-43.301	38.007	-840.190	12.282	0.213
8	1/1/1991	12/31/1991	0.061	0.238	-43.178	-40.719	90.301	6.352	0.068
9	1/1/1992	12/31/1992	-2.690	-0.681	-3.661	135.389	-135.693	14.411	0.363
10	1/1/1993	12/31/1993	-0.774	-0.233	-25.909	-59.013	-29.521	1.364	0.000
11	1/1/1994	12/31/1994	-5.478	-0.968	-0.841	352.956	-157.828	15.121	0.417
12	1/1/1995	12/31/1995	-1.759	0.147	-0.981	225.279	-80.116	16.144	0.636
13	1/1/1996	12/31/1996	0.417	0.620	-0.556	47.745	-43.286	19.792	0.631
14	1/1/1997	12/31/1997	-4.064	0.365	-26.199	91.283	-231.431	7.499	0.550
15	1/1/1998	12/31/1998	-178.184	- 14.143	0.157	2,895.432	- 1,246.441	1.853	0.281
16	1/1/1999	12/31/1999	-0.353	-0.071	-28.973	250.961	-39.022	8.357	0.716
17	1/1/2000	12/31/2000	-104.334	-9.528	-2.669	1,863.654	-548.293	18.930	0.527

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO POR ANO – Estação 35880000 - Chorozinho									
EVENTO	DATA 1	DATA 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	PEPF	RMSE	R2
			0.500	0.654	0.462	0.346			0.846
1	5/3/1969	12/31/1969	0.312	0.648	0.772	54.378	-21.181	14.344	0.760
2	1/1/1970	12/31/1970	-2.064	0.148	-0.512	153.910	-129.128	11.552	0.732
3	1/1/1971	12/31/1971	0.368	0.579	0.621	81.318	27.623	14.000	0.699
4	1/1/1972	12/31/1972	-2.392	-0.028	-0.476	163.080	-42.526	4.378	0.776
5	1/1/1973	12/31/1973	0.842	0.916	0.929	1.144	18.732	19.745	0.848

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO POR ANO – Estação 35880000 - Chorozinho									
EVENTO	DATA 1	DATA 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	PEPF	RMSE	R2
			0.500	0.654	0.462	0.346			0.846
6	1/1/1974	12/31/1974	0.839	0.926	0.853	-9.605	0.113	44.429	0.843
7	1/1/1975	12/31/1975	0.518	0.699	0.456	-23.567	2.498	16.164	0.556
8	1/1/1976	12/31/1976	0.483	0.746	0.338	6.434	34.822	8.988	0.552
9	1/1/1977	12/31/1977	0.680	0.816	0.585	-1.642	26.982	21.132	0.745
10	1/1/1978	12/31/1978	0.413	0.612	0.335	-0.498	69.540	12.955	0.413
11	1/1/1979	12/31/1979	-12.814	-0.618	-3.115	255.364	-335.662	11.084	0.590
12	1/1/1980	12/31/1980	-0.699	0.663	0.427	132.363	-40.410	39.054	0.762
13	1/1/1981	12/31/1981	0.131	0.753	0.232	99.244	3.883	25.963	0.812
14	1/1/1982	12/31/1982	-11.556	-1.487	-1.518	491.847	-245.475	19.929	0.796
15	1/1/1983	12/31/1983	-68.468	-8.957	-2.016	1,721.743	-261.619	8.011	0.375
16	1/1/1984	12/31/1984	0.811	0.930	0.743	-0.436	38.620	23.453	0.811
17	1/1/1985	12/31/1985	0.587	0.844	0.909	-36.066	33.723	95.205	0.739
18	1/1/1986	12/31/1986	0.739	0.891	0.800	-14.960	41.202	43.861	0.775
19	1/1/1987	12/31/1987	-0.702	0.146	0.688	132.053	29.438	13.585	0.568
20	1/1/1988	12/31/1988	0.784	0.917	0.872	-24.627	23.787	28.792	0.844
21	1/1/1989	12/31/1989	0.692	0.885	0.784	-25.602	52.038	30.903	0.744
22	1/1/1990	12/31/1990	-0.015	0.277	0.041	128.079	33.555	8.779	0.493
23	1/1/1991	12/31/1991	0.529	0.645	0.047	45.623	62.109	7.550	0.548
24	1/1/1992	12/31/1992	-0.136	0.748	0.592	50.528	-120.627	29.195	0.595
25	1/1/1993	12/31/1993	-0.484	-0.042	-1.757	77.201	50.699	1.082	0.096
26	1/1/1994	5/20/1994	-2.179	-0.138	0.274	202.750	-34.511	38.122	0.703

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO POR ANO – Estação 36160000 - Iguatu									
EVENTO	DATA 1	DATA 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	PEPF	RMSE	R2
			0.417	0.583	0.708	0.229			0.667
1	1/1/1973	12/31/1973	0.588	0.808	0.631	45.983	34.707	51.330	0.690
2	1/1/1974	12/31/1974	0.833	0.951	0.936	-22.778	43.393	173.209	0.913
3	1/1/1975	12/31/1975	0.761	0.883	0.919	3.311	17.514	26.597	0.762
4	1/1/1976	12/31/1976	0.543	0.859	0.972	-47.126	71.296	32.392	0.808
5	1/1/1977	12/31/1977	0.458	0.652	0.817	-40.401	48.398	42.525	0.510
6	1/1/1978	12/31/1978	0.465	0.673	0.741	-2.228	61.557	17.211	0.469
7	1/1/1979	12/31/1979	-7.328	-0.922	0.080	307.530	-98.481	30.513	0.588
8	1/1/1980	12/31/1980	-0.121	0.708	0.766	98.227	-50.441	44.509	0.778
9	1/1/1981	12/31/1981	-0.001	0.761	0.832	118.589	-79.454	160.368	0.919
10	1/1/1982	12/31/1982	0.345	0.487	0.366	50.722	70.019	11.024	0.393
11	1/1/1983	12/31/1983	- 184.434	-20.764	0.751	3,873.992	- 605.621	4.633	0.374

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO POR ANO – Estação 36160000 - Iguatu									
EVENTO	DATA 1	DATA 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	PEPF	RMSE	R2
			0.417	0.583	0.708	0.229			0.667
12	1/1/1984	12/31/1984	0.533	0.796	0.816	84.682	2.825	50.694	0.832
13	1/1/1985	12/31/1985	0.766	0.919	0.918	-30.708	56.239	203.569	0.900
14	1/1/1986	12/31/1986	0.735	0.873	0.863	-23.798	48.972	60.794	0.844
15	1/1/1987	12/31/1987	0.682	0.759	0.751	42.183	41.904	44.175	0.690
16	1/1/1988	12/31/1988	0.561	0.820	0.862	21.122	42.476	39.893	0.575
17	1/1/1989	12/31/1989	0.814	0.915	0.941	-5.611	17.350	97.677	0.819
18	1/1/1990	12/31/1990	0.393	0.750	0.752	-13.432	49.958	17.844	0.445
19	1/1/1991	12/31/1991	-0.051	0.631	0.678	86.822	-23.155	9.154	0.779
20	1/1/1992	12/31/1992	-0.572	0.367	0.610	157.491	20.842	28.201	0.608
21	1/1/1993	12/31/1993	-16.260	-3.007	-3.796	631.986	-129.897	13.848	0.101
22	1/1/1994	12/31/1994	-4.668	-1.062	-0.573	382.142	-58.378	24.933	0.708
23	1/1/1995	12/31/1995	-0.313	0.606	0.759	80.434	-70.842	70.005	0.539
24	1/1/1996	12/31/1996	-1.475	0.403	0.716	71.152	-104.400	69.531	0.276
25	1/1/1997	12/31/1997	0.278	0.520	0.706	126.605	7.354	71.776	0.706
26	1/1/1998	12/31/1998	-0.046	0.011	-0.745	147.304	40.533	7.879	0.337
27	1/1/1999	12/31/1999	-0.365	0.286	0.436	59.370	29.963	18.243	0.156
28	1/1/2000	12/31/2000	0.686	0.632	0.642	77.555	25.872	19.323	0.756
29	1/1/2001	12/31/2001	#DIV/0!	#DIV/0!	#NÚM!			4.468	
30	1/1/2002	12/31/2002	0.357	0.746	0.765	-22.804	84.406	36.108	0.543
31	1/1/2003	12/31/2003	0.535	0.659	0.649	63.148	20.295	37.373	0.612
32	1/1/2004	12/31/2004	0.695	0.895	0.945	-39.188	19.895	202.115	0.754
33	1/1/2005	12/31/2005	-18.194	-5.017	-1.842	1,175.473	-230.534	12.263	0.466
34	1/1/2006	12/31/2006	0.366	0.676	0.765	-36.974	67.490	33.188	0.446
35	1/1/2007	12/31/2007	-11.341	-0.110	0.532	262.524	-301.631	59.659	0.693
36	1/1/2008	12/31/2008	0.856	0.953	0.927	10.914	-59.163	51.571	0.902
37	1/1/2009	12/31/2009	0.889	0.943	0.924	21.213	-23.009	39.240	0.921
38	1/1/2010	12/31/2010	-1.219	-0.123	0.013	290.580	-80.057	27.229	0.757
39	1/1/2011	12/31/2011	0.568	0.718	0.739	7.007	54.609	48.181	0.584
40	1/1/2012	12/31/2012	0.125	0.640	0.657	-54.847	92.982	25.173	0.262
41	1/1/2013	12/31/2013	-4.684	-5.052	0.727	4,033.300	20.136	4.732	0.130
42	1/1/2014	12/31/2014	0.269	0.699	0.836	-51.463	78.056	29.497	0.442
43	1/1/2015	12/31/2015	-35.357	-6.656	-1.569	1,270.075	-155.218	13.838	0.070
44	1/1/2016	12/31/2016	-41.234	-4.231	-3.759	1,071.013	-425.650	74.217	0.568

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO POR ANO – Estação 36160000 - Iguatu									
EVENTO	DATA 1	DATA 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	PEPF	RMSE	R2
			0.417	0.583	0.708	0.229			0.667
45	1/1/2017	12/31/2017	-0.393	-1.089	-3.458	327.158	72.100	6.294	0.199
46	1/1/2018	12/31/2018	-1.521	-0.646	-0.433	301.632	-30.623	23.491	0.484
47	1/1/2019	12/31/2019	-2.097	-0.426	-0.174	353.580	- 100.072	32.352	0.811
48	1/1/2020	12/31/2020	-0.001	0.431	0.533	163.432	-83.138	62.721	0.865
49	1/1/2021	6/30/2021	-2.195	-0.594	-0.030	263.756	-38.573	41.656	0.617

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO POR ANO – Estação 36290000 - Icó									
EVENTO	DATA 1	DATA 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	PEPF	RMSE	R2
			0.592	0.653	0.469	0.286			0.939
1	1/3/1973	12/31/1973	0.603	0.775	0.529	50.546	-22.329	35.575	0.812
2	1/1/1974	12/31/1974	0.757	0.879	0.750	-38.566	34.512	96.570	0.901
3	1/1/1975	12/31/1975	0.830	0.919	0.870	-19.147	27.417	32.221	0.879
4	1/1/1976	12/31/1976	0.720	0.795	0.291	-24.672	40.470	21.294	0.779
5	1/1/1977	12/31/1977	0.892	0.939	0.778	0.559	9.267	18.520	0.895
6	1/1/1978	12/31/1978	0.681	0.869	0.893	-29.333	49.764	50.815	0.803
7	1/1/1979	12/31/1979	0.610	0.734	0.060	-10.179	57.644	23.055	0.631
8	1/1/1980	12/31/1980	0.713	0.811	-0.478	-20.062	11.946	62.570	0.718
9	1/1/1981	12/31/1981	0.908	0.810	-2.338	-29.035	-9.175	37.873	0.926
10	1/1/1982	12/31/1982	0.262	0.484	-1.124	-4.354	38.762	17.225	0.328
11	1/1/1983	12/31/1983	-2.548	-0.083	0.466	198.331	- 181.642	18.923	0.740
12	1/1/1984	12/31/1984	0.424	0.689	0.716	103.615	-36.715	37.389	0.895
13	1/1/1985	12/31/1985	0.750	0.806	0.128	-39.571	15.379	123.313	0.852
14	1/1/1986	12/31/1986	0.828	0.900	0.815	-27.770	17.903	32.937	0.891
15	1/1/1987	12/31/1987	0.848	0.864	0.619	33.683	-11.073	22.281	0.889
16	1/1/1988	12/31/1988	0.818	0.870	0.726	25.824	-22.449	29.470	0.842
17	1/1/1989	12/31/1989	0.738	0.896	0.925	-19.425	-8.257	75.095	0.746
18	1/1/1990	12/31/1990	0.565	0.641	0.663	59.246	9.982	24.843	0.679
19	1/1/1991	12/31/1991	-1.543	-0.742	-0.595	307.302	-14.772	34.912	0.506
20	1/1/1992	12/31/1992	0.183	0.558	0.482	120.332	-42.051	40.103	0.794
21	1/1/1993	12/31/1993	-5.867	-1.285	-2.701	448.018	-82.368	15.076	0.567
22	1/1/1994	12/31/1994	0.264	0.478	0.660	83.590	23.603	19.098	0.577
23	1/1/1995	12/31/1995	0.878	0.842	0.728	30.512	-20.545	26.943	0.894
24	1/1/1996	12/31/1996	0.837	0.893	0.793	6.682	-28.572	38.551	0.843
25	1/1/1997	12/31/1997	0.696	0.767	0.689	43.433	22.891	19.835	0.731
26	1/1/1998	12/31/1998	-0.774	0.271	-1.039	143.932	-65.868	10.041	0.609

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO POR ANO – Estação 36290000 - Icó									
EVENTO	DATA 1	DATA 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	PEPF	RMSE	R2
			0.592	0.653	0.469	0.286			0.939
27	1/1/1999	12/31/1999	0.767	0.663	-0.229	28.672	-25.096	15.639	0.828
28	1/1/2000	12/31/2000	0.859	0.783	-0.242	4.239	5.068	25.001	0.864
29	1/1/2001	12/31/2001	-2.223	-0.315	-2.191	92.275	- 223.364	18.207	0.753
30	1/1/2002	12/31/2002	0.715	0.855	0.505	40.994	-12.259	22.905	0.927
31	1/1/2003	12/31/2003	-0.609	0.202	-0.530	123.181	-71.568	29.685	0.823
32	1/1/2004	12/31/2004	0.564	0.837	-0.044	-2.166	-99.452	93.105	0.756
33	1/1/2005	12/31/2005	-0.056	0.212	-2.075	87.548	-34.908	25.742	0.893
34	1/1/2006	12/31/2006	0.626	0.820	0.647	34.077	26.107	42.196	0.699
35	1/1/2007	12/31/2007	-3.755	-0.951	-0.719	224.452	- 185.729	26.105	0.730
36	1/1/2008	12/31/2008	0.864	0.908	0.836	-14.900	-1.287	70.627	0.878
37	1/1/2009	12/31/2009	0.843	0.859	0.662	-5.473	8.987	47.054	0.855
38	1/1/2010	12/31/2010	-1.923	-0.789	-0.573	151.651	- 191.455	15.913	0.655
39	1/1/2011	12/31/2011	0.832	0.873	0.833	2.811	-8.186	34.084	0.847
40	1/1/2012	12/31/2012	-0.503	0.188	-2.323	33.244	-84.970	12.269	0.621
41	1/1/2013	12/31/2013	-0.061	0.260	0.249	90.028	-33.700	15.998	0.590
42	1/1/2014	12/31/2014	-0.061	0.524	0.595	111.906	-63.730	25.731	0.906
43	1/1/2015	12/31/2015	0.270	0.624	0.632	0.575	-74.331	12.231	0.358
44	1/1/2016	12/31/2016	-0.152	0.298	0.021	108.337	- 159.473	26.153	0.555
45	1/1/2017	12/31/2017	-5.192	-0.587	0.099	327.516	- 201.786	26.321	0.712
46	1/1/2018	12/31/2018	-0.693	0.296	0.359	161.804	-23.225	54.066	0.685
47	1/1/2019	12/31/2019	0.364	0.608	0.361	78.313	-46.189	24.788	0.729
48	1/1/2020	12/31/2020	0.616	0.757	0.667	61.598	-20.344	50.451	0.784
49	1/1/2021	6/30/2021	-3.420	-0.384	0.420	199.356	-28.489	50.499	0.411

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO POR ANO – Estação 36320000 - Jaguaribe									
EVENTO	DATA 1	DATA 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	PEPF	RMSE	R2
			0.467	0.444	0.289	0.378			0.644
1	10/30/1977	12/31/1977	-4.752	-3.919	-3.195	69.348	-33.886	2.206	0.162
2	1/1/1978	12/31/1978	0.773	0.883	0.949	-19.463	27.263	52.813	0.816
3	1/1/1979	12/31/1979	0.372	0.550	0.642	-20.222	22.182	30.707	0.427
4	1/1/1980	12/31/1980	0.768	0.873	0.183	-8.132	21.139	86.036	0.785

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO POR ANO – Estação 36320000 - Jaguaribe									
EVENTO	DATA 1	DATA 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	PEPF	RMSE	R2
			0.467	0.444	0.289	0.378			0.644
5	1/1/1981	12/31/1981	0.594	0.761	-1.184	11.679	3.303	150.868	0.804
6	1/1/1982	12/31/1982	0.312	-0.628	-5.889	-42.526	59.871	22.736	0.408
7	1/1/1983	12/31/1983	0.041	-0.709	-6.173	-41.685	56.087	13.444	0.157
8	1/1/1984	12/31/1984	-1.453	0.260	-0.553	120.926	-70.140	127.068	0.898
9	1/1/1985	12/31/1985	0.734	0.877	0.839	-41.611	41.432	434.317	0.905
10	1/1/1986	12/31/1986	0.721	0.793	0.478	-38.461	21.670	109.735	0.800
11	1/1/1987	12/31/1987	0.663	0.569	-2.406	-7.145	-39.996	54.799	0.893
12	1/1/1988	12/31/1988	0.575	0.417	-3.726	-55.253	47.713	84.817	0.772
13	1/1/1989	12/31/1989	0.801	0.833	-0.635	-39.366	38.171	195.731	0.891
14	1/1/1990	12/31/1990	0.544	0.011	-4.875	-47.198	39.450	27.957	0.711
15	1/1/1991	12/31/1991	0.121	-1.317	-13.848	-34.887	21.589	18.175	0.500
16	1/1/1992	12/31/1992	-1.254	-0.803	-5.838	59.595	-6.681	59.544	0.664
17	1/1/1993	12/31/1993	-6.725	-10.197	-34.932	-37.383	-122.150	19.519	0.039
18	1/1/1994	12/31/1994	-0.226	-0.299	-1.680	-6.529	-22.748	27.936	0.323
19	1/1/1995	12/31/1995	-0.233	0.385	-0.432	61.352	-42.454	95.095	0.710
20	1/1/1996	12/31/1996	0.696	0.684	-0.090	-15.501	9.109	80.669	0.709
21	1/1/1997	12/31/1997	-1.603	-0.209	-1.164	89.908	-69.940	83.693	0.687
22	1/1/1998	12/31/1998	-2.564	-6.051	-16.266	-64.291	37.504	18.097	0.007
23	1/1/1999	12/31/1999	0.095	-1.013	-7.947	-39.872	54.998	35.394	0.249
24	1/1/2000	12/31/2000	0.735	0.506	-1.125	17.112	8.592	40.770	0.843
25	1/1/2001	12/31/2001	-1.549	-3.883	-12.655	-49.733	-43.989	15.843	0.151
26	1/1/2002	12/31/2002	0.621	0.691	0.645	-20.119	41.143	29.983	0.639
27	1/1/2003	12/31/2003	0.592	0.519	-0.111	54.579	4.665	41.381	0.787
28	1/1/2004	12/31/2004	0.252	0.826	0.842	12.783	-19.827	277.667	0.654
29	1/1/2005	12/31/2005	0.253	-0.021	-1.477	9.328	20.026	26.888	0.438
30	1/1/2006	12/31/2006	0.611	0.779	0.528	12.956	10.716	42.216	0.688
31	1/1/2007	12/31/2007	-6.854	-1.293	-0.076	284.596	-128.074	54.108	0.684
32	1/1/2008	12/31/2008	0.607	0.888	0.886	14.193	-12.236	163.638	0.795
33	1/1/2009	12/31/2009	0.873	0.903	0.750	-10.165	2.695	91.583	0.883
34	1/1/2010	12/31/2010	0.338	0.022	-0.425	14.875	-9.298	20.713	0.599
35	1/1/2011	12/31/2011	0.711	0.833	0.794	6.666	-31.489	62.110	0.798
36	1/1/2012	12/31/2012	0.379	0.729	0.592	-1.699	19.291	17.405	0.489
37	1/1/2013	12/31/2013	0.000	0.165	0.194	-48.812	69.831	19.138	0.059
38	1/1/2014	12/31/2014	0.492	0.683	0.596	78.902	3.408	23.080	0.804
39	1/1/2015	12/31/2015	-0.048	0.274	0.434	36.489	23.517	7.276	0.404
40	1/1/2016	12/31/2016	-0.020	-0.548	-0.209	54.185	19.120	14.067	0.340
41	1/1/2017	12/31/2017	0.325	0.340	0.271	-32.417	62.365	14.560	0.358

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO POR ANO – Estação 36320000 - Jaguaribe									
EVENTO	DATA 1	DATA 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	PEPF	RMSE	R2
			0.467	0.444	0.289	0.378			0.644
42	1/1/2018	12/31/2018	-0.371	0.191	0.415	178.165	-36.419	54.172	0.813
43	1/1/2019	12/31/2019	-11.398	-1.303	0.250	357.131	-262.431	65.944	0.731
44	1/1/2020	12/31/2020	0.579	0.841	0.826	54.647	-33.546	94.065	0.787
45	1/1/2021	6/30/2021	-6.403	-0.935	0.556	203.176	-35.495	111.556	0.344

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO POR ANO – Estação 36470000 – Senador Pompeu									
EVENTO	DATA 1	DATA 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	PEPF	RMSE	R2
			0.468	0.532	0.191	0.191			0.532
1	2/1/1973	12/31/1973	-0.678	0.589	0.341	115.961	-158.646	20.833	0.761
2	1/1/1974	12/31/1974	0.572	0.877	0.812	-2.570	0.245	69.137	0.623
3	1/1/1975	12/31/1975	0.505	0.778	0.533	-19.828	28.418	16.209	0.515
4	1/1/1976	12/31/1976	0.784	0.886	-0.806	-0.671	-47.547	9.535	0.807
5	1/1/1977	12/31/1977	0.625	0.873	0.086	-8.300	0.703	13.100	0.681
6	1/1/1978	12/31/1978	0.651	0.596	-0.282	87.255	14.866	7.138	0.768
7	1/1/1979	12/31/1979	-0.719	0.159	-1.535	147.020	-70.022	9.670	0.446
8	1/1/1980	12/31/1980	0.786	0.916	0.417	-28.501	-1.731	35.137	0.798
9	1/1/1981	12/31/1981	0.675	0.882	-0.390	44.172	-31.564	22.997	0.803
10	1/1/1982	12/31/1982	-2.528	-2.211	-2.485	590.192	-8.484	3.289	0.339
11	1/1/1983	12/31/1983	-1,085.045	-41.477	0.216	7,072.548	-2,365.388	6.365	0.000
12	1/1/1984	12/31/1984	0.824	0.853	0.142	32.301	10.185	20.542	0.850
13	1/1/1985	12/31/1985	0.760	0.883	0.722	-30.442	12.457	63.588	0.795
14	1/1/1986	12/31/1986	0.547	0.722	0.596	-35.374	15.208	45.712	0.594
15	1/1/1987	12/31/1987	0.213	0.665	-9.540	84.394	-47.062	2.637	0.891
16	1/1/1988	12/31/1988	0.606	0.838	-0.807	-40.042	29.478	12.541	0.687
17	1/1/1989	12/31/1989	0.647	0.865	0.604	1.780	-6.771	38.466	0.667
18	1/1/1990	12/31/1990	0.622	0.688	-1.522	35.602	-40.384	3.733	0.797
19	1/1/1991	12/31/1991	0.370	0.666	-3.954	9.856	25.168	5.995	0.474
20	1/1/1992	12/31/1992	-0.547	0.655	-0.570	-1.905	-104.928	22.471	0.138
21	1/1/1993	12/31/1993	#DIV/0!	#DIV/0!	#NÚM!			2.842	
22	1/1/1994	12/31/1994	0.548	0.551	0.347	46.207	-61.215	12.191	0.643
23	1/1/1995	12/31/1995	0.598	0.734	0.541	34.976	-38.498	14.080	0.724
24	1/1/1996	12/31/1996	0.469	0.465	0.374	62.637	23.456	23.715	0.496
25	1/1/1997	12/31/1997	0.624	0.615	0.100	50.067	3.005	17.834	0.696
26	1/1/1998	12/31/1998	-243.950	-74.905	-96.033	57.009	-1,322.838	3.489	0.193
27	1/1/1999	12/31/1999	0.393	-0.174	-3.581	32.932	28.442	7.742	0.410
28	1/1/2000	12/31/2000	0.193	0.141	-0.458	93.359	-60.054	9.182	0.581
29	1/1/2001	12/31/2001	-129.805	-35.749	-21.047	366.001	-555.909	3.950	0.052

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO POR ANO – Estação 36470000 – Senador Pompeu									
EVENTO	DATA 1	DATA 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	PEPF	RMSE	R2
			0.468	0.532	0.191	0.191			0.532
30	1/1/2002	12/31/2002	-11.100	-3.384	-3.663	262.729	-347.613	17.840	0.476
31	1/1/2003	12/31/2003	-1.660	-0.142	-0.623	157.174	-198.162	19.795	0.568
32	1/1/2004	12/31/2004	0.119	0.608	0.273	-40.557	-112.147	113.712	0.313
33	1/1/2005	12/31/2005	-13.643	-0.325	-2.324	72.192	-786.049	43.100	0.415
34	1/1/2006	12/31/2006	-9.157	-3.198	-3.720	115.261	-335.473	5.976	0.317
35	1/1/2007	12/31/2007	0.116	0.308	-0.439	81.211	-51.054	8.456	0.673
36	1/1/2008	12/31/2008	-0.369	0.676	-0.046	4.655	-143.204	30.681	0.431
37	1/1/2009	12/31/2009	0.780	0.897	0.766	-26.669	2.552	23.994	0.803
38	1/1/2010	12/31/2010	-11.690	-3.844	-5.095	344.686	-349.784	12.382	0.884
39	1/1/2011	12/31/2011	0.417	0.805	0.842	-11.918	-50.835	46.683	0.516
40	1/1/2012	12/31/2012	-2.626	-3.969	-8.845	-36.548	-42.850	0.742	0.044
41	1/1/2013	12/31/2013	-12.547	-9.393	-10.901	182.087	-49.763	5.228	0.093
42	1/1/2014	12/31/2014	-25.840	-8.012	-3.504	302.269	-278.132	3.704	0.354
43	1/1/2015	12/31/2015	-65.799	-7.841	-1.626	691.920	-839.317	3.573	0.026
44	1/1/2016	12/31/2016	- 448,147.782	- 2,519.718	0.851	446,477.274	- 36,628.256	7.715	0.029
45	1/1/2017	12/31/2017	#DIV/0!	#DIV/0!	#NÚM!			7.211	
46	1/1/2018	12/31/2018	-99.045	-8.784	-2.944	1,757.343	-1,578.547	32.936	0.015
47	1/1/2019	12/31/2019	-6.297	-2.259	-1.779	568.072	-113.214	4.678	0.440
48	1/1/2020	12/31/2020	0.642	0.560	-0.112	53.585	23.492	21.122	0.658
49	1/1/2021	6/30/2021	-58.176	-8.492	-2.888	1,400.102	-527.437	19.322	0.082

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO POR ANO – Estação 36520000 - Quixeramobim									
EVENTO	DATA 1	DATA 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	PEPF	RMSE	R2
			0.293	0.317	0.390	0.244			0.317
1	1/1/1973	12/31/1973	#N/D	#N/D	#N/D				
2	1/1/1974	12/31/1974	0.549	0.832	0.777	-45.855	56.137	209.245	0.710
3	1/1/1975	12/31/1975	0.469	0.732	0.453	-6.405	69.797	26.591	0.512
4	1/1/1976	12/31/1976	#N/D	#N/D	#N/D				
5	1/1/1977	12/31/1977	#N/D	#N/D	#N/D				
6	1/1/1978	12/31/1978	0.045	0.415	0.064	15.944	49.284	13.462	0.106
7	1/1/1979	12/31/1979	0.298	0.254	-0.387	57.981	48.199	12.716	0.310
8	1/1/1980	12/31/1980	0.700	0.893	0.571	-14.856	40.228	32.941	0.766
9	1/1/1981	12/31/1981	0.582	0.841	0.558	73.961	-0.771	47.739	0.849
10	1/1/1982	12/31/1982	0.207	0.561	0.110	-35.498	88.579	23.776	0.439
11	1/1/1983	12/31/1983	- 8,769.658	-666.272	0.919	122,233.198	- 1,230.874	0.247	0.026

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO POR ANO – Estação 36520000 - Quixeramobim									
EVENTO	DATA 1	DATA 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	PEPF	RMSE	R2
			0.293	0.317	0.390	0.244			0.317
12	1/1/1984	12/31/1984	0.617	0.819	0.585	20.749	9.319	54.508	0.697
13	1/1/1985	12/31/1985	0.731	0.913	0.821	-4.194	51.959	76.706	0.732
14	1/1/1986	12/31/1986	#N/D	#N/D	#N/D				
15	1/1/1987	12/31/1987	#N/D	#N/D	#N/D				
16	1/1/1988	12/31/1988	#N/D	#N/D	#N/D				
17	1/1/1989	12/31/1989	0.798	0.924	0.730	1.098	22.298	44.638	0.799
18	1/1/1990	12/31/1990	0.341	0.380	0.024	66.838	57.396	11.963	0.407
19	1/1/1991	12/31/1991	0.576	0.641	0.067	84.234	40.538	13.106	0.652
20	1/1/1992	12/31/1992	0.392	0.733	0.545	-27.268	62.967	33.978	0.482
21	1/1/1993	12/31/1993	#N/D	#N/D	#N/D				
22	1/1/1994	12/31/1994	#N/D	#N/D	#N/D				
23	1/1/1995	12/31/1995	-9.865	-0.217	0.341	282.721	-276.905	51.104	0.698
24	1/1/1996	12/31/1996	0.785	0.778	0.839	35.947	-9.096	24.963	0.862
25	1/1/1997	12/31/1997	-3.060	0.161	0.532	86.872	-258.682	31.564	0.253
26	1/1/1998	12/31/1998	-4.741	-7.181	-12.327	-64.862	11.534	0.612	0.313
27	1/1/1999	12/31/1999	-15.249	-5.619	-2.907	320.260	-162.060	7.151	0.544
28	1/1/2000	12/31/2000	- 1,403.787	-58.826	-5.294	669.146	- 3,148.473	17.496	0.001
29	1/1/2001	12/31/2001	-19.769	-5.405	-2.345	92.146	-748.380	3.800	0.105
30	1/1/2002	12/31/2002	-0.361	0.252	0.606	54.110	-22.676	17.654	0.198
31	1/1/2003	12/31/2003	-64.416	-7.932	-1.425	355.375	-685.622	23.943	0.042
32	1/1/2004	12/31/2004	0.688	0.831	0.912	-5.430	-19.086	70.611	0.814
33	1/1/2005	12/31/2005	-7.040	-4.595	-2.379	271.349	-56.023	4.254	0.322
34	1/1/2006	12/31/2006	-2.411	-1.885	-0.717	236.399	-39.079	6.012	0.484
35	1/1/2007	12/31/2007	-2.518	-2.541	-2.803	1.864	3.304	0.661	0.016
36	1/1/2008	12/31/2008	-2.065	0.165	0.789	101.404	-59.157	67.351	0.361
37	1/1/2009	12/31/2009	0.816	0.942	0.905	-23.214	36.755	66.933	0.893
38	1/1/2010	12/31/2010	-5.064	-1.816	-0.193	233.024	-71.351	9.480	0.216
39	1/1/2011	12/31/2011	-3.668	0.064	0.636	98.340	-220.466	22.573	0.473
40	1/1/2012	12/31/2012	-0.394	-1.836	-6.588	-84.920	95.580	1.227	0.003
41	1/1/2013	12/31/2013	-0.671	-1.805	-5.234	-10.833	64.577	3.418	0.000
42	1/1/2014	12/31/2014	-90.101	-11.454	-1.628	456.178	-723.556	3.653	0.080
43	1/1/2015	12/31/2015	-25.068	-5.174	-0.779	713.318	-193.587	1.352	0.085
44	1/1/2016	12/31/2016	-36.759	-13.284	0.757	2,333.346	-154.109	1.561	0.007
45	1/1/2017	12/31/2017	- 2,313.476	-48.859	-1.563	5,894.878	- 2,450.129	17.884	0.032
46	1/1/2018	12/31/2018	-897.615	-30.059	-1.531	5,315.164	- 1,334.054	36.469	0.488

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO POR ANO – Estação 36520000 - Quixeramobim									
EVENTO	DATA 1	DATA 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	PEPF	RMSE	R2
			0.293	0.317	0.390	0.244			0.317
47	1/1/2019	12/31/2019	-101.916	-17.594	-1.196	1,409.458	-248.469	2.843	0.188
48	1/1/2020	12/31/2020	- 1,988.599	-67.820	-2.125	4,692.301	- 3,650.979	13.629	0.419
49	1/1/2021	6/30/2021	-61.425	-10.179	-0.725	788.442	-504.392	3.728	0.038

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO POR ANO – Estação 36580000- Morada Nova (1ª Simulação)									
EVENTO	DATA 1	DATA 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	PEPF	RMSE	R2
			0.208	0.229	0.042	0.333			0.271
1	3/6/1973	12/31/1973	0.827	0.753	-0.008	4.074	-2.057	29.750	0.854
2	1/1/1974	12/31/1974	0.440	0.718	0.686	-39.747	11.359	257.720	0.506
3	1/1/1975	12/31/1975	0.396	0.584	-0.621	-47.357	72.678	51.775	0.637
4	1/1/1976	12/31/1976	-0.489	-1.051	-7.213	53.208	18.074	24.617	0.301
5	1/1/1977	12/31/1977	0.713	0.704	-1.029	-34.110	40.705	32.963	0.799
6	1/1/1978	12/31/1978	0.213	-0.078	-1.476	71.092	-2.423	26.340	0.599
7	1/1/1979	12/31/1979	-42.390	-23.900	-41.457	147.544	-261.761	32.016	0.072
8	1/1/1980	12/31/1980	0.566	0.674	-0.242	11.338	56.875	55.049	0.573
9	1/1/1981	12/31/1981	-0.679	0.236	-1.319	61.963	-12.237	125.009	0.410
10	1/1/1982	12/31/1982	-0.968	-2.061	-6.848	13.761	46.400	19.995	0.084
11	1/1/1983	12/31/1983	-14.057	-17.823	-79.545	0.244	-45.926	14.110	0.020
12	1/1/1984	12/31/1984	0.197	0.643	-0.206	36.628	-68.851	133.418	0.768
13	1/1/1985	12/31/1985	0.620	0.777	0.533	-54.306	29.750	223.571	0.805
14	1/1/1986	12/31/1986	0.527	0.731	0.303	-58.232	53.011	164.943	0.843
15	1/1/1987	12/31/1987	-15.280	-18.132	- 101.866	12.407	-50.481	25.556	0.195
16	1/1/1988	12/31/1988	0.693	0.022	-8.658	15.233	16.110	35.988	0.750
17	1/1/1989	12/31/1989	0.573	0.759	-0.664	-15.549	5.876	164.030	0.583
18	1/1/1990	12/31/1990	-126.222	- 133.316	- 399.201	-10.519	-329.705	15.167	0.108
19	1/1/1991	12/31/1991	-5.088	-18.845	- 128.603	-30.259	53.741	17.156	0.001
20	1/1/1992	12/31/1992	-5.268	-9.372	-55.264	14.889	6.789	22.611	0.031
21	1/1/1993	12/31/1993	-8.860	-24.025	- 125.506	-84.406	39.348	10.692	0.006
22	1/1/1994	12/31/1994	-41.612	-12.269	-14.848	124.240	-167.172	28.294	0.017
23	1/1/1995	12/31/1995	-81.761	-15.751	-12.836	203.092	-314.211	49.627	0.005
24	1/1/1996	12/31/1996	-32.669	-12.571	-10.735	171.226	-200.300	46.052	0.017
25	1/1/1997	12/31/1997	-202.060	-38.205	-63.565	126.067	- 1,118.254	76.025	0.064

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO POR ANO – Estação 36580000- Morada Nova (1ª Simulação)									
EVENTO	DATA 1	DATA 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	PEPF	RMSE	R2
			0.208	0.229	0.042	0.333			0.271
26	1/1/1998	12/31/1998	-21.070	-63.707	- 411.432	-97.223	88.945	12.977	0.138
27	1/1/1999	12/31/1999	-2.899	-7.933	-66.342	-40.064	-0.368	13.096	0.043
28	1/1/2000	12/31/2000	-9.363	-11.789	-28.348	-12.631	-20.844	6.802	0.102
29	1/1/2001	12/31/2001	-5.911	-3.348	-4.179	73.313	-2.354	4.893	0.137
30	1/1/2002	12/31/2002	-6.028	-5.250	-4.422	295.600	-24.501	41.654	0.119
31	1/1/2003	12/31/2003	-91.719	-25.812	-20.778	192.312	-262.242	26.227	0.047
32	1/1/2004	12/31/2004	-0.018	0.622	0.163	-18.390	-80.988	216.312	0.294
33	1/1/2005	12/31/2005	-47.266	-28.046	-83.406	16.447	-215.351	24.636	0.030
34	1/1/2006	12/31/2006	-1.712	-5.370	-36.249	-16.188	53.820	19.292	0.002
35	1/1/2007	12/31/2007	-0.716	-3.239	-27.402	-44.883	71.732	15.194	0.002
36	1/1/2008	12/31/2008	-14.986	-4.663	-14.263	164.527	-205.082	66.107	0.355
37	1/1/2009	12/31/2009	0.629	0.816	0.202	-32.940	16.840	138.127	0.673
38	1/1/2010	12/31/2010	-13.075	-11.112	-49.109	56.710	-123.083	37.065	0.111
39	1/1/2011	12/31/2011	-295.202	-60.296	-35.112	304.413	-835.171	45.047	0.052
40	1/1/2012	12/31/2012	-9.763	-32.234	- 250.037	-99.378	98.650	8.433	0.468
41	1/1/2013	12/31/2013	-4.327	-12.112	-90.220	-3.950	43.945	18.196	0.001
42	1/1/2014	12/31/2014	-1.750	-7.000	-65.369	-7.657	44.792	12.567	0.046
43	1/1/2015	12/31/2015	-0.299	-0.459	-3.327	10.695	86.900	7.842	0.000
44	1/1/2016	12/31/2016	#DIV/0!	#DIV/0!	#NÚM!			2.474	
45	1/1/2017	12/31/2017	-41.137	-6.490	-13.544	1,144.161	-91.923	24.331	0.084
46	1/1/2018	12/31/2018	-11.449	-2.428	-1.749	741.567	-99.030	70.508	0.479
47	1/1/2019	12/31/2019	-1.702	-0.835	-3.883	250.708	43.514	7.694	0.113
48	1/1/2020	12/31/2020	-75.863	-9.624	-14.559	1,337.561	-152.511	21.594	0.225
49	1/1/2021	6/30/2021	- 2,647.879	-57.613	-10.147	4,476.917	- 3,639.976	23.706	0.689

INDICADORES DE EFICIÊNCIA DO MODELO POR ANO – Estação 36580000- Morada Nova (2ª Simulação)									
EVENTO	DATA 1	DATA 2	NSE	NSE RAIZ	NSE LOG	Pbias	PEPF	RMSE	R2
			0.244	0.289	0.200	0.333			0.422
1	10/5/1977	12/31/1977	-4.462	-2.052	-4.267	80.316	-33.886	2.653	0.612
2	1/1/1978	12/31/1978	0.309	0.663	0.791	-13.080	11.689	92.063	0.353
3	1/1/1979	12/31/1979	0.307	0.549	0.585	-52.008	72.501	32.266	0.530
4	1/1/1980	12/31/1980	0.866	0.905	0.407	-1.990	-14.621	65.271	0.910
5	1/1/1981	12/31/1981	0.696	0.782	-0.881	-9.688	36.429	130.392	0.726
6	1/1/1982	12/31/1982	-0.337	-1.199	-7.003	23.307	2.608	31.691	0.528
7	1/1/1983	12/31/1983	- 12.070	-4.404	-6.725	149.469	- 357.681	49.628	0.205
8	1/1/1984	12/31/1984	- 15.799	-1.876	-0.647	362.093	- 244.925	332.507	0.853
9	1/1/1985	12/31/1985	0.687	0.821	0.825	-16.397	19.915	471.568	0.694
10	1/1/1986	12/31/1986	0.124	0.640	0.424	21.931	-28.479	194.340	0.549
11	1/1/1987	12/31/1987	-0.133	0.418	-1.891	14.984	-50.117	100.440	0.635
12	1/1/1988	12/31/1988	0.438	0.393	-3.445	-57.775	60.353	97.474	0.629
13	1/1/1989	12/31/1989	0.797	0.819	-0.625	-32.984	22.407	197.636	0.824
14	1/1/1990	12/31/1990	-0.573	-1.131	-5.060	-54.380	-15.966	51.912	0.115
15	1/1/1991	12/31/1991	-2.148	-2.209	-11.645	9.634	-48.814	34.400	0.398
16	1/1/1992	12/31/1992	-8.569	-2.145	-5.689	118.069	- 173.761	122.694	0.638
17	1/1/1993	12/31/1993	-3.175	-10.322	-43.451	-82.804	60.707	14.350	0.000
18	1/1/1994	12/31/1994	- 15.097	-3.910	-2.528	168.212	- 367.924	101.225	0.256
19	1/1/1995	12/31/1995	-0.623	-0.065	-0.205	76.997	-25.488	109.106	0.431
20	1/1/1996	12/31/1996	0.470	0.337	-0.634	-2.474	14.566	106.462	0.584
21	1/1/1997	12/31/1997	-1.473	-0.739	-1.611	49.609	-7.146	81.584	0.152
22	1/1/1998	12/31/1998	-2.976	-10.114	-60.625	-99.157	99.476	19.114	0.070
23	1/1/1999	12/31/1999	-3.798	-2.279	-13.135	22.774	- 165.150	81.478	0.293
24	1/1/2000	12/31/2000	-2.101	-0.995	-1.247	131.345	-27.899	139.435	0.207
25	1/1/2001	12/31/2001	- 12.200	-7.276	-13.479	39.311	- 258.922	36.057	0.122
26	1/1/2002	12/31/2002	-2.219	-0.531	0.330	86.094	-14.694	87.429	0.044
27	1/1/2003	12/31/2003	0.127	0.360	-0.334	-72.212	90.157	60.577	0.435
28	1/1/2004	12/31/2004	0.515	0.767	0.771	-29.129	22.391	223.548	0.584
29	1/1/2005	12/31/2005	-0.638	-0.582	-2.012	54.793	-25.382	39.822	0.372
30	1/1/2006	12/31/2006	-0.106	0.042	-0.073	-25.738	54.365	71.237	0.061
31	1/1/2007	12/31/2007	- 10.021	-1.458	-0.193	255.594	- 214.661	64.096	0.601

32	1/1/2008	12/31/2008	0.028	0.685	0.769	-4.368	-16.137	257.380	0.408
33	1/1/2009	12/31/2009	-1.078	0.385	0.571	34.919	- 125.171	370.690	0.309
34	1/1/2010	12/31/2010	0.146	0.136	0.028	12.051	7.564	23.526	0.415
35	1/1/2011	12/31/2011	0.553	0.746	0.608	-39.903	51.589	77.276	0.665
36	1/1/2012	12/31/2012	-3.561	0.116	0.478	53.968	- 120.495	47.174	0.295
37	1/1/2013	12/31/2013	-2.226	-1.065	-0.063	86.560	-50.990	34.366	0.005
38	1/1/2014	12/31/2014	0.463	0.590	0.512	7.962	36.392	23.727	0.476
39	1/1/2015	12/31/2015	-1.235	-0.095	0.325	93.411	-23.676	10.626	0.396
40	1/1/2016	12/31/2016	-0.128	-0.221	-0.078	-65.185	91.153	14.794	0.006
41	1/1/2017	12/31/2017	0.058	0.216	0.130	24.812	17.845	17.199	0.328
42	1/1/2018	12/31/2018	0.359	0.524	0.478	76.993	-42.565	37.028	0.738
43	1/1/2019	12/31/2019	0.458	0.372	0.404	70.436	25.558	13.785	0.558
44	1/1/2020	12/31/2020	0.576	0.839	0.851	-17.583	45.039	94.430	0.602
45	1/1/2021	6/30/2021	-3.060	-0.529	0.126	51.804	-58.822	82.614	0.096

ANEXO A - MODELO CAMPUS AGRESTE *WATERSHED MODEL* – CAWM IV

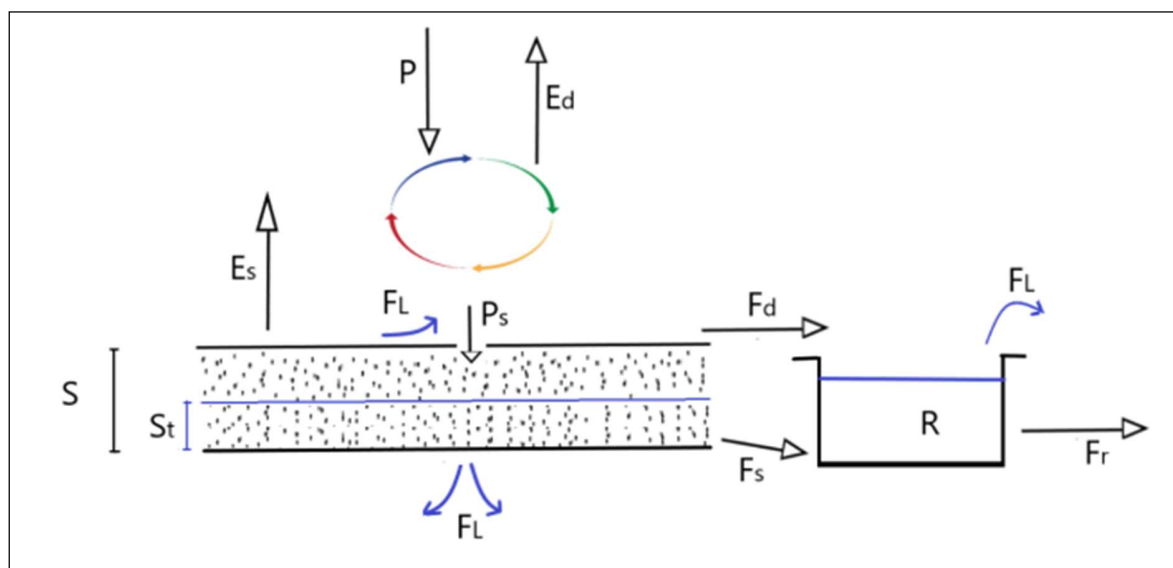
MEMORIAL DE CÁLCULO

Para o início das simulações, é necessário inserir os dados da área da bacia ou sub-bacia de interesse em km^2 , a declividade do rio principal S_0 em metro por metro, o comprimento da rede de drenagem L_t em metro, as séries de dados de precipitação média diária (mm), das vazões (m^3s^{-1}) medidas na estação fluviométrica ou ponto de saída analisado e de evapotranspiração (mm), estes obtidos do site do INMET. As séries de dados de precipitação, vazão e evapotranspiração devem estar no mesmo intervalo das datas de início e fim das observações. A chuva média é calculada através do Método IDW (*Inverse Distance Weighted*, ou Inverso da Distância Ponderada, em português). Essas séries são inseridas em arquivos .csv ou .txt em planilha habilitada para macros do Excel.

Com a perda de dados de postos pluviométricos e a histórica construção de barragens para realocação temporal da água nas regiões semiáridas, é importante a observação dessas influências nos resultados, considerando, por exemplo, a possibilidade de comparação da modelagem anteriormente à data de construção dos reservatórios de volumes mais significativos como forma de observar distorções no regime de escoamento.

A Figura 1 demonstra conceitualmente a estrutura do modelo, suas variáveis, parâmetros calibráveis e compartimentos referentes a cada etapa do ciclo hidrológico: precipitação, evapotranspiração, interceptação pela cobertura vegetal, armazenamento, infiltração e escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo.

Figura 1. Representação esquemática do modelo hidrológico CAWM, versão IV.



S: Capacidade máxima de retenção de água no solo (mm); St: Capacidade máxima de retenção de água no instante t (mm); Es: Evaporação suplementar (mm); Ed: Evaporação direta (mm); P: Precipitação (mm); Ps: Capacidade de recarga de água no solo (mm); FL: Perdas de água (mm); Fd: Escoamento direto (mm); Fs: Escoamento subsuperficial (mm); Fr: Escoamento na calha fluvial (mm); R: Acumulação de água no reservatório das calhas fluviais (mm/km²).

Fonte: CIRILO *et al.* (2021).

Na simulação com o modelo CAWM IV se conta com dois reservatórios: o da calha fluvial e o do solo. Este último considerado de pequena espessura, característica dos solos desenvolvidos sobre embasamento cristalino, típicos das regiões semiáridas nordestinas. A capacidade de infiltração até o reservatório do solo é um importante parâmetro e é representada por S . Este parâmetro está presente em inúmeros modelos e é oriundo dos estudos do Serviço de Conservação dos Recursos Naturais (NRCS, sigla em inglês), anteriormente conhecido como Serviço de Conservação dos Solos (SCS), dos Estados Unidos.

No CAWM IV, calcula-se o S com base nas características e tipologia dos solos classificados em mapeamentos da EMBRAPA e também na análise do uso e ocupação do solo com base em mapeamento desenvolvido pelo IBGE. O cálculo pode ser realizado a partir da exportação das informações de CN, S e respectivas áreas, informações constantes de arquivos vetoriais, ou *shapefiles*, correspondentes no Qgis, podendo ser obtidos do site da EMBRAPA. O *Curve Number* (CN), ou Número de Escoamento, é um

valor tabelado adimensional que representa a capacidade de geração de escoamento superficial direto em diferentes superfícies, obtido empiricamente através de dados de observação de áreas monitoradas pelo NRCS, sendo largamente utilizado em ciências ambientais. Como esse valor muda no espaço, deve-se fazer uma média ponderada com os fatores de área de cada bacia, como demonstrado na Equação (1).

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

Em que a_i é a área de cada unidade com mesmo valor de CN; A é a área total da bacia; cn_i é o Número de Escoamento de cada unidade de área i e; CN é o Número de Escoamento final. A partir desse resultado, pode-se calcular o parâmetro S (mm), com base na Equação (2).

$$S = \frac{24.500}{CN} - 254 \quad (2)$$

Após a saturação do solo (capacidade S), toda a água precipitada passa a representar escoamento subsuperficial e superficial direto, alimentando as calhas dos rios. Este parâmetro se relaciona com a umidade do solo e sua equivalência em milímetros de água. Solos mais porosos, sem atividades antrópicas, armazenam mais água do que solos argilosos ou que já foram modificados, compactados e impermeabilizados pela ocupação humana.

Da precipitação, é subtraída primeiramente a evapotranspiração direta, parâmetro E_d . Caso a chuva não seja suficiente para suprir toda a evapotranspiração potencial da área, ocorre um débito hídrico correspondendo a uma evapotranspiração não atendida E_n . Precipitações intensas implicam em esgotamento da evapotranspiração potencial (E), sendo o débito, em seguida, descontado da evapotranspiração das plantas e da camada de água mais exposta da superfície. O restante é considerado precipitação efetiva (P_n). Essa dinâmica depende da disponibilidade hídrica. Todas essas variáveis são calculadas em mm.

Esse primeiro balanço referente à precipitação e evapotranspiração é traduzido pelas seguintes expressões (3) e (4):

$$\text{Se } P \geq E, \text{ então } P_n = P - E \quad (3)$$

$$\text{Se } P \leq E, \text{ então } E_d = P \text{ e } E_n = E - P \quad (4)$$

A precipitação efetiva divide-se em três componentes, conforme conceito desenvolvido por Edijatno e Michel (1989, *apud* CIRILO, 2020, p. 4), sendo calculada pela seguinte Equação 5:

$$P_s = \frac{S \times \left[1 - \left(\frac{S_t}{S} \right)^2 \right] \times \tanh \left(\frac{P_n}{S} \right)}{1 + \frac{S_t}{S} \tanh \left(\frac{P_n}{S} \right)} \quad (5)$$

Sendo S_t (mm) a acumulação de água no solo a cada instante t , S a capacidade máxima de retenção e P_s (mm) uma variável utilizada no modelo hidrológico GR4J que representa a recarga do solo (PERRIN; MICHEL; ANDRÉASSIAN, 2003).

Desde que haja água disponível, da evapotranspiração não atendida (E_n) desconta-se uma evapotranspiração suplementar (E_s) cuja magnitude depende de um fator representado por um expoente α , Equação 6. Esse parâmetro adimensional provém das incertezas geradas pela variabilidade climática, das características do solo e da cobertura vegetal na área total da bacia.

$$E_s = \left(1 - e^{-\frac{\alpha S_t}{S}} \right) \times E_n \quad (6)$$

O escoamento direto, representado por F_d (mm), desde que o saldo seja positivo, é calculado conforme Equação 7.

$$F_d = P_n - P_s - E_s \quad (7)$$

O fluxo subsuperficial F_s (mm) ocorre no reservatório de água no solo e percola até alimentar o volume das calhas fluviais, parâmetro R , como apresentado na Equação 8.

$$F_s = K_s \times S_t \quad (8)$$

Sendo K_s (adimensional) o parâmetro de permeabilidade do solo, calibrável, e F_s (mm) a percolação horizontal na subsuperfície no sentido da calha fluvial, onde o volume retido também é alimentado por F_d (mm). A cada instante é realizado o balanço hídrico. O reservatório do solo é considerado de armazenamento linear, consideração mais clássica de diversos modelos hidrológicos. Já na calha fluvial, o escoamento F_r (mm) é considerado como uma função não linear do volume armazenado R , Equação 9, sendo b uma constante originada da fórmula de Manning, utilizada para cálculo de escoamentos

em superfícies livres e K um parâmetro adimensional dependente das características da bacia.

$$F_r = K \times R^b \quad (9)$$

Se a capacidade de armazenamento do conjunto de rios que formam a bacia for considerada como correspondente ao volume do reservatório da calha fluvial, o produto da extensão total dos comprimentos dos cursos d'água L_t (m) pela área de seção equivalente A_e (m²) resulta no volume superficial (m³), exposto na Equação 10.

$$V_{sup} = A_e \times L_t \quad (10)$$

Nos modelos hidrológicos, geralmente os volumes estão em unidades de milímetros por unidade de área em km², sendo a acumulação R calculada de acordo com a Equação 11.

$$R = \frac{V_{sup}}{c \times A_b} = \frac{A_e \times L_t}{c \times A_b} \quad (11)$$

Onde $c = 1000$ é uma constante para compatibilização de unidades.

Considerando as simplificações da seção da calha fluvial B_e (m) na forma retangular, com trecho de extensão L_t (m) e declividade S_0 (m/m), equacionado com base na equação de Manning, e o raio hidráulico como sendo da altura da lâmina de água escoada ($R_h = y$), podemos calcular a vazão (m³ s⁻¹) como descrito na Equação 12.

$$Q = \frac{1}{n} \times A_e \times R_h^{2/3} \times S_0^{1/2} \cong \frac{1}{n} \times \frac{A_e^{5/3}}{B_e^{2/3}} \times S_0^{1/2} \quad (12)$$

Transformando o volume acumulado em um trecho de rio no produto de sua extensão L_t com área da seção transversal equivalente A_e , substituindo em (12), obtemos a Equação 13.

$$Q = \frac{S_0^{1/2}}{n \times L_t^{5/3} \times B_e^{2/3}} \times V^{5/3} = K^* \times V^{5/3} \quad (13)$$

Por questão de similaridade, a Equação 13 sugere o expoente $b = 5/3$, correspondendo à formulação da Equação 9. A Equação 14 corresponde à relação entre vazão e lâmina escoada, onde Δt é o passo de tempo em segundos:

$$Q = \frac{F_r \times c \times A_b}{\Delta t} \quad (14)$$

Conjuminando a Equação 14 com a Equação 12, chegamos à Equação 15.

$$\frac{F_r \times c \times A_b}{\Delta t} = \frac{1}{n} \times \frac{A_e^{5/3}}{B_e^{2/3}} \times S_o^{1/2} \quad (15)$$

Explicitando o termo da área de seção equivalente A_e da Equação 9 e substituindo na Equação 15, obtemos a Equação 16.

$$A_e = \frac{c \times A_b \times R}{L_t} \quad (16)$$

As Equações 15 e 16 resultam na Equação 17.

$$\frac{F_r \times c \times A_b}{\Delta t} = \frac{1}{n} \times \left(\frac{c \times A_b \times R}{L_t} \right)^{5/3} \times \frac{S_o^{1/2}}{B_e^{2/3}} \quad (17)$$

Finalmente, considerando a Equação 9 e o expoente $b = 5/3$, temos o parâmetro K , adimensional, que se relaciona com os dados físicos de cada bacia, calculado pela Equação 18:

$$K = \frac{\Delta t}{n} \times \left(\frac{c^2 A_b^2}{B_e^2 \times L_t^5} \right)^{1/3} \times S_o^{1/2} \quad (18)$$

Conquanto todas as simplificações matemáticas realizadas, o expoente $b = 5/3$ vem se mostrando adequado nas simulações de dezenas de bacias, com desempenho satisfatório conforme Cirilo *et al.* (2020). Os resultados para calibração do parâmetro K_s continuam sendo avaliados em diversas aplicações e observa-se um bom ajuste entre os valores 0,01 e 0,1, podendo ser inicialmente usado como *default* o valor de 0,025. De acordo com Cirilo *et al.* (2020), este é o parâmetro de mais difícil regionalização. A área de seção retangular da calha fluvial, da mesma forma, vem mostrando-se bem ajustada com valores de B_e entre 2 e 5.

O parâmetro F_L (Figura 1) representa perdas de água que podem tanto advir da evaporação nas cavidades do solo, extravasamentos na calha fluvial, infiltração nas fendas do embasamento cristalino, além da retenção de água pela vegetação e subsequente evapotranspiração. Todas as perdas são descontadas do reservatório da calha fluvial, como forma de simplificação.

Para o cálculo das perdas (mm), é utilizada a Equação 19.

$$F_L = K_L \times R^p \quad (19)$$

Se os cursos d'água possuem muitos extravasamentos, o expoente p , cujo *default* é 1, resultando em uma relação linear, pode ser considerado maior ou menor, de forma a representar melhor as perdas. Este expoente mostrou-se bem ajustado com valores no intervalo entre 1 a 2. O parâmetro K_L passou a ser obtido a partir de um balanço hídrico de longo prazo através de uma simulação realizada antes da calibração do modelo (CIRILO, 2022), restando apenas o parâmetro calibrável K_s , que representa o coeficiente de escoamento subsuperficial como uma constante de permeabilidade horizontal.

Para bacias com declividade muito acentuada, deve-se buscar uma faixa de valores de K_s diferente do intervalo de 0,01 e 0,1. Se o rio principal possuir declividades muito altas, o valor desse parâmetro geralmente deve ser mais elevado. Caso isso aconteça, é recomendada a exclusão dos trechos de maior declive no curso do rio no cálculo de S_0 .

Em relação ao comprimento da rede de rios, esse parâmetro depende da precisão dos arquivos MDT obtidos e da densidade de drenagem da bacia. Em estudos mais recentes, o CAWM, em sua versão V, foi utilizado em bacias de grande extensão, como a do Parnaíba, tendo como valor de referência 0,001, ou seja, dez vezes menor (SOUSA *et al.*, 2020).

Para bacias de grande extensão, em modelos concentrados, é necessário considerar o *lagtime* do tempo de concentração da bacia maior que 1 dia. Neste modelo, é utilizado o Hidrograma Tempo-Área (HTA) pelo método de Clark, mas Hidrogramas Unitários (HU) também podem ser empregados. Existem tentativas de se utilizar chuvas distribuídas em modelos concentrados, mas ainda sem maior consolidação. O modelo CAWM realiza a redistribuição de chuva no tempo, sendo ideal o uso de isócronas referentes à distância de cada posto do rio principal para estimar a defasagem temporal do percurso do escoamento na bacia.

Durante a modelagem, deve-se atentar para certas observações, como o efeito do parâmetro de evapotranspiração α . Se no balanço hídrico a evapotranspiração real esteja subestimada, deve-se majorá-lo. Se a vazão calculada estiver acima da vazão observada, existem perdas não computadas e deve-se promover novos ajustes.

Em relação aos picos de vazões sem a devida representação no cálculo, é possível que possa ter ocorrido a abertura de comportas de barragens para liberação de

excessos volumétricos. Em eventos de precipitações intensas, alguns equipamentos podem ter sido destruídos e as medições se mostrarem desreguladas. Deve-se observar o balanço hídrico inicial para checar se este está compatível com os cálculos, como realizado por Virões e Cirilo (2019).

Da mesma forma, deve-se verificar a existência de grandes afluentes no entorno das barragens em estudo, pois estas vazões podem contribuir nos escoamentos que chegam nos reservatórios sem estarem na área demarcada a montante da bacia. Outros parâmetros de inicialização que devem ser ajustados através de observações do comportamento inicial da simulação são as reservas de água superficial e subterrânea iniciais no solo e na calha fluvial, além do valor de 0 para rios temporários e de 1 para rios perenes, valores que influenciam nos cálculos.

A escolha dos períodos de calibração no CAWM deve observar o período de dados disponíveis. Quando se dispõe de poucos dados, esse período deve ser reduzido, porém, quanto maior o período para calibração, melhor os ajustes serão replicados para o período de verificação dos dados.

Os resultados obtidos pelo CAWM IV são fornecidos em gráficos, tabelas e através dos valores dos indicadores de eficiência estatísticos utilizados. No Apêndice A (p. 138), pode-se visualizar a planilha de entrada, onde estão dispostas células para a inserção das informações físicas da bacia e, logo abaixo, dos dados com as séries de entrada para os cálculos, assim como a apresentação dos resultados da modelagem graficamente e os resultados nas planilhas de cálculo de saída.

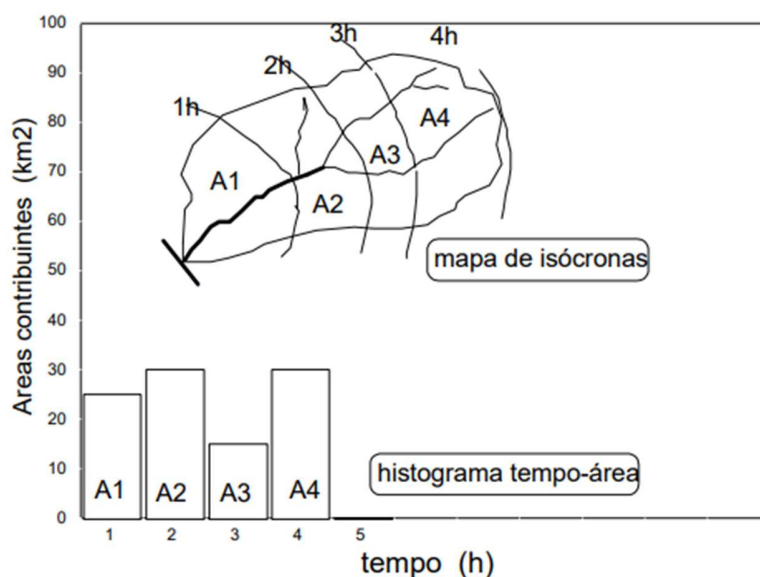
Hidrograma Tempo-Área de Clark

A escassez de dados pluviométricos frequentemente é um fator limitante na modelagem hidrológica, sendo necessário métodos de cálculo indireto complementares na transformação da precipitação em vazão, a partir de conhecimentos climáticos e geomorfológicos da bacia. Um exemplo de método de cálculo indireto são os Hidrogramas Unitários Sintéticos (HUS) de forma a ajustar o tempo de concentração da chuva média em bacias de grande extensão.

Nesta pesquisa, foi presumido que em bacias com extensão superior a 10.000 km² o tempo de concentração do percurso do escoamento da chuva média até o exutório é maior que o passo de tempo diário, sendo necessário aplicar ajustes. Esse procedimento visa representar melhor a irregularidade da distribuição espacial das precipitações em regiões semiáridas, como as do nordeste brasileiro, dado que precipitações localizadas em regiões próximas do exutório da bacia conferem respostas mais rápidas à medição do escoamento, conquanto precipitações que ocorrem em áreas mais afastadas apenas passarão a contribuir com a vazão de saída com uma defasagem de tempo que deve ser considerada para incremento dos resultados da modelagem.

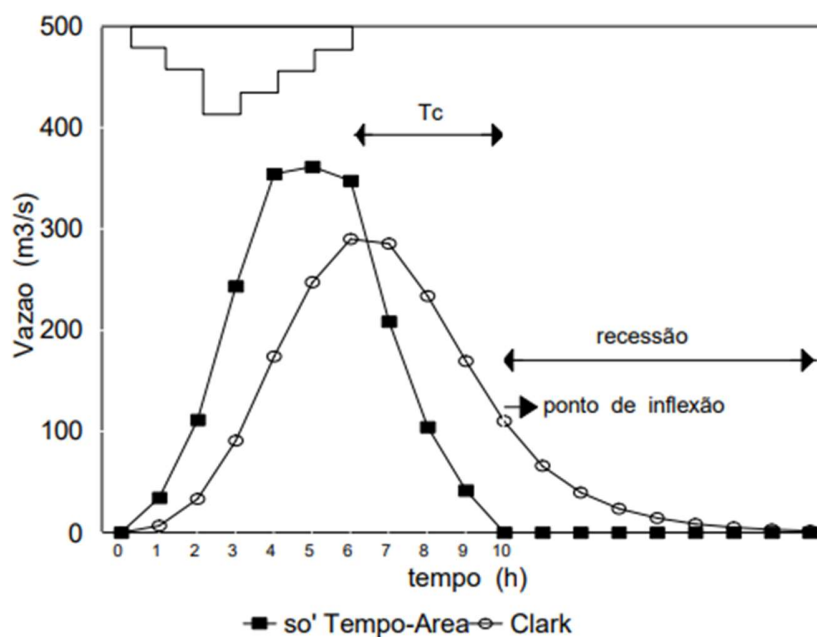
Dessa forma, o modelo CAWM utiliza o Hidrograma Tempo-Área (HTA) pelo método de Clark, o qual considera os efeitos de translação e armazenamento da vazão combinando um histograma tempo-área com um reservatório linear, situado na saída da bacia, e cuja constante K representa o amortecimento do hidrograma, como demonstrado nas Figuras 2 e 3.

Figura 2. Isócronas e Histograma Tempo-Área.



Fonte: ALLASIA (2002, p. 16).

Figura 3. Hidrogramas com e sem amortecimento da chuva média.



Fonte: ALLASIA (2002, p. 16).

Através do cálculo da relação entre os volumes e as vazões nos reservatórios representativos (Equação 20) com tempo de concentração com e sem amortecimento, temos:

$$V_2 - V_1 = K(Q_2 - Q_1) = \left(\frac{I_1 + I_2}{2}\right) \Delta t \left(\frac{Q_1 + Q_2}{2}\right) \Delta t \quad (20)$$

Isolando a variável Q_2 e eliminando a expressão $V_2 - V_1$, obtemos a Equação 21.

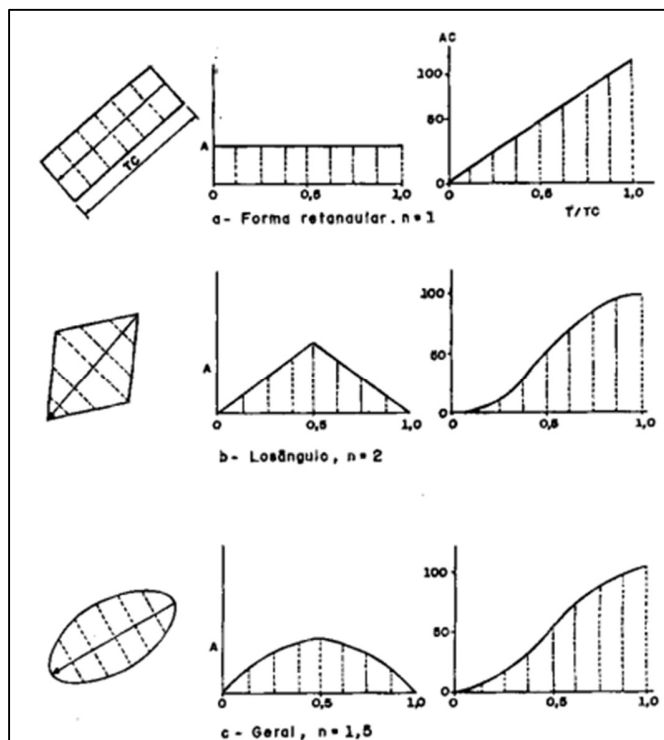
$$Q_2 = Q_1 + C(I_1 + I_2 - 2Q_1) \quad (21)$$

Onde I corresponde à vazão de entrada, Q à vazão de saída e C é calculado conforme a Equação 22.

$$C = \frac{\Delta t}{2K + \Delta t} \quad (22)$$

Através de uma função de potência para expressar o HTA e utilizando relações geométricas para formas de bacias, o *Hydrological Engineering Corps* (ALLASIA, 2002, p. 17) dos Estados Unidos relacionou o tempo de concentração em cada fator de forma de acordo com as seguintes relações empíricas constantes na Figura 4.

Figura 4. Valores do expoente n de acordo com a forma da bacia.



Fonte: HEC (ALLASIA, 2002, p. 17).

As ordenadas do HTA redistribuem a chuva média no tempo, antes da transformação da precipitação em vazão, conforme as Equações 23, 24 e 25.

$$A_c = at^n; 0 \leq 0,5t_c \quad (23)$$

$$A_c = 1 - a(1 - t)^n; 0,5 \leq t \leq t_c \quad (24)$$

$$a = \frac{0,5}{\left(\frac{t_c}{2}\right)^n} \quad (25)$$

Em que A_c é a área de contribuição acumulada já dividida pela área total; t é o tempo em unidades de concentração t_c e; n é o coeficiente que corresponde à forma da bacia. A estimativa do tempo de concentração é realizada pela fórmula do *US Corps of Engineers*, geralmente aplicada para bacias de até 12.000 km² em áreas rurais (MAMÉDIO; CASTRO; CORSEUIL, 2018), Equação 26.

$$t_c = 0,191 \frac{L^{0,76}}{S^{0,19}} \quad (26)$$

Em que t_c é o tempo de concentração, L e S o comprimento e a declividade do rio principal, respectivamente.

Dessa forma, o cálculo da defasagem do tempo de concentração pode ser simplificado sem a necessidade do uso de isócronas que demandam grande quantidade de dados e por ainda não se dispor de um processo automatizado desse método.

Indicadores estatísticos de eficiência do modelo hidrológico CAWM

Em relação aos indicadores estatísticos de medição da performance de modelos hidrológicos, o de Nash-Sutcliffe (NSE) é o principal, ajustando bem as vazões mais altas, enquanto suas variações, tanto NSE da raiz quadrada quanto o NSE logarítmico (NSE_{SQRT} e NSE_{LOG}), ajustam melhor as vazões médias e baixas, nessa ordem (TRAORE *et al.*, 2014).

O indicador Pbias (percentual de tendência) corresponde ao quanto as vazões medidas estão diferentes das vazões calculadas em volume. Outros indicadores são mantidos de forma a se obter uma análise estatística sistemática que apresente tanto a correlação linear entre os dados simulados e medidos (por exemplo, o coeficiente de determinação R^2), como técnicas adimensionais que permitem avaliar relativamente modelos preditivos, como os coeficientes de Nash, e índices de erro (como o RMSE e o MAE), quantificando o desvio acumulado em unidades para informações de interesse.

Essa metodologia de análise de eficiência da simulação é baseada no trabalho de Moriasi *et al.* (2007), o qual buscou definir critérios padronizados para estabelecer um sistema comum de análise de desempenho de modelos hidrológicos, possibilitando comparar diversos modelos. O critério desenvolvido pelo autor relaciona os indicadores recomendados para classificação em: Muito bom; Bom; Satisfatório e; Insuficiente, conforme Tabela.

Tabela 1. Valores recomendados de performance para simulações mensais.

Performance	NSE	Pbias	RSR
Muito bom	0,75 a 1,00	$< \pm 10$	0 a 0,5

Bom	0,65 a 0,75	± 10 a ± 15	0,5 a 0,6
Satisfatório	0,5 a 0,65	± 15 a ± 25	0,6 a 0,7
Insuficiente	<0,5	$> \pm 25$	>0,7

FONTE: Adaptado de Moriasi *et al.* (2007).

Conforme Moriasi *et al.* (2007), as simulações geralmente são mais restritivas ao serem formuladas com passo de tempo diário em comparação com intervalos semanais, mensais ou anuais. Enquanto valores de R^2 de 0,5 foram encontrados em simulações diárias de transporte de sedimentos, em simulações mensais com os mesmos dados esse coeficiente passou para 0,70. Em calibrações diárias e mensais com utilização do modelo DRAINMOD-DUFLOW, valores de NSE obtidos foram de 0,395 e 0,656, assim como na validação os valores de NSE obtidos foram 0,457 e 0,857, respectivamente. O autor ressalta que os valores dos indicadores estatísticos devem ser ajustados adequadamente para simulações realizadas com dados diários, adotando como satisfatórios valores de NSE acima de 0,36 e, à medida que o passo de tempo aumenta, as classificações devem ser mais rigorosas (MORIASI *et al.*, 2007).

O indicador RMSE, espécie de desvio padrão dos erros da simulação, pode ser obtido através da Equação 27. O indicador MAE, ou Erro Médio Absoluto, é demonstrado na Equação 28. A diferença entre essas duas medições de erros está na potência ao quadrado na diferenciação entre a variável observada e calculada para obtenção do RMSE, o que torna os efeitos de *outliers* bem maiores, enquanto o MAE estabelece menores variações para erros de maiores dimensões. Ou seja, quanto maior a série de dados, maior a tendência do RMSE ser maior que o MAE. Ambos os indicadores variam entre 0 e $+\infty$, indicando a magnitude do erro, não a direção.

O percentual de tendência Pbias é calculado através da Equação 29. A relação entre o erro médio quadrático e o desvio padrão dos dados (RSR) é apresentada na Equação 30 e, por fim, o coeficiente NSE e variações NSE_{SQRT} e NSE_{LOG} encontram-se nas Equações 31, 32 e 33.

$$RMSE = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - Q_{i,calc})^2 \right]^{1/2} \quad (27)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_{i,obs} - Q_{i,calc}| \quad (28)$$

$$Pbias = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{calc(i)} - Q_{obs(i)}) \times 100}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs(i)})} \right] \quad (29)$$

$$RSR = \left| \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - Q_{i,calc})^2 \right]^{1/2}}{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \right]^{1/2}} \right| \quad (30)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - Q_{i,calc})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (31)$$

$$NSE_{SQRT} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{i,obs}} - \sqrt{Q_{i,calc}})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{i,obs}} - \sqrt{\overline{Q_{obs}}})^2} \quad (32)$$

$$NSE_{LOG} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log Q_{i,obs} - \log Q_{i,calc})^2}{\sum_{i=1}^n (\log Q_{i,obs} - \log \overline{Q_{obs}})^2} \quad (33)$$

Sendo n o número total de dados dos eventos; $Q_{i,obs}$ é a vazão observada no tempo i ; $Q_{i,calc}$, a vazão calculada no tempo i e; $\overline{Q_{obs}}$ é o fluxo médio observado no período. O coeficiente NSE e variações estão no intervalo entre $-\infty$ a 1 e quanto mais próximo de 1, melhor a performance do modelo.

Outro indicador amplamente utilizado em análises estatísticas é o coeficiente de determinação R^2 (Equação 34), medida da variância dos dados calculados e que se apresenta no intervalo de 0 a 1, sendo os valores próximos de 1 representativos dos melhores ajustes entre os dados observados e medidos. Valores superiores a 0,5 são considerados aceitáveis (GOLMOHAMMADI *et al.*, 2014).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - \overline{Q_{obs}}) (Q_{i,calc} - \overline{Q_{calc}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{i,calc} - \overline{Q_{calc}})^2}} \right] \quad (34)$$

No CAWM, é utilizada uma função objetivo que primeiramente maximiza a relação entre NSE e Pbias para o ajuste dos picos das vazões, a qual pode ser alterada para maximizar outros indicadores ou relações entre indicadores conforme se avança na

análise dos resultados. O método de otimização é o GRG Nonlinear do software Excel. O algoritmo genérico Evolutionary também pode ser utilizado, e vem trazendo bons resultados, apesar da modelagem não apresentar grau de complexidade tão elevado que exija sua utilização.

ANEXO B - CAMPUS AGRESTE *RESERVOIR OPERATION MODEL* – CAROS

MEMORIAL DE CÁLCULO

No modelo de operação de reservatórios CAROS, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pernambuco, o balanço hídrico é realizado através de adaptações do modelo clássico de Puls (CIRILO, 2021). Todas as variáveis que fazem parte do balanço hídrico, com passo de tempo diário, são computadas de acordo com a Equação 1. O balanço hídrico diário é dividido em 6 intervalos de 4 horas cada, já que o tempo de concentração das bacias analisadas era inferior a um dia. Dessa forma, o cálculo das vazões vertidas é prejudicado quando se considera $\Delta t = 1$ dia. Na falta de dados de entrada de vazão e precipitação subdiários, o modelo CAROS realiza interpolações lineares em relação aos volumes precipitados, evaporados, captados e afluentes a cada 4 horas.

$$V_{t+\Delta t} = V_t + I_t - V_{demanda} - E_t \cdot A_t + P_t \cdot A_t - VS_t \quad (1)$$

Em que:

$V_{t+\Delta t}$ = Volume no tempo $t + 1$;

V_t = Volume no início do intervalo de tempo t ;

I_t = Volume afluente ao reservatório no intervalo de tempo t ;

$V_{demanda}$ = Volume retirado de água;

E_t = Lâmina de evaporação no intervalo de tempo t ;

P_t = Precipitação na superfície do reservatório;

A_t = Área da superfície da água do reservatório no início do intervalo de tempo t ;

VS_t = Volume vertido no tempo t .

Para o bom funcionamento de um modelo voltado para operação de reservatórios, é necessária a disponibilização de dados para o dimensionamento de elementos técnicos que caracterizam a infraestrutura do sistema, como os dispositivos de descarga e a capacidade de captação de água. Estes dados são referentes a relações de cota-área-volume (CAV) atualizadas, séries históricas, cenários de vazões afluentes, precipitações e evaporação do espelho d'água.

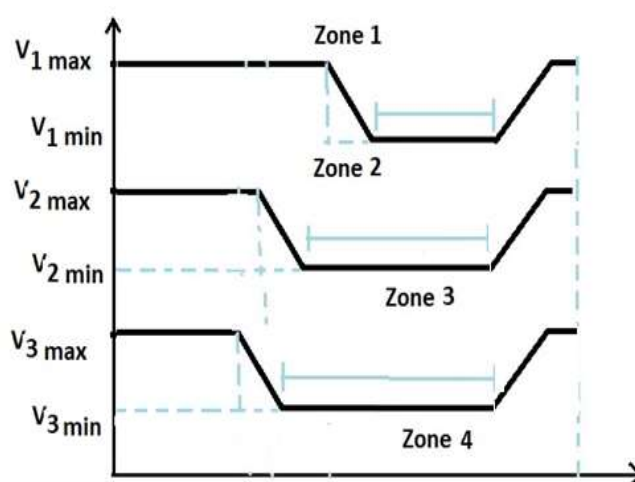
O primeiro passo para se formalizar regras para alocação de água é definir

objetivos para a operação com definição da vazão a ser liberada para atendimento das múltiplas demandas em função do estado atual de acumulação do reservatório ou sistema de reservatórios.

Nesta pesquisa, as séries históricas de precipitações e vazões foram obtidas do site da ANA, enquanto as taxas de evaporação foram obtidas através de dados de estações climatológicas do INMET.

O modelo CAROS se baseia no conceito de zoneamento da capacidade do reservatório para estabelecer suas regras de operação. A Figura 1 demonstra os limites superior, inferior e inferior extremo de armazenamento de água através das três curvas traçadas. A política operacional é definida pelo nível de acumulação no início de cada período considerado.

Figura 1. Curvas-guia do modelo CAROS.



Fonte: Cirilo (2021).

As variáveis de decisão a serem otimizadas para cada reservatório são: 1) vazão máxima a ser retirada; 2) percentual dos volumes máximo e mínimo que definem as regras de operação; 3) níveis de redução aplicados sobre a vazão máxima.

Para cada curva-guia, dois níveis de restrição são separados por um intervalo de transição. A maior ou menor duração desse intervalo depende do nível de acúmulo de água, em cada caso. Quanto mais crítico, maior será o tempo de restrição severa. As

regras consideram o ano hidrológico, ou seja, começam no início da estação das chuvas. São esses três conjuntos de informações primordiais para a construção do modelo de otimização simples para cada reservatório i . A Equação 2 representa a função a ser otimizada.

$$\text{Max } Z_i = QW_{med}^i \quad (2)$$

Onde Z_i representa a função a ser otimizada; QW_{med}^i é a média das vazões captáveis e calculadas diariamente no período da simulação/otimização. Em seguida, as Equações 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 demonstram o cálculo de algumas das variáveis de decisão:

$$Q_{trans} \leq QW_t^i \leq 0 \quad (3)$$

$$S_i^t \geq S_{i,min} \quad (4)$$

$$V_{col} \leq V_{3,min} \leq V_{3,max} \leq V_{2,min} \leq V_{2,max} \leq V_{1,min} \leq V_{1,max} \leq 1 \quad (5)$$

$$V_{k,max} / V_{k,min} \geq \delta, \quad k = 1,2,3 \quad (6)$$

$$f_{i,k} \geq 0, \quad k = 1,2,3,4,5,6,7 \quad (7)$$

$$f_{i,k} \leq 1, \quad k = 1,2,3,4,5,6,7 \quad (8)$$

$$ND_{i,k} \leq ND_{i,k,max} \quad k = 1,2 \quad (9)$$

Em que:

Q_{trans} = Capacidade de extração e transporte de água a partir do reservatório;

QW_t^i = Vazão retirada a qualquer momento;

S_i^t = Volume de armazenamento no reservatório no tempo t ;

$S_{i,min}$ = Volume mínimo do reservatório i , a partir do qual cessa a captação (sistema em colapso);

V_{col} = Fração da capacidade do reservatório que define a condição de colapso;

$V_{k,min}$ = Volume mínimo para a curva de operação k ;

$V_{k,max}$ = Volume máximo para a curva de operação k ;

δ = Razão mínima entre os volumes máximo e mínimo das curvas k ;

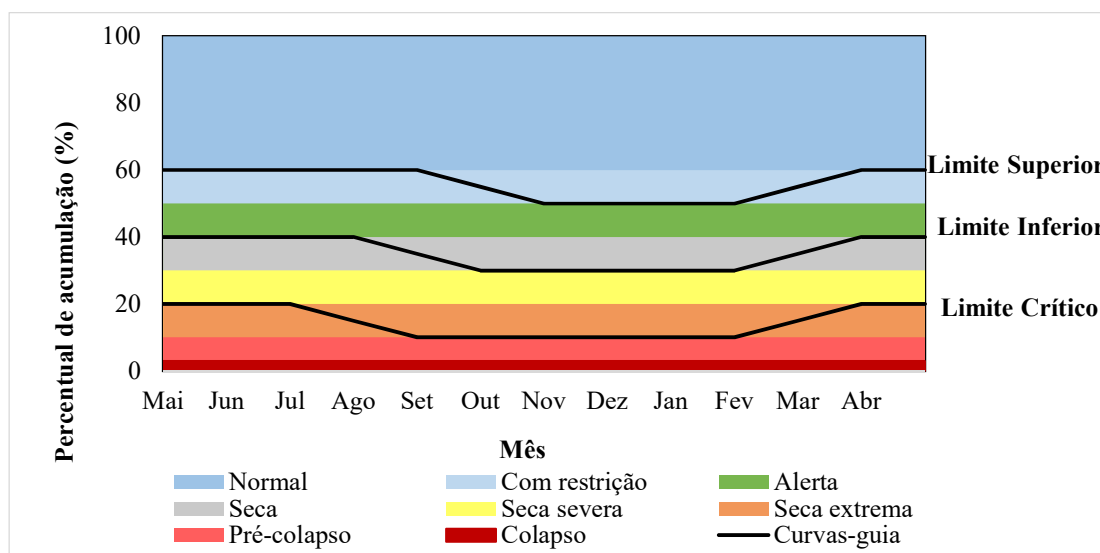
$f_{i,k}$ = Fatores de redução aplicados à vazão máxima que pode ser extraída do reservatório i , dependendo da porcentagem de acumulação;

$ND_{i,k}$ e $ND_{i,k \max}$ = Representações, respectivamente, do número de dias em que os reservatórios podem operar em regime de seca extrema e pré-colapso, conforme os limites estabelecidos na Equação 9.

A retirada de água do reservatório QW_t^i é limitada pelas regras de restrição a qualquer momento, respeitando a capacidade de transporte Q_{trans} da Equação 3. A Equação 5 visa limitar a operação do sistema a um armazenamento mínimo em que, abaixo deste nível, o reservatório é considerado como em estado de colapso. Já a Equação 9 visa restringir as porcentagens representadas pelas três curvas-guia, enquanto a Equação 6 determina uma distância entre as curvas considerando uma razão δ .

As Equações 7 e 8 determinam limites para os respectivos redutores de vazão retirada relacionados a cada curva-guia, incluindo $f_{i,7}$, o qual representa a situação em que o reservatório está na zona 4, acima de V_{col} (Figura 2). Esses redutores se aplicam à descarga máxima retirada $Q_{i,máx}$, sendo uma das variáveis de decisão juntamente a $V_{k,máx}$, $V_{k,mín}$, $f_{i,k}$, resultando em 14 variáveis de decisão a serem otimizadas para cada reservatório.

Figura 2. Faixas de variação da criticidade considerada em cada reservatório.



Fonte: Cirilo (2021).

Para a utilização do modelo CAROS, o usuário deve inserir como dados de entrada:

- Áreas de drenagem até a barragem e ao posto fluviométrico de referência, se for o caso;
- Capacidade de acumulação do reservatório;
- Cotas do vertedouro e do coroamento;
- Extensão do vertedouro;
- Coeficiente de descarga do vertedouro C . A vazão vertida é calculada pela equação $Q = CLH^{3/2}$, podendo ser modificada na planilha caso haja novas informações. Sendo L o comprimento do vertedouro e H a carga hidráulica, a qualquer tempo;
- Série com 12 dados mensais de evaporação de referência no local do reservatório, obtida das normais climatológicas do INMET, por exemplo;
- Coeficiente de correção da evaporação, se for o caso;
- Série de precipitações na área do reservatório, no mesmo período da série de vazões afluentes;
- Séries de vazões afluentes ao reservatório ou a um posto fluviométrico considerado. No segundo caso, as vazões serão consideradas proporcionais à relação entre a área de drenagem, no local da barragem e a do posto. No primeiro caso, essa relação deve ser considerada igual a 1;
- Fração indicadora do colapso do reservatório em relação a sua capacidade, como, por exemplo, 0,03 demonstrando que quando se atingir o mínimo de 3% da capacidade, o manancial é considerado em colapso;
- Quociente mínimo de afastamento entre as curvas-guia (δ);
- Vazão máxima possível de transporte/captação a partir do reservatório a qualquer tempo;
- Duração, em meses, do patamar de extração de vazões mais altas nas curvas-guia 1, 2 e 3. Pode-se estimar tempos menores à medida que o volume de água no reservatório é menor;
- Mês que indica o fim do período seco (por exemplo, 3 para março);
- Número de meses de transição entre o patamar de vazões mais altas e mais baixas em cada curva-guia (*default* = 1);

- Fração de volume de água presente no reservatório no primeiro dia da simulação (por exemplo, 0,3);

- Coeficientes de ajuste de equação polinomial de 4ª ordem para as curvas volume-área e volume-cota do reservatório (para esta última, admite-se a separação em duas equações para melhor ajuste, considerando um volume de referência como limite de separação entre ambas, ou seja, se o ajuste com uma única equação proporcionar resultado satisfatório, repete-se os coeficientes para as duas faixas). É recomendado extrapolar os dados obtidos considerando pontos além dos limites tabelados, mantendo a tendência das curvas de forma a evitar que a deflexão da equação ajustada ocorra na faixa de operação do reservatório, pois isso provoca erros no processo iterativo.

A otimização é realizada com um dos algoritmos GRG Nonlinear ou Evolutionary, oferecidos pelo suplemento Solver do Excel para modelos não-lineares, assim como no modelo CAWM IV.