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

ALEXSON CAETANO DA SILVA

O ESTRESSE HIDROLÓGICO COMO GUIA NO ATENDIMENTO À GARANTIA DA SEGURANÇA HÍDRICA

Recife
2023

ALEXSON CAETANO DA SILVA

O ESTRESSE HIDROLÓGICO COMO GUIA NO ATENDIMENTO À GARANTIA DA SEGURANÇA HÍDRICA

Tese apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Pernambuco para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo.

Coorientadora: Profª. Drª. Simone Rosa da Silva

Recife

2023

Catalogação na fonte

Bibliotecária Rosineide Mesquita Gonçalves da Luz, CRB-4 / 1361

S586e Silva, Alexson Caetano da.

O estresse hidrológico como guia no atendimento à garantia da segurança hídrica / Alexson Caetano da Silva. – 2023.

132p.: il., figs., tabs., abrev. e siglas.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo.

Coorientadora: Prof. Dra. Simone Rosa da Silva.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Recife, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia civil. 2. Segurança hídrica. 3. Estresse hidrológico. 4. Calibração automática. 5. Análise Estatistica de erro. 6. Bacia do Rio Goiana. I. Azevedo, José Roberto Gonçalves de (Orientador). II. Silva, Simone Rosa da (Coorientadora). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2023-163

ALEXSON CAETANO DA SILVA

O ESTRESSE HIDROLÓGICO COMO GUIA NO ATENDIMENTO À GARANTIA DA SEGURANÇA HÍDRICA

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Aprovada em: 23/maio/2023

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof.ª Dr.ª Leidjane Maria Maciel de Oliveira (examinadora interna)
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão (examinador externo)
Universidade Federal de Campina Grande

_____

Prof.ª Dr.ª Micaella Raíssa Falcão de Moura (examinadora externa)
Universidade Católica de Pernambuco

_____

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

_____

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

A Deus, à minha esposa, minha mãe, minha avó, irmãos e amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por tudo, sem Ele não poderia ter chegado até aqui e conseguido vencer mais esta etapa de minha vida.

A minha esposa Ruany, que é um pilar para a minha vida, está sempre presente em todos os momentos e que sempre acreditou que chegaria até aqui, mesmo quando duvidei e pensei em desistir.

A minha mãe pelo apoio e que através do suor do seu trabalho me fez o homem que sou hoje. Pela minha avó Joana, que tem me educado e ajudado em oração. A minha tia Claudia que tanto me apoiou no início da jornada na graduação e está sempre presente em todos os momentos. Meus dois irmãos Alisson e Laís, a quem procuro ouvir e compartilhar minhas alegrias.

A meus amigos por me apoiarem, darem força e acreditarem no meu sucesso, em especial a Michelle Kiemle, Amanda Prado, Thiago Almeida e Rafaela Barreto.

A todos os professores e amigos do programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFPE em especial aos da área de recursos hídricos. Ao professor Jaime Cabral que desde minha iniciação científica vem me apoiando e tem sido um espelho para mim dentro da academia.

Ao meu maior parceiro de artigos e publicações, Edinilson Castro, que foi uma pessoa fundamental para progresso dos estudos e resultados obtidos.

A minha coorientadora professora Simone Rosa pela profundidade que garantiu a meu trabalho e pela paciência comigo, por sempre ter sido solicita em tudo e por todas as dúvidas sanadas quanto ao tema.

Ao meu Orientador professor Roberto Azevedo, por toda dedicação e paciência. Fui aluno na graduação e orientado no meu TCC e me surpreendo a cada dia com sua dedicação aos seus alunos e o prazer em lecionar e destravar um ambiente tão burocrático como a UFPE. Vou guardar seus ensinamentos para o resto da vida.

Agradeço também a banca pela sua colaboração e dedicação para melhoria deste trabalho.

RESUMO

A gestão de recursos hídricos necessita de ferramentas para auxiliar a tomada de decisão das demandas hídricas oriundas das múltiplas atividades em uma bacia hidrográfica. A disseminação e aplicação de métodos que possam aumentar a eficiência e assertividade é crucial para o sucesso nas decisões. O presente estudo traz duas ferramentas para auxiliar nessa tomada de decisão: o grau de estresse hidrológico (EH) e a calibração automática. Nesse sentido, foi determinado o grau de estresse hidrológico para a bacia do rio Goiana, o indicador define valores limiares para a proporção entre o somatório de vazões demandadas e um dado percentil da curva de permanência de acordo com os critérios para concessão de outorga do Estado de Pernambuco, avaliando assim, níveis de estresse hidrológico nas sub-bacias estudadas. A outra ferramenta estudada é a análise de sensibilidade e calibração automática dos parâmetros hidrológicos, para a bacia do Goiana. Uma estruturação de modelagem hidrológica da bacia foi construída no modelo hidrodinâmico PCSMMM (*Personal Computer Storm Water Management Model*) e as análises foram realizadas em 10 sub-bacias. A partir do modelo desenvolvido para a bacia, os recursos disponíveis no PCSWMM de análise de sensibilidade e calibração automática, conhecido como SRTC (*Sensitivity-based Radio Tuning Calibration*), foram explorados inicialmente para avaliar os parâmetros mais sensíveis e em seguida para realizar a calibração dos parâmetros da bacia. Os resultados apontaram para uma situação de “Alto” estresse hidrológico (HS) na sub-bacia de Nazaré da Mata, com aproximadamente 94,76% de aproveitamento da vazão máxima outorgável. A sub-bacia Nazaré da Mata, que possui o menor número de estruturas a serem implantadas segundo o estudo Águas do Norte de Torres (2007), a classificação do estresse passou de "Alto" para "Médio", alterando o percentual de estresse hidrológico de 94,76% para 25,65%. Na sub-bacia Caricé, que originalmente possuía um nível de estresse "Médio", a implantação das barragens reduziu o estresse para "Baixo", com uma diminuição percentual de 10,32%, passando de 31,77% para 21,45%. A menor redução percentual do nível de estresse hidrológico ocorreu na sub-bacia Engenho Retiro, com um total de 9,90%, indo de 20,14% para 10,24%, classificada como “Baixo” nível. Diante desses resultados, reforça-se a importância do monitoramento constante dos dados de demanda de uso da água na região e do aprimoramento dos critérios de outorga pelos órgãos gestores. Para a análise da calibração automática, os resultados indicam um desempenho bastante satisfatório das ferramentas, trazendo celeridade e confiança para tomada de decisão dos gestores de recursos hídricos.

Palavras-chave: segurança hídrica; estresse hidrológico; calibração automática; análise estatística de erro; bacia do rio goiana.

ABSTRACT

Water resources management requires tools to assist in decision-making regarding water demands from multiple activities in a watershed. The dissemination and application of methods that can increase efficiency and accuracy are crucial for successful decision-making. This study presents two tools to aid in this decision-making process: the degree of hydrological stress (HS) and automatic calibration. In this context, the degree of hydrological stress was determined for the Goiana River basin, where the indicator defines threshold values for the proportion between the peak value of the demand flow and a given percentile of the duration curve, according to the criteria for water use allocation in the state of Pernambuco. This assessment evaluates the levels of hydrological stress in the studied sub-basins. The other tool studied is the sensitivity analysis and automatic calibration of hydrological parameters for the Goiana basin. A hydrological modeling structure of the basin was built using the PCSMMM (Personal Computer Storm Water Management Model), and the analyses were performed in 10 sub-basins. With the developed model, the available resources in PCSWMM for sensitivity analysis and automatic calibration, known as SRTC (Sensitivity-based Radio Tuning Calibration), were initially explored to evaluate the most sensitive parameters and subsequently calibrate the parameters of the basin. The results indicated a situation of "High" hydrological stress (HS) in the Nazaré da Mata sub-basin, with an approximate utilization of 94.76% of the maximum allocable flow. In the Nazaré da Mata sub-basin, which has the fewest structures, the stress classification changed from "High" to "Medium," reducing the percentage of hydrological stress from 94.76% to 25.65%. In the Caricé sub-basin, which originally had a "Medium" stress level, the implementation of dams reduced the stress to "Low," with a percentage decrease of 10.32%, going from 31.77% to 21.45%. The smallest percentage reduction in the level of hydrological stress occurred in the Engenho Retiro sub-basin, with a total of 9.90%, going from 20.14% to 10.24%, classified as "Low" level. These results reinforce the importance of constant monitoring of water usage data in the region and the improvement of allocation criteria by management agencies. Regarding the automatic calibration analysis, the results indicate a satisfactory performance of the tools, providing speed and confidence in decision-making for water resource managers.

Keywords: water security; hydrological stress; automatic calibration; statistical error analysis; goiana river basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Localização da bacia hidrográfica do rio Goiana e das estações.	37
Figura 2 –	Municípios da bacia hidrográfica do rio Goiana.	40
Figura 3 –	Mapa de elevação da bacia hidrográfica do rio Goiana.	41
Figura 4 –	Médias anuais pluviométricas da bacia hidrográfica do rio Goiana.	42
Figura 5 –	Mapa de solo da bacia hidrográfica do rio Goiana.	43
Figura 6 –	Mapa de unidades aquíferas da bacia hidrográfica do rio Goiana.	44
Figura 7 –	Vazão média mensal das estações fluviométricas Nazaré da Mata e Engenho Itapissirica	45
Figura 8 –	Vazão média mensal das estações fluviométricas Timbaúba, Engenheiro Volta e Caricé.	45
Figura 9 –	Localização das áreas de proteção ambiental da bacia hidrográfica do rio Goiana.	46
Figura 10 –	Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio Goiana.	47
Figura 11 –	Localização das barragens da bacia hidrográfica do rio Goiana.	48
Figura 12 –	Sub-bacias e cursos d'água na bacia do rio Goiana.	51
Figura 13 –	Curva de Permanência Posto Caricé.	53
Figura 14 –	Curva de Permanência Posto Engenho Retiro.	54
Figura 15 –	Curva de Permanência Posto Nazaré da Mata.	54
Figura 16 –	Curva de Permanência Posto Engenho Itapissirica.	55
Figura 17 –	Distribuição espacial dos usos da água outorgados na bacia do rio Goiana e os postos fluviométricos considerados no estudo.	57
Figura 18 –	Distribuição espacial dos barramentos propostos pelo estudo do Águas do Norte de Torres (2007).	60
Figura 19 –	Curva de permanência, Q90 e a demanda outorgada para sub-bacia Caricé.	62
Figura 20 –	Curva de permanência, Q90 e a demanda outorgada para sub-bacia Engenho Retiro.	62
Figura 21 –	Curva de permanência, Q90 e a demanda outorgada para sub-bacia Nazaré da Mata.	63
Figura 22 –	Curva de permanência, Q90 e a demanda outorgada para sub-bacia Engenho Itapissirica.	63
Figura 23 –	Demandas hídricas por uso nos pontos de controle, da bacia do rio Goiana	64

Figura 24 –	Mapa do estresse hidrológico por sub-bacia, bacia do rio Goiana	65
Figura 25 –	Fluxograma das etapas do estudo	80
Figura 26 –	Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Goiana, com estações pluviométricas e fluviométricas e reservatórios	82
Figura 27 –	Recurso de controle deslizante de sintonia a rádio, software PCSWMM	88
Figura 28 –	Análise de Sensibilidade (Sub-bacia Carice)	93
Figura 29 –	Análise de Sensibilidade (Sub-bacia Engenho Retiro)	94
Figura 30 –	Análise de Sensibilidade (Sub-bacia Engenho Volta)	94
Figura 31 –	Análise de Sensibilidade (Sub-bacia Engenho Itapissirica)	94
Figura 32 –	Análise de Sensibilidade (Sub-bacia Nazaré)	95
Figura 33 –	Resultados NSE, R2 e ISE (Calibração)	96
Figura 34 –	Resultados NSE, R2 e ISE (Validação)	97
Figura 35 –	Hidrograma observado e calibrado (Sub-bacia Carice)	99
Figura 36 –	Hidrograma observado e calibrado (sub-bacia Engenho Retiro)	100
Figura 37 –	Hidrograma observado e calibrado (sub-bacia Engenho Volta)	100
Figura 38 –	Hidrograma observado e calibrado (sub-bacia Engenho Itapissirica)	101
Figura 39 –	Hidrograma observado e calibrado (sub-bacia Nazaré)	101
Figura 40 –	Hidrograma observado e validado (sub-bacia Caricé)	102
Figura 41 –	Hidrograma observado e validado (sub-bacia Engenho Retiro)	102
Figura 42 –	Hidrograma observado e validado (sub-bacia Engenho Volta)	103
Figura 43 –	Hidrograma observado e validado (sub-bacia Itapissirica)	103
Figura 44 –	Hidrograma observado e validado (sub-bacia Nazaré)	104
Figura 45 –	Distribuição espacial dos barramentos nas áreas com estresse hidrológico “Alto”	110
Figura 46 –	Distribuição espacial dos barramentos nas áreas com estresse hidrológico “Médio”	111
Figura 47 –	Distribuição espacial dos barramentos nas áreas com estresse hidrológico “Baixo”	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Estações fluviométricas e sub-bacias correspondentes.	51
Tabela 2 –	Usos de água outorgados em cada sub-bacia	56
Tabela 3 –	Classificação dos níveis de estresse hidrológico (adaptado de Durães *et al.,* 2015)	58
Tabela 4 –	Informações sobre vazão de referência, demanda e indicador de estresse hidrológico (EH)	61
Tabela 5 –	Postos fluviométricos e correspondente bacia	81
Tabela 6 –	Reservatórios e correspondente bacia	81
Tabela 7 –	Postos pluviométricos da bacia do rio Goiana	83
Tabela 8 –	Resultados estatístico ISE, NSE e R^2	98
Tabela 9 –	Resultado das vazões calibração	105
Tabela 10 –	Resultado das vazões validação	105
Tabela 11 –	Vazão média regularizada das barragens	108
Tabela 12 –	Vazão média regularizada das barragens	112
Tabela 13 –	Informações sobre a vação média regularizada, a vazão de referência, demanda e indicador do novo estresse hidrológico	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
AG	Algoritmo Genético
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
AS	Análise de Sensibilidade
COBH	Comitê de Bacia Hidrográfica
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
CPRH	Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Pernambuco
FEHIDRO	Fundo Estadual de Recursos Hídricos
GIRH	Gestão Integrada de Recursos Hídricos
IH	Insegurança Hídrica
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OECD	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONU	Organização das Nações Unidas
OEP	Otimização de Enxame de Partículas
PHA	Plano Hidro ambiental
PNRH	Plano Nacional de Recursos Hídricos
PNSH	Plano Nacional de Segurança Hídrica
PRH	Planos de Recursos Hídricos
SH	Segurança Hídrica
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SIRH	Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos
VH	Vulnerabilidade Hídrica

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	**14**
1.1	**Hipótese**	**20**
1.2	**Objetivos**	**20**
1.2.1	Objetivo geral	20
1.2.2	Objetivos específicos	20
1.3	**Estrutura da tese**	**21**
2	**ESTRESSE HIDROLÓGICO NO ATENDIMENTO AO DÉFICIT HÍDRICO**	**22**
2.1	**Fundamentação teórica**	**22**
2.1.1	Gestão dos recursos hídricos e segurança hídrica	22
2.1.2	Outorga e vazão de referência	29
2.1.3	Estresse hidrológico	31
2.2	**Metodologia**	**36**
2.2.1	Caracterização da bacia do Rio Goiana (meios físico e socioeconômico)	37
2.2.2	Análise da oferta hídrica	50
2.2.3	Análise da demanda hídrica	55
2.2.4	Estimativas do estresse hidrológico	57
2.2.5	Alternativas para a solução do déficit hídrico	58
2.3	**Resultados e discussão**	**61**
2.4	**Conclusões da análise do estresse hidrológico**	**71**
3	**APLICAÇÃO DE MODELO HIDROLÓGICO DE CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA PARA AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS HIDROLÓGICOS NA BACIA DO RIO GOIANA**	**73**
3.1	**Fundamentação teórica**	**73**
3.1.1	Modelos hidrológicos	73
3.1.2	Classificação dos modelos hidrológicos	75
3.1.2.1	*Modelos concentrados distribuídos*	*75*
3.1.2.2	*Modelos estocásticos e determinísticos*	*75*

3.1.2.3 *Modelos conceituais e empíricos* *75*
3.1.2.4 *Modelos contínuos e discretos* *76*
3.1.3 Usos de modelos hidrológicos 76
3.1.3.1 *Coleta e preparação dos dados* *77*
3.1.3.2 *Calibração dos parâmetros* *77*
3.1.3.3 *Validação do modelo* *77*
3.1.3.4 *Análise de sensibilidade* *77*
2.1.4 Calibração de modelos hidrológicos 77
3.1.4.1 *Calibração manual* *78*
3.1.4.2 *Calibração automática* *78*
3.2 Materiais e métodos 80
3.2.1 Pluviometria e fluviometria da região 80
3.2.2 Modelo hidrodinâmico PCSWMM 84
3.2.3 Análise de sensibilidade e calibração 85
3.2.4 Análise estatística do erro 88
3.3 Resultados e discussão 89
3.4 Conclusões da calibração automática 106
4 ABORDAGEM INTEGRADA DA SEGURANÇA HÍDRICA NA BACIA DO RIO GOIANA POR MEIO DO ESTRESSE HIDROLÓGICO E DA CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA 108
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES 120
REFERÊNCIAS 121

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de água é intrínseca aos seres vivos e está estreitamente ligada à sua fisiologia. No caso dos seres humanos, além das exigências fisiológicas, essa demanda está também associada ao seu desenvolvimento. Na terra, a distribuição dos recursos hídricos não é uniforme, havendo disparidades entre regiões com maior e menor disponibilidade de água. Para mitigar essa desigualdade, é imprescindível a realização dos investimentos em infraestrutura hídrica adequada, especialmente em países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento, com o objetivo de garantir o acesso universal à água (TEIXEIRA; RIBEIRO, 2022).

Desde a década de 1990, o conceito de segurança hídrica ampliou seu escopo para englobar questões como qualidade, quantidade, acesso seguro e equitativo, assim como a preservação ambiental no abastecimento de água. Essa noção tem ganhado destaque em entidades políticas como o Fórum Econômico Mundial e a Organização das Nações Unidas (ONU, 2010), entre outras instituições relevantes (WWF, 2009; UNEP, 2009; WEF, 2011; UN-Water, 2013; UNESCO, 2013).

No âmbito político, tem havido um esforço dos pesquisadores para incorporar a segurança hídrica como um elemento estruturante, trabalhando para aplicar e definir esse conceito em suas pesquisas (COOK; BAKKER, 2012, 2016; GERLAK; MUKHTAROV, 2015; ZEITOUN *et al.,* 2016).

Apesar de a segurança hídrica ser um conceito amplamente aceito atualmente, ainda existe autores que debatem esse assunto e sua relação com outros conceitos. Alguns abordam a segurança hídrica com base em fatores relacionados à gestão integrada, sustentabilidade ou adaptabilidade ambiental (PANDEY, 2021). Em outros casos, o conceito é utilizado de forma mais restrita, buscando adaptá-lo à discussão de outras questões igualmente ou mais relevantes (ZEITOUN *et al.,* 2016).

No entanto, entre as várias interpretações e aplicações do conceito de segurança hídrica, o que está em destaque é uma nova perspectiva sobre a importância dos recursos hídricos e a necessidade de estabelecer conexões com outras áreas do conhecimento, alcançando uma abordagem interdisciplinar que ultrapassa as fronteiras da gestão integrada. Nesse momento, a segurança hídrica se torna o tema principal, enquanto os demais conceitos funcionam como

suporte para compreender o contexto atual dos recursos hídricos diante dos cenários e desafios que enfrentamos (TEIXEIRA; RIBEIRO, 2022).

Inicialmente no Brasil, a Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433 de 1997 (BRASIL, 1997), visando garantir a segurança hídrica para a população e está alinhada com a Agenda 2030 da ONU, que busca a proteção ambiental, a paz, a prosperidade da população e a erradicação da pobreza.

O país também conta com o Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH) como um dos instrumentos necessários para atingir os objetivos do Plano Nacional de Recursos Hídricos. O PNSH está alinhado com os conceitos internacionais de segurança hídrica e propõe metas de redução de secas e inundações, com horizonte até o ano de 2035, além de estabelecer as diretrizes para alcançar a segurança hídrica (ANA, 2019).

Na identificação do estresse hidrológico (EH), é fundamental compreender o grau de comprometimento causado por cada demanda nos subsistemas hídricos. Dessa forma, torna-se necessário implementar uma política de gestão dos recursos hídricos específica para cada subsistema, visando mitigar os conflitos relacionados à demanda de água e estabelecer uma hierarquia de investimentos necessários.

Para determinar o grau de comprometimento de cada sub-bacia, é possível utilizar o estresse hidrológico (EH), que se baseia na relação entre as descargas outorgadas em cada sub-bacia e o limite correspondente de vazão que pode ser concedido, de acordo com os critérios estabelecidos pelos órgãos estaduais ou federais, fornecendo aos órgãos responsáveis pela gestão dos recursos hídricos uma ferramenta para auxiliar na tomada de decisões relacionadas às outorgas futuras, na avaliação do impacto das demandas atuais e no manejo racional da água. (DURÃES, 2010).

Em Pernambuco, estado localizado no nordeste do Brasil, o EH é uma preocupação recorrente devido às características climáticas da região. Pernambuco possui um clima predominantemente semiárido, com chuvas irregulares e concentração de precipitação em determinados períodos do ano. Essa variabilidade climática é agravada pela ocorrência frequente de secas, que afetam diretamente a disponibilidade de água e podem levar ao estresse hidrológico. O EH em Pernambuco tem impactos significativos em diversos setores, como a agricultura, a pecuária, o abastecimento urbano e a geração de

energia. A escassez de água afeta a produção agrícola, comprometendo a subsistência de agricultores e gerando prejuízos econômicos. Além disso, a falta de água nas cidades afeta a qualidade de vida da população e impõe restrições ao consumo e ao uso doméstico (RIBEIRO NETO; DA PAZ; SILVA, 2016).

Para lidar com o estresse hidrológico, Pernambuco tem buscado adotar medidas de adaptação e gestão sustentável dos recursos hídricos. Isso inclui a construção de sistemas de abastecimento de água, como adutoras e barragens, a implantação de tecnologias de reuso e captação de água de chuva, o estímulo à agricultura de baixo consumo hídrico e a conscientização da população sobre o uso racional da água. Além disso, o estado tem promovido ações de monitoramento e controle dos recursos hídricos, por meio de órgãos como a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), visando garantir uma melhor gestão dos recursos e a mitigação dos efeitos do estresse hidrológico (RIBEIRO NETO; DA PAZ; SILVA, 2016).

Prosseguindo, na definição do estresse hidrológico, é importante considerar que as variáveis envolvidas apresentem uma tendência de comportamento, no entanto, as alterações climáticas podem influenciar a trajetória dessas variáveis (JIMÉNEZ-CISNEROS *et al.*, 2014; GOSLING *et al.*, 2016; BOND *et al.*, 2017; HORNE *et al.*, 2019). Sistemas projetados ou adaptados para lidar com variabilidades elevadas tendem a ser menos afetados pelos efeitos das mudanças climáticas (PEEL *et al.*, 2010; HEWITT *et al.,* 2013; RÖSSLER *et al.*, 2017; SWART *et al.*, 2017).

Os modelos conceituais de escoamento, seja em áreas urbanas ou rurais, demandam a consideração de múltiplas variáveis e parâmetros para uma descrição precisa das intrincadas relações entre precipitação, escoamento e características específicas da bacia hidrográfica. Por exemplo, ao analisar os modelos conceituais de escoamento urbano, é necessário levar em conta fatores como a área impermeável, a capacidade de infiltração do solo, a presença de estruturas de drenagem, entre outros. Essas complexidades na estimativa dos parâmetros frequentemente impõem limitações ao uso desses modelos. Portanto, o desempenho dos modelos na previsão do hidrograma é altamente dependente da acuidade da calibração do mesmo (LOUCKS; BEEK, 2005).

Devido à presença de várias soluções ótimas e ao grande número de parâmetros considerados, a abordagem de calibração de tentativa e erro frequentemente usada é tediosa e demorada. Faz-se necessário, portanto, o

desenvolvimento de procedimentos de calibração automática, robusto e confiável para obter os parâmetros ideais para o modelo (JAVAHERI, 1998)

A calibração automatizada é um procedimento iterativo em que os parâmetros são modificados utilizando uma sequência computacional. As escolhas são feitas de maneira automática até que o requisito de término seja satisfeito. Os requisitos mais usuais são a restrição do erro máximo entre os modelos experimental e numérico, e a limitação do número de repetições (RIBEIRO, 2019).

As técnicas de otimização são uma ferramenta significativa para a calibração automática, representando uma alternativa aos métodos convencionais em que o projetista depende de intuição e experiência, resultando, muitas vezes, em um processo lento e com pouca eficácia em termos de precisão. Assim, a otimização pode ser compreendida como o procedimento que determina os valores ideais das variáveis em um problema específico, visando encontrar a solução ótima (RIBEIRO, 2019)

Os métodos tradicionais de calibração são utilizados para obter resultados do modelo que estejam em concordância com as medições observadas, sendo essa concordância alcançada por meio da seleção adequada dos parâmetros. A fim de aprimorar a precisão da calibração, a confiabilidade dos modelos e otimizar o processo de calibração, torna-se desejável a utilização de métodos de calibração automática. Um exemplo é o algoritmo de otimização por enxame de partículas, que ajusta automaticamente os parâmetros do modelo com base nas informações fornecidas pelas saídas medidas, permitindo uma calibração mais eficiente e precisa. (JAMES, 2005).

Os algoritmos de calibração automática acoplados a modelos hidrodinâmicos de fluxo têm sido cada vez mais empregados por pesquisadores, visando aprimorar a precisão e eficácia dos processos de ajuste de parâmetros. Um dos fatores mais marcantes nos algoritmos de calibração automática acoplados a modelos hidrodinâmicos de escoamento é a capacidade de ajustar automaticamente os parâmetros do modelo com base nos dados observados do sistema hidrodinâmico em questão. Esses algoritmos buscam otimizar a correspondência entre os resultados simulados pelo modelo e as medições reais, permitindo uma melhor precisão e confiabilidade do modelo hidrodinâmico. Além disso, também podem levar em consideração restrições físicas e

matemáticas específicas do problema, garantindo que as soluções encontradas sejam consistentes e realistas.

James, *et. al.* (2002) implementaram no PCSWMM um algoritmo genético para calibração automática e otimização de projetos. Já Gou *et al.* (2020) utilizaram uma estrutura de calibração automática que combina uma análise de sensibilidade adaptada a um algoritmo de otimização para calibrar um modelo hidrológico. Por sua vez, Wang *et al.* (2020) desenvolveram uma rotina de calibração automática de parâmetros do modelo SWAT com base em um algoritmo genético (AG) e otimização de enxame de partículas (OEP).

Normalmente, os métodos de calibração automática baseados em análise de sensibilidade envolvem quatro etapas principais: (1) análise de sensibilidade; (2) determinação dos limites ou faixas dos parâmetros (análise de incerteza); (3) calibração; e (4) avaliação de desempenho do modelo calibrado (JAMES; WAN; JAMES, 2002).

As análises de sensibilidade têm por objetivo preparar a calibração dos conjuntos de parâmetros da bacia, a fim de ilustrar o impacto das incertezas nos parâmetros de entrada nas respostas do modelo (GARAMBOIS *et al.*, 2015). Portanto, torna-se importante realizar a avaliação da taxa de mudança na resposta de um modelo em relação às alterações nos parâmetros de entrada (JAMES, 2005). Após a análise de sensibilidade, é necessário determinar as faixas aceitáveis dos parâmetros que serão ajustados no modelo, também conhecida como análise de incerteza. Nessa etapa, procura-se descrever todo o conjunto de resultados possíveis dos parâmetros do modelo, juntamente com suas probabilidades de ocorrência associadas, ou simplesmente atribuir limites de valores mínimos e máximos aceitáveis fisicamente (LOUKCS; BEEK, 2017).

A análise de desempenho dos modelos calibrados envolve tanto avaliações qualitativas, por meio de comparações visuais entre as séries temporais de simulações e observações, para identificar quão bem o modelo captura o tempo, as tendências e as magnitudes das observações, quanto avaliações quantitativas, que medem a concordância entre as simulações e as observações por meio de estatísticas que avaliam a qualidade do ajuste. Essas avaliações quantitativas são utilizadas como critérios para aceitar ou rejeitar os resultados da calibração (AHMADISHARAF *et al.*, 2019).

Ahmadisharaf *et al.* (2019) abordam a calibração e validação de modelos de bacia hidrográfica e os avanços na análise de incertezas em estudos de

TMDL (Total Maximum Daily Load). O estudo discute sobre os métodos e as técnicas para melhorar a precisão dos modelos hidrológicos usados em estudos de qualidade de água, assim como a análise de incertezas associadas a esses modelos.

Complementando a discussão sobre as avaliações de desempenho do modelo, Daggupati *et al.* (2015) argumentaram que o uso exclusivo de estatísticas quantitativas pode ser enganoso e pouco confiável. Portanto, a combinação de comparações gráficas juntamente com estatísticas quantitativas resulta em um critério de avaliação mais abrangente e confiável.

O presente estudo é dividido em três capítulos, nos quais são aplicadas duas ferramentas para auxiliar na gestão de recursos hídricos. O primeiro capítulo utiliza o estresse hidrológico para identificar as regiões mais críticas em termos de disponibilidade hídrica dentro de uma bacia. A metodologia busca auxiliar o gestor hídrico a planejar a aplicação dos recursos dentro da bacia visando a redução do déficit hídrico e o aprimoramento das ferramentas de decisão.

A abordagem pode ser utilizada como um recurso complementar para a gestão das concessões de água pelos órgãos responsáveis, proporcionando maior segurança aos usuários e ao meio ambiente, além de auxiliar na redução de conflitos pelo uso da água. O estudo realiza uma análise integrada considerando os dados observados e as licenças de uso da água, evidenciando como uma única bacia pode apresentar diferentes condições de estresse hídrico entre suas sub-bacias.

O segundo capítulo utiliza os recursos de calibração automática do modelo hidrodinâmico PCSWMM para estimar os parâmetros hidrológicos. O desempenho do modelo é analisado por meio de medidas estatísticas de qualidade do ajuste, como a Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), o coeficiente de determinação (R^2) e o Erro Quadrado Integral (ISE). Além disso, são realizadas avaliações qualitativas dos hidrogramas simulados em relação às observações, analisando as vazões máximas e as tendências. Essas metodologias foram aplicadas em uma bacia piloto localizadas no estado de Pernambuco, mais especificamente na bacia do rio Goiana. A escolha dessa bacia se deu pelo número limitado de estudos nessa região e pela alta demanda hídrica para irrigação nos setores econômicos, o que resulta em conflitos pelo uso da água.

Por fim, o terceiro e último capítulo dispõe sobre a hierarquização da implantação dos barramentos, seguindo as indicações do estudo "Águas do Norte" realizado em 2007. Essa hierarquização é feita com base nos resultados da classificação do estresse hidrológico. A hierarquização da implantação das estruturas é importante porque fornece ao gestor hídrico a capacidade de direcionar recursos financeiros e planejar projetos e obras de infraestrutura de forma estratégica. O objetivo dessa hierarquização é reduzir o déficit hídrico, ou seja, garantir um suprimento adequado de água para a região.

1.1 Hipótese

O estresse hidrológico e a calibração automática podem aumentar a assertividade para o gerenciamento dos recursos hídricos, auxiliando gestores na tomada de decisões em prol da garantia da segurança hídrica.

1.2 Objetivos

Nesse tópico serão apresentados os objetivos gerais e específicos sobre o tema.

1.2.1 Objetivo geral

Investigar o impacto da utilização de técnicas de calibração automática e modelos de estresse hidrológico em uma bacia hidrográfica, visando aprimorar o gerenciamento de recursos hídricos, avaliando como a aplicação dessas ferramentas pode melhorar a precisão das informações fornecidas pelos modelos, contribuindo para uma tomada de decisão mais assertiva e um planejamento mais eficiente da gestão dos recursos hídricos.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, relacionam-se:

- Avaliar por meio do estresse hidrológico a situação atual da demanda de uso da água de uma bacia hidrográfica piloto e de suas sub-bacias;
- Reavaliar os recursos de calibração automática do modelo hidrodinâmico PCSWMM, a fim de aprimorar a precisão na estimativa dos parâmetros

hidrológicos de bacias hidrográficas, fornecendo soluções e auxílio concretos para o gerenciamento eficiente de recursos hídricos.

- Hierarquizar soluções a fim de atenuar a situação de déficit hídrico baseado na classificação pelo estresse hidrológico;

1.3 Estrutura da tese

O presente trabalho está estruturado nos seguintes capítulos:

- Introdução com apresentação da justificativa, motivação do tema, bem como os objetivos e a estrutura da tese;
- Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura, trazendo alguns dos principais trabalhos que abordam o contexto de gestão de recursos hídricos, estresse hidrológico, segurança hídrica, outorga e vazão de referência. O referido capítulo também apresenta a metodologia e os resultados da aplicação do estresse hidrológico para a identificação das regiões mais críticas em termos de disponibilidade hídrica dentro de uma bacia, bem como as conclusões decorrentes do estudo.
- Capítulo 3 apresenta os recursos de calibração automática do modelo hidrodinâmico PCSWMM, visando realizar uma estimativa dos parâmetros hidrológicos em uma bacia hidrográfica. A metodologia foi aplicada numa bacia piloto, e as análises foram realizadas com base em parâmetros estatísticos para verificar a precisão do método. Parte das conclusões sobre o estudo é apresentada nesse capítulo.
- Capítulo 4 dispõe sobre a hierarquização da implantação dos barramentos indicados pelo estudo "Águas do Norte" e levando como base os resultado do estresse hidrológico. Ainda, apresenta um novo cenário de classificação do estresse após a implantação das barragens.
- Considerações finais e recomendações obtidas a partir do estudo realizado.

2 ESTRESSE HIDROLÓGICO NO ATENDIMENTO AO DÉFICIT HÍDRICO

A finalidade deste capítulo é aplicar o estresse hidrológico em uma bacia piloto no estado de Pernambuco, a fim de identificar as regiões com maior potencial de conflitos relacionados ao uso da água. Além disso, busca-se fornecer aos gestores de recursos hídricos uma ferramenta para o planejamento de ações visando mitigar o déficit hídrico.

2.1 Fundamentação teórica

Na Fundamentação teórica serão abordados conceitos sobre a Gestão dos Recursos Hídricos e a Segurança Hídrica, bem como a outorga e vazão de referência e o Estresse Hidrológico.

2.1.1 Gestão dos recursos hídricos e segurança hídrica

O conceito de segurança hídrica evolui desde a década de 90 estando, inicialmente, ligado à construção das infraestruturas hídricas eficientes do ponto de vista do atendimento das demandas de água. No entanto o conceito atual considera fatores da complexa relação entre o meio ambiente e os seres humanos e as análises multifatoriais (BOGARD *et al.*, 2012 apud MOURA, 2020); UNESCO, 2013; JAMES; SHAFIEE-JOOD, 2017; VÖRÖSMARTY *et al.*, 2018). Essa mudança no conceito é, sobretudo, decorrente dos impactos das mudanças climáticas e das crescentes alterações do uso e ocupação do solo que tornaram o processo de decisão relacionado aos recursos hídricos ainda mais complexos.

Outro ponto relevante, adicionado por entidades internacionais como a ONU e o World Water Council, é a importância da água para o atendimento das necessidades básicas, a manutenção da vida humana e a melhoria da qualidade de vida da população, incorporando esses aspectos no conceito de estresse hidrológico (ONU, 2010; WWC, 2012 apud MOURA, 2020; UN WATER, 2013).

Além disso, é importante destacar o conceito baseado nos riscos da água e a gestão de *trade-offs* entre a água e outros setores, como ressaltado pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD). A OECD analisa a interligação entre estresse hidrológico e objetivos políticos, como segurança alimentar, segurança energética, mitigação climática e proteção

da biodiversidade (OECD, 2015). Isso enfatiza a necessidade de considerar a água como um recurso transversal que está intrinsecamente ligado a diversos setores e desafios globais. Essa abordagem também teve impacto em instituições políticas de destaque, como o Fórum Econômico Mundial e até mesmo a ONU (WWF, 2009; UNEP, 2009; WEF, 2011; UN-Water, 2013; UNESCO, 2013).

Além disso, os pesquisadores se empenharam em expandir o conceito e aplicar a segurança hídrica como um instrumento de enquadramento em suas pesquisas. (COOK; BAKKER, 2012; GERLAK; MUKHTAROV, 2015; ZEITOUN *et al.,* 2016).

Ressalte-se que a segurança hídrica pode ser conceituada ainda, como a disponibilidade de uma quantidade e qualidade aceitáveis de água para a saúde, ecossistemas, subsistência e produção, considerando também um nível aceitável de risco hídrico para os seres humanos, o meio ambiente e as economias. Tal definição ressalta a importância de garantir a suficiência e a segurança da água, ao mesmo tempo em que se consideram os impactos nos diferentes aspectos sociais, ambientais e econômicos relacionados ao uso desse recurso vital (GREY; SADOFF, 2007 apud BARBOSA, 2022).

Os trabalhos de Norman *et al.* (2010) e GWP (2000) relacionam o conceito da segurança hídrica ao acesso e uso sustentável as água em uma bacia hidrográfica, protegendo contra riscos relacionados à água, como secas e inundações, com acesso em quantidade e qualidade adequadas para garantir saúde tanto à população como ao ecossistema.

Scott *et al.* (2013) vinculam o conceito de segurança hídrica à disponibilidade sustentável de quantidade e qualidade adequadas de água para uma sociedade e um ecossistema impactados pelas mudanças climáticas. Isso destaca a importância de garantir a segurança hídrica em um contexto de incertezas e desafios decorrentes das mudanças climáticas.

Bakker (2012) e UN-Water (2013) também associam a garantia da segurança hídrica à preservação dos ecossistemas e a um ambiente de paz e estabilidade política. Isso ressalta a relação intrínseca entre a segurança hídrica, a conservação dos recursos naturais e a importância de um contexto político favorável para a gestão sustentável dos recursos hídricos.

Diante de todo esse contexto a SH deve ser uma garantia básica de todo ser humano, logo requer o compromisso por parte dos governos e o

envolvimento de todos para assegurá-la. Vörösmarty *et al.* (2018) apresentaram uma síntese global da SH considerando as perspectivas humanas e de biodiversidade.

O referido estudo aponta que quase 80% da população mundial vive sob altos níveis de ameaça de SH. Os pesquisadores ainda destacam que países ricos compensam essa vulnerabilidade com maciços investimentos em tecnologia da água, enquanto os pobres permanecem vulneráveis.

O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável da água (ODS-6) está alinhado com a busca pela segurança hídrica para todos, pois visa assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água e saneamento para todos. Além disso, alguns estudos têm relacionado as métricas de segurança hídrica ao monitoramento do progresso na consecução dos ODS em diferentes países (GAIN, GIUPPONI; WADA, 2016). Isso destaca a importância de acompanhar e avaliar o avanço em direção às metas estabelecidas no ODS-6, com o objetivo de garantir a segurança hídrica de forma abrangente e sustentável.

Além disso, Van Noordwijk *et al.* (2016) propuseram métricas de SH fundamentadas nos ODS e alinhadas às mudanças climáticas. Os autores estabelecem que a forma como as pessoas e os ecossistemas se adaptará às mudanças climáticas é que determinará o conceito de segurança hídrica. No contexto do Brasil, pode-se apontar o conceito de SH fornecido pela ANA, que expressa a condição que garante, tanto em quantidade como em qualidade, os usos associados à água em níveis de risco aceitáveis (ANA, 2019). A Política Nacional de Recursos Hídricos incorpora esse conceito apresentado pela ANA em seus objetivos.

O documento que orienta a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e a atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) é o Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). Seu objetivo é coordenar as ações de gestão de recursos hídricos nos âmbitos federal, estadual e municipal. O Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), por sua vez, tem a função de articular o planejamento entre as esferas nacional, regional e estadual, além dos setores usuários da água, e também aprovar e acompanhar a execução do PNRH (BRASIL, 1997).

No Brasil, o primeiro PNRH foi construído entre os anos de 2004 e 2005 e foi aprovado pela Resolução CNRH nº 58/2006. Ele consistia em 12 cadernos regionais, 5 cadernos setoriais e quatro volumes. Os volumes do PNRH faziam

um diagnóstico dos recursos hídricos no Brasil, traçavam os cenários para 2020, estabeleciam diretrizes, metas e programas para alcançar os objetivos. Em janeiro de 2006, o PNRH foi aprovado com um horizonte temporal até 2020 e com previsão de revisões quadrienais. Os processos participativos de revisão ocorreram entre os anos de 2010 e 2011, e entre 2015 e 2016.

Entre os anos de 2019 e 2021, ocorreu a construção do atual PNRH, que foi um processo participativo envolvendo mais de 3620 participações online de representantes de todos os estados do Brasil e do Distrito Federal. Esse processo mobilizou a sociedade e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos - SINGREH.

O atual PNRH foi aprovado em 2022, pela Resolução CNRH nº 232/2022, com horizonte até 2040, e é composto por dois volumes e um anexo normativo. O volume I apresenta um diagnóstico da situação dos recursos hídricos do Brasil até o ano de 2021. O volume II é um plano de ação abrangente que contém programas e subprogramas que definem estratégias para o gerenciamento de recursos hídricos. Além disso, o PNRH também inclui um anexo normativo com propostas para a agenda e o trabalho do CNRH.

Entre os anos de 2019 e 2021, ocorreu a construção do atual PNRH, por meio de um processo participativo que contou com mais de 3620 participações online de representantes de todos os estados do Brasil e do Distrito Federal. Esse processo mobilizou tanto a sociedade quanto o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos - SINGREH.

O atual PNRH foi aprovado em 2022, pela Resolução CNRH nº 232/2022, com horizonte até 2040, e é composto por dois volumes e um anexo normativo. O volume I apresenta um diagnóstico da situação dos recursos hídricos do Brasil até o ano de 2021. O volume II é um extenso plano de ação contendo programas e subprogramas que definem estratégias para o gerenciamento de recursos hídricos. Além disso, o PNRH também inclui um anexo normativo com propostas para a agenda e o trabalho do CNRH.

Atrelado à Política Nacional de Recursos Hídricos, também temos o Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH), que se integra ao gerenciamento de recursos hídricos do Brasil e desempenha um papel fundamental na consecução dos objetivos da política. O PNSH está alinhado aos conceitos internacionais de segurança hídrica e propõe metas para a redução de eventos de seca e cheia até o ano de 2035. Ele visa alcançar a segurança hídrica por meio de um

planejamento integrado e consistente da infraestrutura hídrica, bem como de um progresso contínuo nos investimentos, que envolve etapas de estudos, projetos e execução de obras (ANA, 2019).

O PNSH também estabeleceu o Índice de Segurança Hídrica (ISH), que tem a função de representar quatro dimensões da segurança hídrica: dimensão humana, dimensão econômica, dimensão ecossistêmica e dimensão de resiliência. Esse índice é calculado para o período entre 2017 e 2035, permitindo uma avaliação abrangente da segurança hídrica ao longo desse período.

Castro (2022) analisou o grau de complexidade do PNSH e destacou que a vasta extensão do Brasil, juntamente com sua variabilidade econômica, social, ambiental e outros fatores, já implica em complexidade para alcançar os objetivos do PNSH. Além disso, a segurança hídrica é afetada de diferentes maneiras por múltiplas variáveis. Por exemplo, o aumento nos índices pluviométricos pode reduzir a escassez hídrica, melhorando a segurança hídrica, mas também pode desencadear enchentes, levando a uma diminuição da segurança hídrica.

A exploração da água dos mananciais pode prejudicar a segurança hídrica na dimensão ecossistêmica, de acordo com o conceito utilizado pela ANA (UNITED NATIONS, 2015). Em Pernambuco, a explotação da água dos mananciais pode, de igual modo, afetar a segurança hídrica na dimensão ecossistêmica em Pernambuco, assim como em qualquer outra região. A exploração excessiva dos recursos hídricos, como a retirada de água em grande quantidade dos mananciais, pode causar impactos negativos nos ecossistemas aquáticos locais. Isso pode resultar na redução da disponibilidade de água para os ecossistemas naturais, afetando a fauna e flora aquáticas, além de comprometer a qualidade e o equilíbrio dos ecossistemas relacionados. Portanto, é essencial buscar um equilíbrio entre o uso humano da água e a preservação dos ecossistemas, visando garantir a segurança hídrica de forma sustentável.

Entretanto, a exploração da água dos mananciais pode beneficiar tanto a dimensão humana quanto a dimensão econômica. Outro ponto que acentua a complexidade da obtenção das metas do PNSH são as incertezas que impactam as variáveis no horizonte até 2035, como a variabilidade pluviométrica associada às mudanças climáticas e as diferentes regiões do país. Além disso, é necessário considerar o avanço econômico para viabilizar a implantação das obras, as quais

representam, para vários estados (Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Piauí), uma redução de 100% da população em situação de risco hídrico (CASTRO, 2022).

Para a dimensão específica do abastecimento de água nas cidades do Brasil, a ANA publicou o Atlas Águas (ANA, 2021), um documento que contém um diagnóstico e um planejamento para alcançar as metas atuais e futuras das demandas por água, considerando o horizonte de 2035. O Atlas também está alinhado à Lei nº 14.026/2020 (ANA, 2021), que estabelece o Novo Marco Legal do Saneamento, e apresenta os recursos necessários para atender 100% da população urbana brasileira nos componentes de distribuição e produção de água, considerando o horizonte de 2035.

O Atlas Águas (ANA, 2021) foi elaborado por meio de um trabalho conjunto entre prestadores de serviços de água (estaduais, municipais e privados), que contribuíram na disponibilidade e validação das informações. As secretarias de infraestrutura dos estados e o Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR) também forneceram informações relacionadas a investimentos e planejamento.

Além disso, foram consultados dados do IBGE, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) e Planos Municipais de Saneamento Básico. Com base nesses dados, o Atlas Águas foi produzido, contendo informações sobre estudos, planos, projetos e obras (EPPOs) existentes ou que devem ser realizadas para eliminar a insegurança hídrica no abastecimento público urbano dos municípios, garantindo o acesso à água de qualidade para todos os brasileiros.

O Atlas Águas (ANA, 2021) forneceu uma atualização dos sistemas de abastecimento de água e dos mananciais, apresentando croquis que ilustram o percurso da água desde sua captação na fonte hídrica até sua chegada às cidades. De acordo com o levantamento publicado no documento, os sistemas de abastecimento isolados, que atendem apenas um município, representam 83% do abastecimento das áreas urbanas, em comparação com os sistemas integrados, que atendem mais de um município (ANA, 2021).

Para o planejamento das ações necessárias para garantir a segurança hídrica no abastecimento urbano, foi desenvolvido o Índice de Segurança Hídrica Urbano (ISH-U). Esse índice é calculado a partir da combinação de quatro indicadores: a vulnerabilidade do manancial e do sistema produtor, que formam

o sub-índice "eficiência da produção", e os indicadores de desempenho técnico da infraestrutura para o gerenciamento de perdas e a cobertura com rede de distribuição, que formam o sub-índice "eficiência da distribuição". Esses indicadores são utilizados para avaliar a segurança hídrica no abastecimento urbano e auxiliar no direcionamento das ações necessárias para melhorar a eficiência e a qualidade do sistema (ANA, 2021).

O ISH-U abrange parâmetros de qualidade dos serviços e quantidade de água, fornecendo aos gestores públicos dados para o planejamento do abastecimento urbano. O resultado do índice classifica os municípios em cinco níveis de segurança hídrica no abastecimento urbano: mínima, baixa, média, alta e máxima.

Segundo os dados do ISH-U, a segurança hídrica média prevalece no Brasil, abrangendo 42% da população. No entanto, é preocupante que 26% da população brasileira ainda se encontre em um nível de segurança hídrica baixa no abastecimento de água. Essa situação é atribuída principalmente a deficiências na produção ou distribuição de água. Essas informações são fundamentais para identificar áreas que necessitam de melhorias e direcionar esforços para garantir uma segurança hídrica adequada para a população (ANA, 2021).

Em Pernambuco, houve avanços significativos na implantação de políticas e instituições voltadas para a introdução do conceito de segurança hídrica. Um marco importante nesse sentido foi a criação da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) por meio da Lei Estadual Nº 6.307, promulgada em 1971. A COMPESA é responsável pelos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário no estado.

Outro marco relevante é a Lei Nº 11.426, promulgada em 1997, que instituiu a Política e o Plano Estadual de Recursos Hídricos em Pernambuco. Essa lei também estabeleceu a criação do Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos (PERNAMBUCO, 1997). No entanto, é importante ressaltar que essa lei foi revogada posteriormente pela Lei nº 12.984/2005, que atualizou as disposições referentes ao gerenciamento de recursos hídricos no estado.

Essas iniciativas legislativas foram fundamentais para estabelecer diretrizes e mecanismos de gestão dos recursos hídricos em Pernambuco,

contribuindo para a promoção da segurança hídrica e o desenvolvimento sustentável no estado.

A partir de 2010, o estado de Pernambuco presenciou um crescimento e fortalecimento da gestão institucional em relação à temática da segurança hídrica, por meio da criação da Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC - Lei Nº 14.028/2010 (PERNAMBUCO, 2010a), da Política Estadual de Enfrentamento às Mudanças Climáticas de Pernambuco - Lei Nº 14.090/2010 (PERNAMBUCO, 2010b) e da Política Estadual de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca - Lei Nº 14.091/2010 (PERNAMBUCO, 2010c).

2.1.2 Outorga e vazão de referência

A outorga do direito de uso dos recursos hídricos apresenta-se como importante instrumento à execução da Lei nº 9.433/97- Política Nacional de Recursos Hídricos, no âmbito federal e da Lei nº 12.984/05 - Política Estadual de Recursos Hídricos, para o estado de Pernambuco e para todas as demais Políticas Estaduais das outras UFs – pois assegura o controle qualitativo e quantitativo dos usos da água e o exercício eficaz dos direitos de acesso a água. Sendo, portanto, um instrumento de avanço no aspecto normativo, por compor legislações específicas que têm possibilitado uma melhoria no gerenciamento dos recursos hídricos (RAMOS, 2005).

Em Pernambuco estão sujeitas à outorga as seguintes atividades: a) derivação ou captação de parcela de água existente em manancial de águas, superficiais ou subterrâneas, para o abastecimento público ou insumo de processo produtivo; b) lançamento, em corpos hídricos, de efluentes domésticos e industriais e demais resíduos líquidos ou gasosos com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final; c) exploração de potenciais hidrelétricos; d) demais usos ou obras e ações que alterem a quantidade ou a qualidade da água, o regime, o leito e margens de corpos de água, ainda por tempo determinado (PERNAMBUCO, 2005).

A escassez hídrica e a ausência de critérios bem definidos para concessão do uso da água estão intimamente ligadas aos conflitos pelo uso da água. Segundo Silva e Ribeiro (2022) tanto os conflitos como as crises hídricas estão relacionados à dificuldade da governança dos recursos hídricos.

As vazões mínimas de referência, adotadas pelos órgãos gestores, para a concessão de outorga, influenciam diretamente na disponibilidade de água a

ser concedida aos usuários (SILVA; SILVA; MOREIRA, 2015). A vazão Q90, que é superada ou igualada em 90% do tempo, é utilizada como referência para legislação na área de Meio Ambiente e de Recursos Hídricos em muitos Estados do Brasil (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015).

Em Pernambuco, estão sujeitas à outorga as seguintes atividades: a) derivação ou captação de parcela de água existente em manancial de águas, superficiais ou subterrâneas, para o abastecimento público ou insumo de processo produtivo; b) lançamento, em corpos hídricos, de efluentes domésticos e industriais e demais resíduos líquidos ou gasosos com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final; c) exploração de potenciais hidrelétricos; d) demais usos ou obras e ações que alterem a quantidade ou a qualidade da água, o regime, o leito e margens de corpos de água, ainda por tempo determinado (PERNAMBUCO, 2005).

O critério de outorga para derivações e captação de águas superficiais tem como referência o valor da Q90 (APAC, 2023). Alguns estados do Brasil utilizam a Q7,10, que é a vazão de sete dias de duração com dez anos de recorrência, para adoção de vazão mínima de referência (TUCCI, 2002). No entanto, esse critério possui algumas desvantagens ao da Q90, pois essa última estabelece um risco de 10% de falha além de restringir menos o uso da água do que a Q7,10 (RIBEIRO, 2019).

O processo de outorga de captação está diretamente relacionado ao enquadramento de corpos d'água, pois a variação dos usos preponderantes da água irá possibilitar os diferentes tipos de outorga. Dessa maneira, é necessário incentivar o controle dos volumes captados em uma determinada bacia hidrográfica, do período em que ocorrem as captações e sua finalidade, contemplando os usos prioritários e as determinações dos planos de recursos hídricos e dos comitês de bacia hidrográfica (APAC, 2023).

Além disso, do ponto de vista ambiental, Vestena *et al.* (2012) afirmaram que o planejamento e o gerenciamento de recursos hídricos visando à garantia de uma vazão mínima, ou ecológica, é fundamental para prevenir e minimizar problemas ambientais relacionados à conservação do ecossistema fluvial.

A outorga serve para disciplinar e racionalizar o uso da água, compatibilizando com a disponibilidade hídrica da bacia (CARRERA-FERNANDEZ; GARRIDO, 2002). Conforme Cruz (2001) esse instrumento tem como foco atrelar os usos da água com a conservação ambiental de forma

racional, preservando os direitos dos usuários. Para projetar regras ótimas de liberação de outorga de água, são necessários indicadores para avaliar a saúde ecológica do rio e o grau de alteração hidrológica causada por uma determinada política operacional (GAO *et al.,* 2008).

2.1.3 Estresse hidrológico

A demanda por água no Brasil tem aumentado, impulsionada desde a segunda metade do século XX, principalmente pela expansão urbana, agropecuária e industrialização (SETTI *et al.*, 2001). Foley *et al.* (2005) preceituam que em termos mundiais as demandas atreladas à agricultura são responsáveis por 85% dos usos consuntivos dos recursos hídricos.

Segundo Archfield *et al.* (2010) a disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica depende de diversos fatores, entre os quais estão: a quantidade de água retirada, os efeitos do uso e ocupação do solo, a infraestrutura hídrica e efeitos das mudanças climáticas. Nesse sentido, a infraestrutura hídrica, como barragens, reservatórios, canais de irrigação e sistemas de distribuição, tem um impacto significativo na disponibilidade de água. Essas estruturas são projetadas para armazenar, regularizar e distribuir água de forma eficiente, garantindo o suprimento adequado para diversos usos, como abastecimento humano, agricultura e indústria.

Com isso, a presença e a qualidade da infraestrutura hídrica podem influenciar diretamente a disponibilidade hídrica em uma bacia, permitindo o aproveitamento máximo dos recursos hídricos disponíveis. Nesse contexto, é necessário um sistema de gestão dos recursos hídricos capaz de levar em consideração todas as características da bacia e cenários de ocupação e retirada de água, reduzindo o grau de incertezas dos instrumentos disponíveis para os gestores de recursos hídricos tomarem decisões mais assertivas na concessão do uso da água.

No tocante ao sistema hídrico eficiente Durães (2010) aplicou o termo “rendimento seguro” que é a parcela de água, superficial e subterrânea, disponível para retirada em uma bacia com certa restrição, como uma condição climática. Já Archfield *et al.* (2010) afirmaram que a fim de garantir as demandas da bacia e a manutenção das vazões ecológicas, não se pode estipular uma descarga mínima fixa para todo o ano. Assim, o termo que melhor se adequa a essa visão sustentável é a disponibilidade hídrica.

A estreita relação entre demanda e disponibilidade hídrica tem como influência inúmeras variáveis, que o gestor de recursos hídricos deve considerar na tomada de decisão. Como não é de total conhecimento a relação entre a água e os sistemas ambientais, é considerado o uso de indicadores e índices que correlacionem todas essas variáveis e facilita o processo de tomada de decisão (LOPES; SOUZA FILHO, 2016). Gao *et al.* (2008) afirmam que os indicadores auxiliam na avaliação do comprometimento hídrico gerado pela política de recursos hídricos em execução.

Entre os indicadores existem os hidrológicos que descrevem alguns aspectos do ciclo hidrológico com um custo matemático reduzido (BRANDT; MADDOX; BORCHERS, 2008). Outro importante ponto é a avaliação das alterações hidrológicas na bacia hidrográfica decorrentes do desenvolvimento e quais ações devem ser tomadas para a mitigação desses impactos (REICHOLD; HUGGENBERGER; SCHEIDLER, 2010). Para a avaliação do grau de comprometimento ecológico, podem ser usados parâmetros que levam em consideração avazão, segundo Reichold; Huggenberger; Scheidler (2010).

Para Brandt; Maddox e Borchers, (2008), estatísticas de vazões dão indícios da quantidade e da variação de regime hidrológico, no entanto apenas com uma série de vazões longa, com a inclusão de períodos com pré-alterações na bacia, pode-se determinar a razão e causas dessas alterações. Durães, Mello e Beskow (2014) esclareceram que é necessário avaliar o grau de comprometimento dos cursos d'água, utilizando-se de indicadores que retratem a situação atual e prospectiva de seus recursos hídricos, criando critérios e limites de enquadramento dos rios semelhantes aos níveis de qualidade, em função da disponibilidade e das demandas, buscando otimizar as alocações de água entre os diversos usos e usuários.

Uma metodologia adotada pelo Departamento de Recurso Naturais de New South Wales (NSW, 2006), intitulada de Macro Water Sharing Plans (MWSP) determina o grau de estresse hidrológico (EH) de uma bacia ou sub-bacia relacionando à vulnerabilidade climática e os usos dos recursos hídricos desta bacia. Essa metodologia também foi aplicada no Brasil por Galvão (2008) e Durães, Mello e Beskow (2014).

A UNESCO (2013) estabeleceu um critério para determinação do estresse hidrológico. Esse critério é o índice de estresse relativo da água (RWSI), que é a razão de todas a demandas pelo escoamento superficial disponível.

Galvão (2008) identificou o estresse hidrológico como um indicador do grau de comprometimento do curso d'água levando em consideração as mudanças climáticas. O pesquisador faz o balanço entre oferta e demanda, através da análise da razão de uso, que é a relação entre a demanda e a disponibilidade hídrica. Esse critério, segundo Galvão (2008), se assemelha ao utilizado na Austrália, ao estabelecido pela Comissão de Recursos Hídricos de Massachusetts e no Brasil pelo Plano Nacional de Recursos Hídricos.

O Plano Nacional de Recursos Hídricos – PNRH (ANA, 2021) também utilizou uma metodologia para avaliar o estresse hidrológico dos cursos d'águas, para isso baseou-se no modelo estabelecido pela Organização das Nações Unidas e a *European Environmental Agency*, que considera a relação entre o consumo total anual e a média da descarga. Esse método divide o nível de estresse que o rio se encontra em cinco níveis de severidade, segundo o percentual da razão entre a retirada e a vazão de referência, sendo considerado o nível, excelentes percentuais menores que 5% e o nível muito crítico para percentuais acima de 40%.

Harris *et al.* (2006) utilizaram uma metodologia para determinar o estresse hidrológico baseado nos valores da curva de permanência, na qual se estudou a proporção de pico da demanda diária em relação à descarga equivalente à permanência de 80% do mês de maior demanda. Os pesquisadores concluíram que os gerenciadores dos recursos hídricos por meio do estabelecimento de novas regras de uso de água podem melhorar a sua atuação na gestão hídrica e alterar o pico diário de demanda por água, reduzindo, desse modo, possíveis conflitos.

Durães, Mello e Beskow (2014) apontaram que a determinação do estresse hidrológico fornece aos órgãos gestores dos recursos hídricos uma ferramenta para auxiliar na tomada de decisões nas outorgas futuras a serem concedidas, na avaliação do impacto das demandas atuais no manejo racional da água. Os mesmos autores estudaram o estresse hidrológico no estado de Minas Gerais, considerando uma vazão de referência determinada a partir de toda a série de vazões disponível, adotando-se tal descarga como a correspondente à 90% de permanência (Q90). Logo, a vazão de referência passa a ser uma ferramenta no gerenciamento das demandas futuras e se torna um limitante superior para advertir os órgãos gestores de níveis crítico de

estresse hidrológico de determinada sub-bacia e das alocações futuras das vazões demandadas.

As mudanças climáticas alteram as tendências das variáveis que servem para definir o estresse hidrológico (JIMÉNEZ-CISNEROS *et al.,* 2014; GOSLING *et al.,* 2016; BOND *et al.,* 2018; HORNE *et al.,* 2019). A adoção de uma abordagem para a análise do estresse requer confiança dos dados no uso de conjuntos climáticos que representam incertezas aleatórias sob condições de linha de base e de impacto das alterações climáticas.

O desempenho dos sistemas hidrológicos pode ser alterado severamente com a variabilidade do clima e as avaliações desses impactos são necessárias (VÖRÖSMARTY e*t al.,* 2010; CHAPMAN *et al.,* 2014; WANG *et al.,* 2020; EKSTRÖM *et al.,*2018). Horne *et al.* (2019) desenvolveram uma abordagem que facilita a comparação do desempenho hidrológico de diferentes sistemas sob a perspectiva de clima atual e futura, avaliando o impacto nos sistemas hidrológicos com as alterações da temperatura, precipitação e evaporação.

Existe a necessidade de desenvolvimento de métricas relacionadas ao desempenho dos sistemas hidrológicos quanto ao nível de estresse, para posteriormente submeterem a avaliações sob diferentes cenários climáticos (PRUDHOMME *et al.,* 2010; BROWN *et al.,* 2012; SHEPHERD *et al.,* 2018). O artigo "*Vegetation impacton meanannu al evapotranspiration at a global catchment scale*" ou "Impacto da vegetação na evapotranspiração anual média em escala global de captação" dos pesquisadores Peel; McMahon e Finlayson (2010), traçam um estudo sobre o papel da vegetação da bacia dentro do ciclo hidrológico.

O referido artigo abordou a relação entre o tipo de vegetação e a evapotranspiração e escoamento superficial de bacias hidrográficas. Utilizando um amplo conjunto de dados de 699 bacias hidrográficas em todo o mundo, o estudo avalia o impacto do tipo de vegetação na evapotranspiração média anual. Foi destacada a importância de considerar o tipo de clima das bacias hidrográficas ao avaliar esse impacto. Os resultados mostraram que as bacias com florestas tropicais e temperadas apresentam uma evapotranspiração mediana estatisticamente significativa, cerca de 170 mm e 130 mm a mais, respectivamente, em comparação com as bacias não florestais. De forma inesperada, as bacias com florestas frias apresentam uma evapotranspiração

mediana significativamente menor, em torno de 90 mm, em relação às bacias não florestais.

Não foram observadas diferenças significativas na evapotranspiração mediana entre bacias sempre verdes temperadas e florestas decíduas, embora o tamanho das amostras fosse pequeno. Além disso, observou-se que as bacias hidrográficas de florestas perenes temperadas com folhas afiladas têm uma evapotranspiração mediana significativamente maior do que as bacias hidrográficas de florestas perenes com folhas largas, embora o tamanho das amostras fosse pequeno. De forma resumida, o artigo de Peel; McMahon e Finlayson (2010) destacou a importância de analisar o impacto do tipo de vegetação na evapotranspiração das bacias hidrográficas. Utilizando um conjunto de dados amplo e diversificado, o estudo mostrou que o tipo de clima influencia significativamente os resultados dessa avaliação. Além disso, os resultados obtidos foram consistentes com as expectativas da literatura existente sobre os efeitos da vegetação. Essas análises fornecem insights valiosos para futuras investigações que visam entender as interações entre o clima, o tipo de vegetação e a evapotranspiração nas bacias hidrográficas.

Hewitt, Buontempo e Newton (2013), Rössler *et al.* (2017) e Swart *et al.* (2017), mostraram que sistemas hidrológicos projetados ou adaptados para conter elevadas variabilidades climáticas são menos estressados quando submetidos aos efeitos das mudanças. Hewitt; Buontempo e Newton (2013), por exemplo, em seu artigo "*Using Climate Predictions to Better Serve Society's Needs*" ou "Usando previsões climáticas para atender melhor às necessidades da sociedade" aborda a necessidade de melhorar a resiliência da sociedade em relação aos desafios e oportunidades apresentados pelas variações climáticas. Destaca-se a importância de previsões habilidosas sobre a variabilidade do clima em escalas de tempo sazonal a decadal, que podem ser valiosas para a tomada de decisões em diferentes setores.

A pesquisa destaca que o acesso a dados de previsão confiáveis e orientações informadas da comunidade científica pode ajudar a sociedade a se preparar e gerenciar os riscos relacionados ao clima. O artigo menciona ainda o projeto EUPORIAS, que busca desenvolver serviços de previsão de impacto climático e avaliar sua utilidade na tomada de decisões informadas. O projeto envolve uma ampla colaboração de organizações de pesquisa climática, centros de serviços climáticos, agências das Nações Unidas, especialistas em impacto

e previsões, empresas comerciais e usuários finais. A ênfase é colocada no desenvolvimento de ferramentas e informações adaptadas às necessidades específicas de cada setor.

Em ambos os artigos de Peel *et al.* (2010) e Hewitt *et al.* (2013) é abordada a relação entre o clima e suas influências nas bacias hidrográficas. Ambos enfatizam a importância de considerar o tipo de vegetação e o clima ao avaliar o impacto na evapotranspiração e na gestão dos recursos hídricos. Além disso, os artigos destacam a necessidade de utilizar dados e previsões confiáveis, apoiados por orientações científicas, para melhorar a resiliência da sociedade em relação aos riscos climáticos e tomar decisões informadas. E por fim, também reconhecem a importância de envolver os usuários finais e desenvolver ferramentas adaptadas às necessidades específicas de cada setor.

2.2 Metodologia

Serão apresentados a partir de agora os aspectos metodológicos utilizados na pesquisa para avaliar a situação hídrica na bacia do Rio Goiana. Inicialmente, foi realizada uma completa caracterização da bacia, examinando seus meios físico e socioeconômico, a fim de compreender os principais elementos que influenciam a disponibilidade e o uso da água na região. Em seguida, foi conduzida uma análise minuciosa da oferta hídrica na bacia, considerando aspectos como a disponibilidade sazonal e a qualidade da água. Complementando essa análise, foram investigados os padrões de demanda hídrica na área de estudo, identificando os setores e atividades que mais consomem água e suas respectivas tendências.

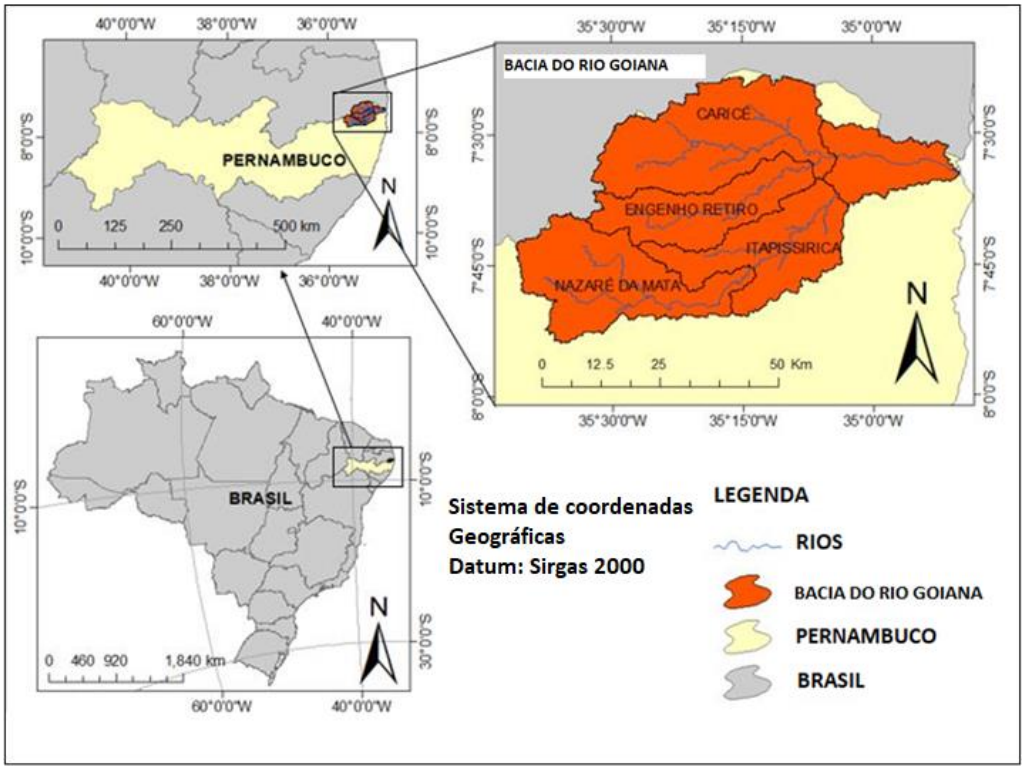
A partir dessas informações, foram estimados os níveis de estresse hidrológico na bacia, evidenciando a magnitude dos desafios enfrentados em relação à disponibilidade hídrica e as possíveis consequências para o ecossistema e as comunidades locais. Por fim, serão exploradas diferentes alternativas para solucionar o déficit hídrico identificado, considerando estratégias de gestão sustentável, reuso de água, conservação de recursos hídricos e a implementação de políticas efetivas de preservação, visando alcançar um equilíbrio entre a oferta e a demanda hídrica na bacia do Rio Goiana.

2.2.1 Caracterização da bacia do Rio Goiana (meios físico e socioeconômico)

A área de pesquisa abrange a bacia hidrográfica do rio Goiana, situada na parte nordeste do Estado de Pernambuco. Suas coordenadas de latitude sul variam de 07º22'20" a 07º54'47", e as coordenadas de longitude oeste variam de 34º49'06" a 35º41'43". A bacia limita-se ao norte com o Estado da Paraíba e ao sul com a bacia do rio Capibaribe (Figura 01).

A bacia do rio Goiana possui uma área total de 2.866,52 km², correspondendo a 2,90% da área total do Estado. Os principais cursos de água da bacia são os rios Capibaribe-Mirim, Siriji, Tracunhaém e Goiana. O rio Capibaribe-Mirim tem uma extensão aproximada de 93 km e drena a maior parte da bacia. Já o rio Siriji drena cerca de 16,6% da bacia e tem uma extensão de 74 km, enquanto o rio Tracunhaém apresenta uma extensão aproximada de 127 km, drenando cerca de 46% da área da bacia com suas nascentes no município de Orobó. O rio Goiana, por sua vez, é formado pela junção dos rios Tracunhaém e Capibaribe-Mirim, e tem uma extensão de aproximadamente 18 km até desaguar no Oceano Atlântico, segundo dados do Plano Hidro ambiental da Unidade de Planejamento 01 - Goiana de 2022 - PHA Goiana.

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio Goiana



Fonte: Adaptado de Silva *et al*. (2022).

Os trechos médio e sub-médio da bacia do rio Goiana estão localizados na região Agreste do Estado. Essa região é considerada intermediária entre as áreas de clima úmido (Zona da Mata) e de clima seco (Sertão), apresentando características ora de uma, ora de outra. Assim, nas áreas mais próximas ao Sertão o clima é quente e seco, e o período mais chuvoso vai de fevereiro a junho. No trecho sub-médio, a estação chuvosa se estende de março a julho (CONDEPE FIDEM, 2005).

A bacia do Rio Goiana, localizada nessa região, é de extrema importância para o abastecimento de água de várias cidades e comunidades ao longo de seu curso. Durante a estação chuvosa, os rios e riachos que compõem a bacia se enchem, proporcionando um alívio temporário para a escassez hídrica que afeta o Sertão e áreas adjacentes. Apesar do período chuvoso nessas regiões, as precipitações ainda podem ser irregulares e insuficientes para atender plenamente às necessidades da população e da agricultura local. Portanto, o manejo sustentável da água e o uso consciente dos recursos hídricos são fundamentais para garantir a sobrevivência das comunidades e a preservação dos ecossistemas frágeis do Sertão e da bacia do Rio Goiana (SILVA; GALVINÍCIO, 2011).

No estado, a Agência Estadual de Meio Ambiente - CPRH (2017) mantém um banco de dados com as informações de qualidade de água da bacia em estudo e a partir desses pontos de monitoramento, que serve como base para a análise da evolução temporal e espacial dos valores dos parâmetros. Dessa forma, é fundamental que o planejamento das atividades relacionadas ao gerenciamento da bacia hidrográfica leve em consideração esses dados de qualidade.

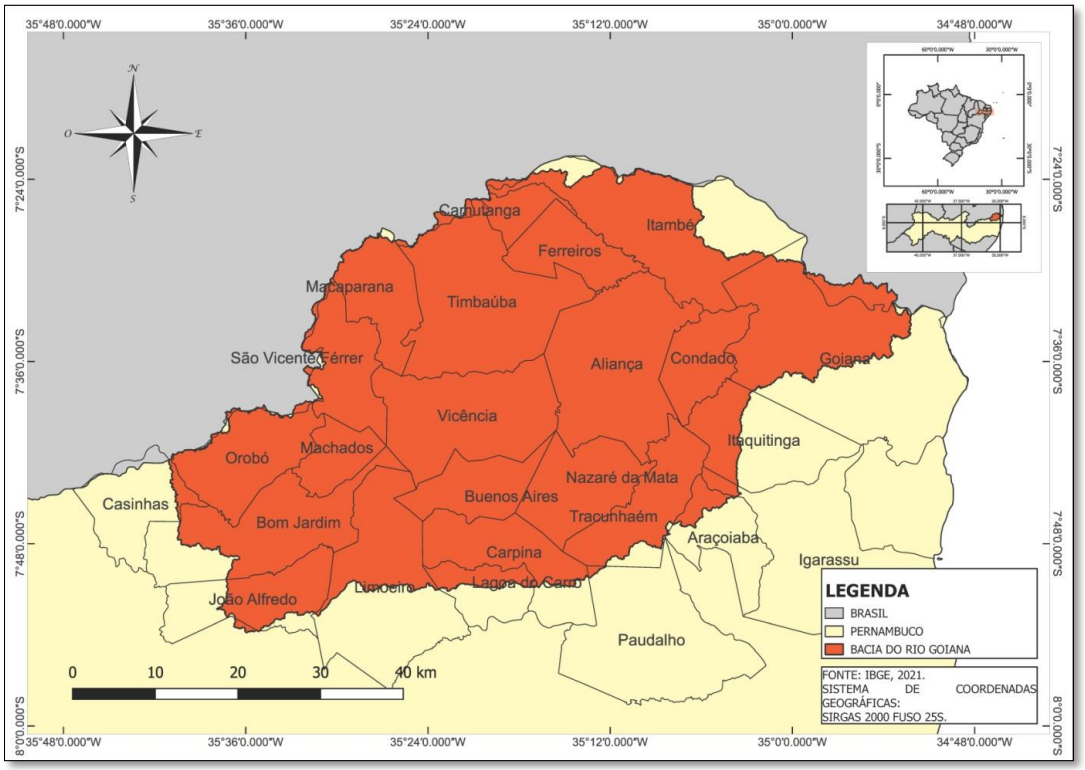
Rodrigues Jr. *et al.* (2022), ao analisarem a qualidade da água utilizou oito parâmetros nos pontos de coleta: potencial hidrogeniônico (pH), oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), turbidez, amônia, fósforo total, coliformes termotolerantes e condutividade elétrica (CE). Esses parâmetros foram obtidos por meio da Agência Estadual de Meio Ambiente (CPRH, 2017) e correspondem aos sete pontos de monitoramento ambiental na bacia hidrográfica em estudo. Esses dados são fundamentais para avaliar a qualidade da água ao longo do tempo e do espaço, contribuindo para o planejamento e gerenciamento adequado da bacia hidrográfica.

Os dados de qualidade da água obtidos por Rodrigues Jr. *et al.* (2022) consideraram os seis últimos períodos de análise dos parâmetros mencionados. Esses períodos são: junho de 2018 (estação chuvosa), setembro de 2018 (estação seca), dezembro de 2018 (estação seca), março de 2019 (estação chuvosa), junho de 2019 (estação chuvosa) e setembro de 2019 (estação seca). Essa abordagem permite realizar análises levando em consideração a sazonalidade da região, compreendendo tanto períodos chuvosos quanto secos.

A análise dos dados tem como objetivo verificar a conformidade dos valores dos parâmetros de qualidade em relação à Resolução CONAMA 357 (BRASIL, 2005). Essa resolução estabelece os limites de valores para os parâmetros de qualidade da água, visando assegurar a qualidade dos recursos hídricos. Ao comparar os valores obtidos nos pontos de monitoramento com os limites estabelecidos na resolução, é possível avaliar se a água está em conformidade com os padrões estabelecidos para sua utilização e preservação. Essa análise é importante para identificar eventuais problemas de poluição ou degradação da qualidade da água na bacia hidrográfica em estudo, permitindo tomar medidas adequadas para a sua proteção e recuperação, quando necessário.

A bacia abrange 26 municípios (Figura 2), dos quais 13 estão totalmente inseridos dentro da sua delimitação e 19 municípios possuem sua sede na bacia (APAC, 2019). Destes, Nazaré da Mata é o município com maior área (2.130 km²) que está totalmente inserido dentro da bacia, Paudalho é o de menor percentual de área, apenas 1% (276 km²). E, Lagoa do Carro que vem a ser o município que possui a menor área dentro da bacia, 70 km² (APAC, 2019).

Figura 2 – Municípios da bacia hidrográfica do rio Goiana

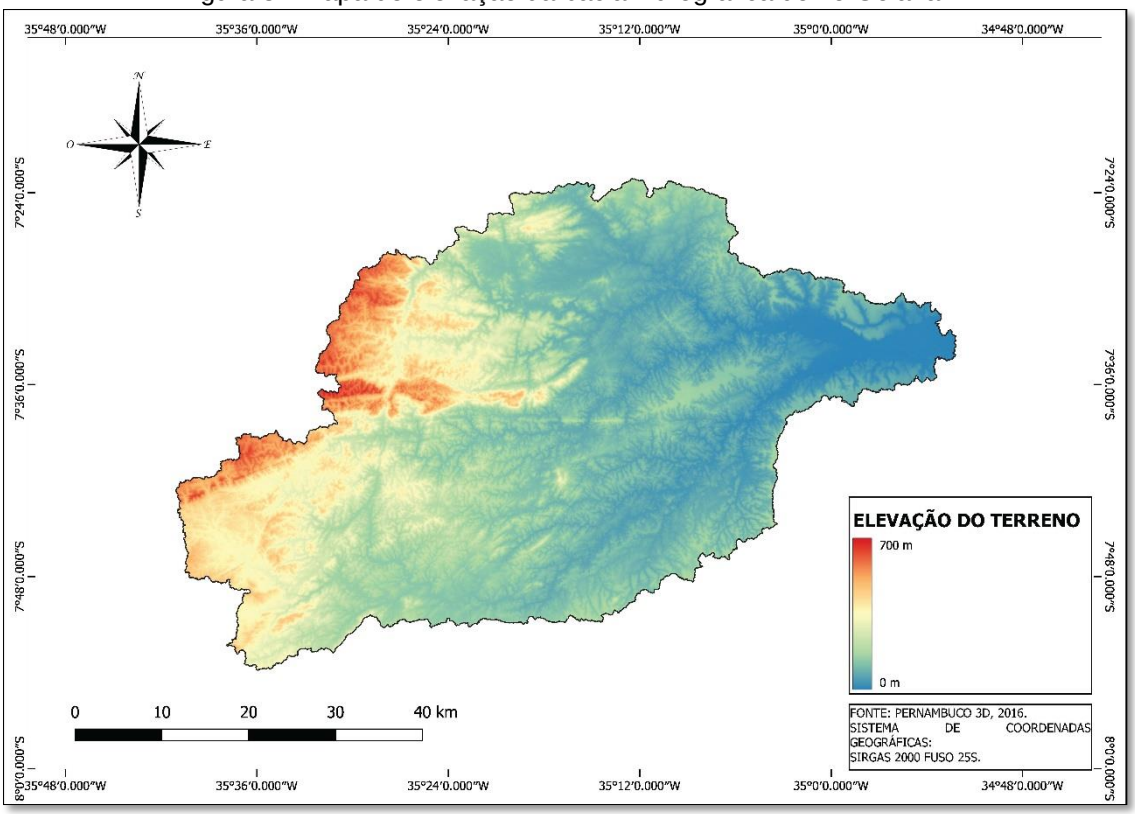


Fonte: Elaborado pelo autor a partir de IBGE (2021).

Como pode ser observada, a geomorfologia da região apresenta características distintas em termos de cotas topográficas. Observa-se que as menores altitudes estão localizadas mais a leste da bacia, como ilustrado na Figura 3, enquanto os valores das elevações aumentam significativamente em direção ao extremo oeste, atingindo cotas superiores a 700,00 m. O relevo é marcado por diferentes formas de modelagem na região costeira. Os Tabuleiros Orientais do Nordeste são encontrados nessa área, caracterizados por superfícies planas ou levemente onduladas. Além disso, é possível identificar áreas de acumulação próximas à foz dos rios principais, bem como planícies e terraços fluviomarinhos.

Ao se deslocar de oeste para leste, torna-se predominante a presença de formas de relevo reliquiares. Colinas arredondadas são encontradas nas Encostas Orientais do Planalto da Borborema, revelando vestígios de processos geológicos e erosivos ao longo do tempo. Essas características geomorfológicas desempenham um papel fundamental na configuração do território, influenciando aspectos como o escoamento da água, a formação de bacias hidrográficas e a distribuição da vegetação e dos recursos naturais.

Figura 3 - Mapa de elevação da bacia hidrográfica do rio Goiana



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de PE3D (2016).

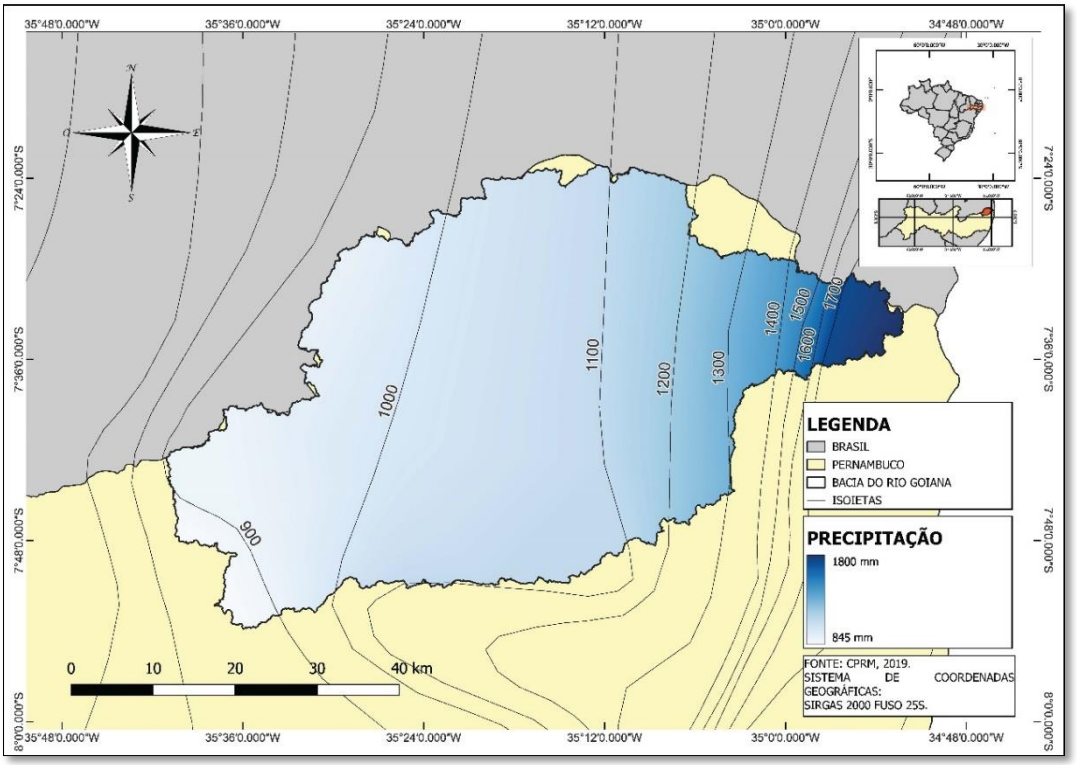
O trecho inferior que compreende a bacia está localizado na região conhecida como Zona da Mata e possui um clima caracterizado como quente e úmido. As médias pluviométricas nessa área são superiores a 1.000 mm anuais, chegando a ultrapassar os 2.000 mm nas regiões litorâneas. Nessa região, o período chuvoso se estende por seis meses, abrangendo os meses de março a agosto. Durante essa época, ocorrem chuvas intensas e frequentes, fornecendo um suprimento significativo de água para a região. Essas chuvas são essenciais para a manutenção da vegetação exuberante e para o funcionamento dos ecossistemas locais.

É importante destacar que o clima quente e úmido, juntamente com as chuvas abundantes, influencia diretamente as atividades agrícolas e o desenvolvimento da vegetação na Zona da Mata. Essa região é conhecida por sua fertilidade e diversidade biológica, sendo uma importante área de cultivo de culturas como cana-de-açúcar, café, frutas tropicais e outras culturas agrícolas (SILVA; GALVÍNCIO, 2011).

A precipitação média na bacia é entre 700 mm na parte mais próxima do Sertão e 2000 mm próximo ao litoral (Figura 4). A evaporação é elevada, superior a 1300 mm anuais na bacia. Os impactos das mudanças climáticas tendem a

provocar o aumento dos dias secos e a diminuição das variáveis relacionados as precipitações (APAC, 2019).

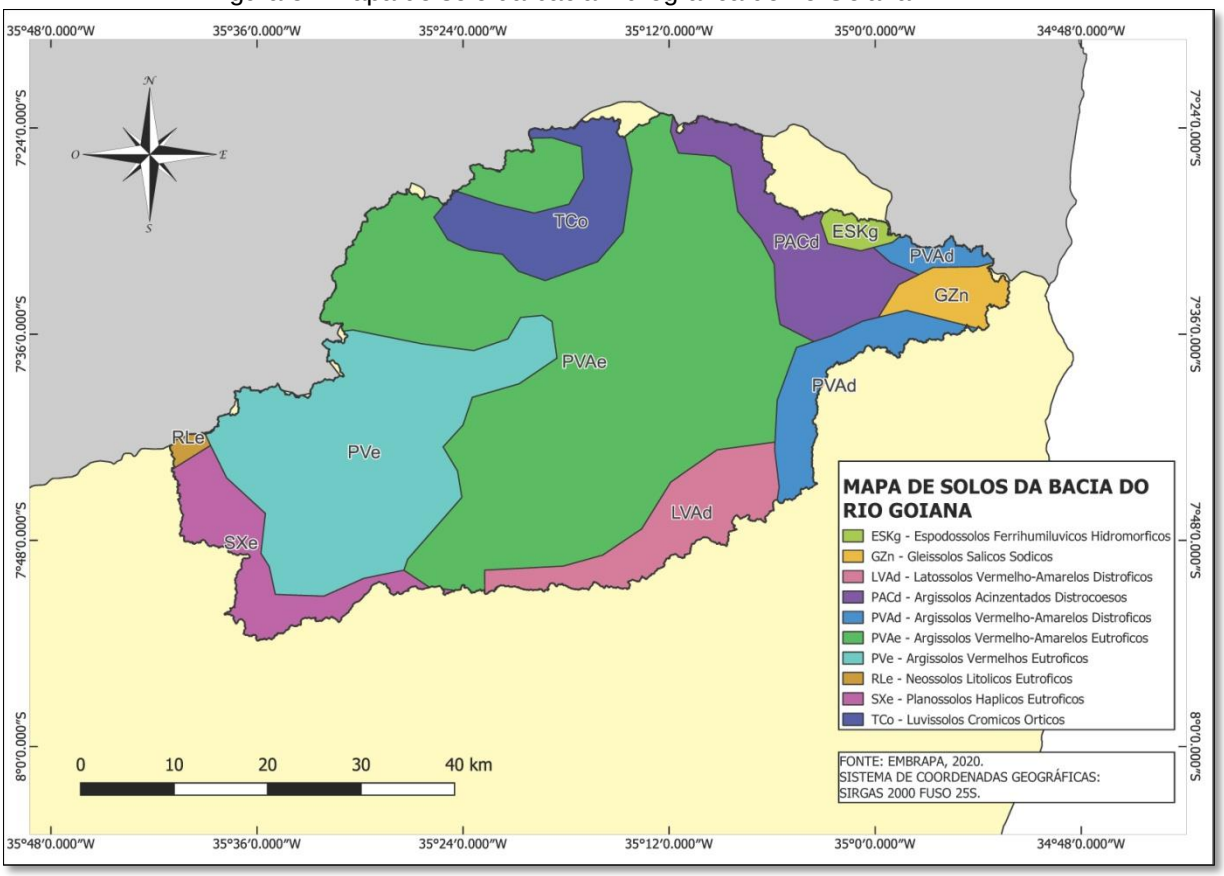
Figura 4 - Médias anuais pluviométricas da bacia hidrográfica do rio Goiana



Fonte: Elaborado pelo Autor a partir de CPRM (2019).

A bacia possui predominantemente solos do tipo Argissolos e Luvissolos. Os Luvilossolos são amplamente utilizados para pastagem, enquanto os Argilossolos são principalmente destinados à agricultura, exigindo maior cuidado devido à ocorrência de erosões (Figura 5). Quanto à classificação hidrológica, a maioria dos solos pertence ao grupo hidrológico B, que apresenta uma taxa de infiltração acima da média após intenso umedecimento prévio. A drenagem é moderada e a textura varia de média a argilosa. A presença desses tipos de solo contribui para a recarga dos aquíferos na bacia (EMBRAPA, 2020).

Figura 5 - Mapa de solo da bacia hidrográfica do rio Goiana

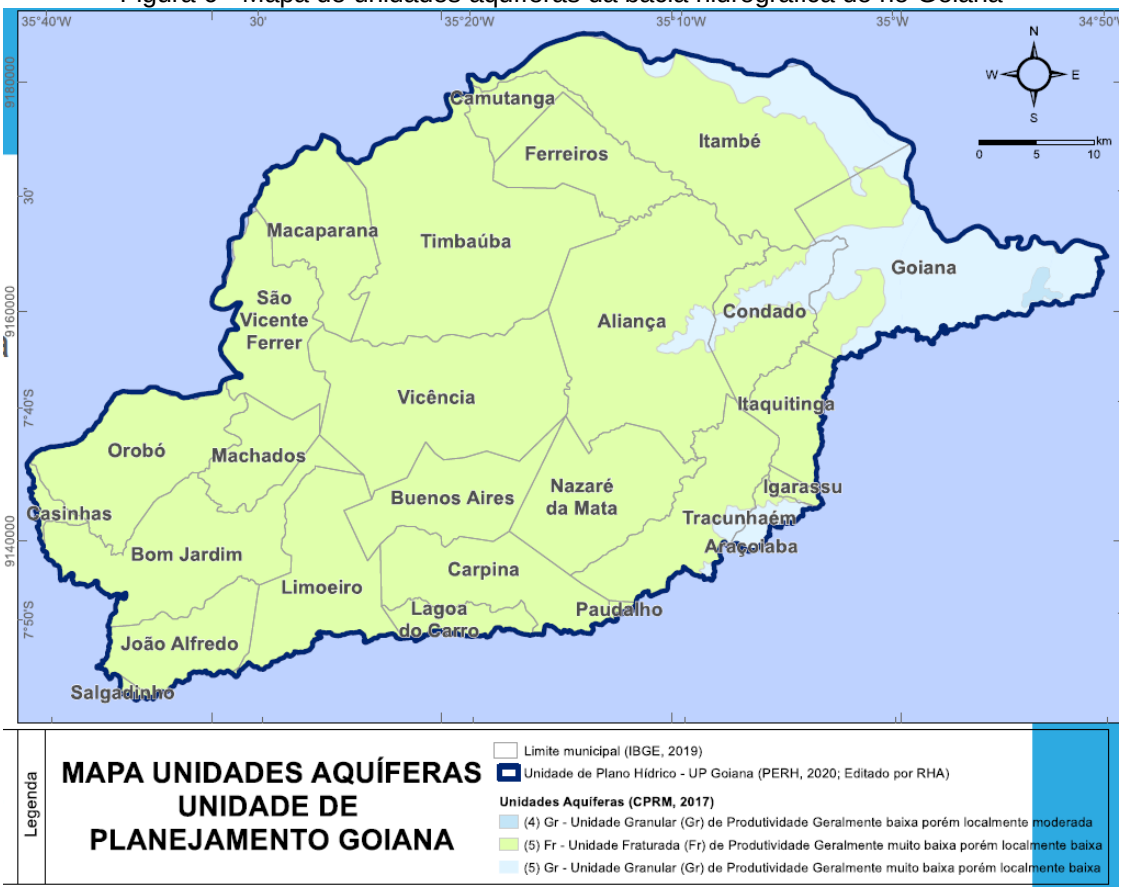


Fonte: Elaborado pelo Autor a partir de EMBRAPA (2020).

A bacia do rio Goiana está localizada principalmente sobre dois conjuntos geológicos distintos. Um deles é um conglomerado sedimentar da era Fanerozóica, enquanto o outro é composto por rochas metamórficas e magmáticas da era Proterozóica (Figura 6). Na região, há uma predominância de aquíferos fissurais, com destaque para o Complexo Salgadinho. As características geológicas, especialmente da extensa área de aquíferos fraturados, principalmente no interior da bacia, inseridos em rochas cristalinas magmáticas e metamórficas, são relevantes.

Na região litorânea, os aquíferos são predominantemente granulares. Essas duas dominialidades, aliadas às condições de alta temperatura e baixos índices pluviométricos, justificam o baixo índice hídrico regional, a baixa produtividade dos aquíferos, as altas salinidades das águas subterrâneas e as altas taxas de condutividade iônica (APAC, 2019). Segundo o banco de cadastro de outorga da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), os principais usos das águas subterrâneas na região são industriais e abastecimento público.

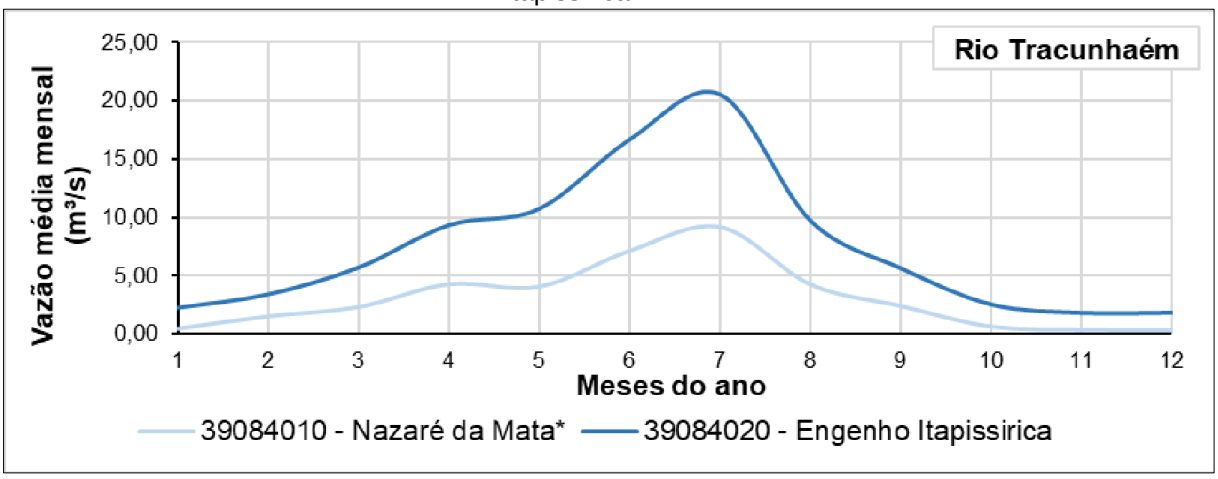
Figura 6 - Mapa de unidades aquíferas da bacia hidrográfica do rio Goiana



Fonte: APAC (2019).

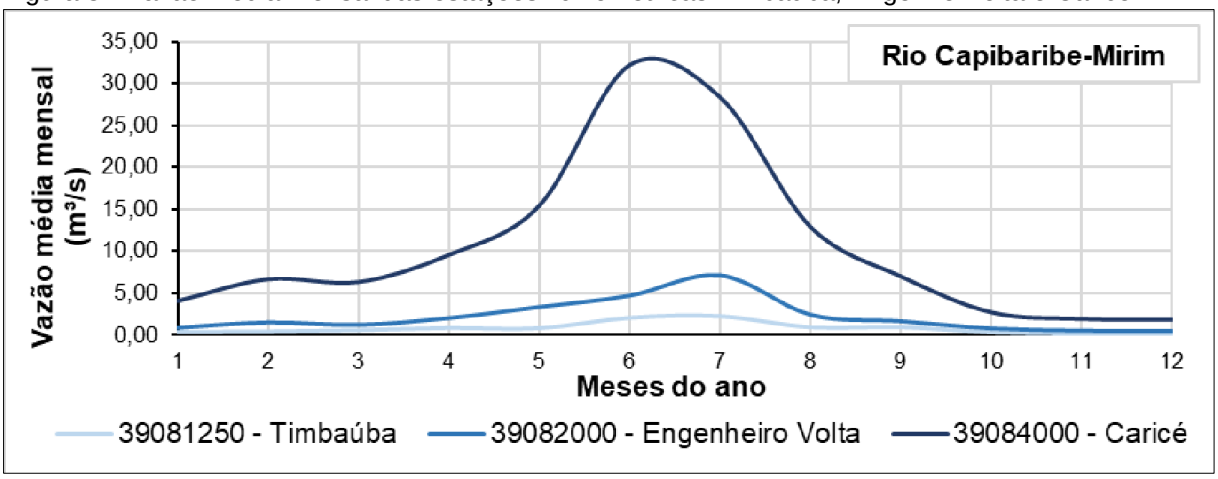
O Plano de Recursos Hídricos (PHA) da bacia do Rio Goiana indicou que as características das sub-bacias demonstram menor suscetibilidade a enchentes, com exceção das áreas de drenagem dos afluentes, tais como o Rio Caraú, Riacho Banana, Rio Água Tora e Rio Ferreiro. Além disso, vale ressaltar que o regime hidrológico na bacia segue uma tendência em que as descargas dos rios acompanham as precipitações, com os valores mais elevados ocorrendo entre os meses de abril a agosto (Figuras 7 e 8).

Figura 7 - Vazão média mensal das estações fluviométricas Nazaré da Mata e Engenho Itapissirica



Fonte: APAC (2019).

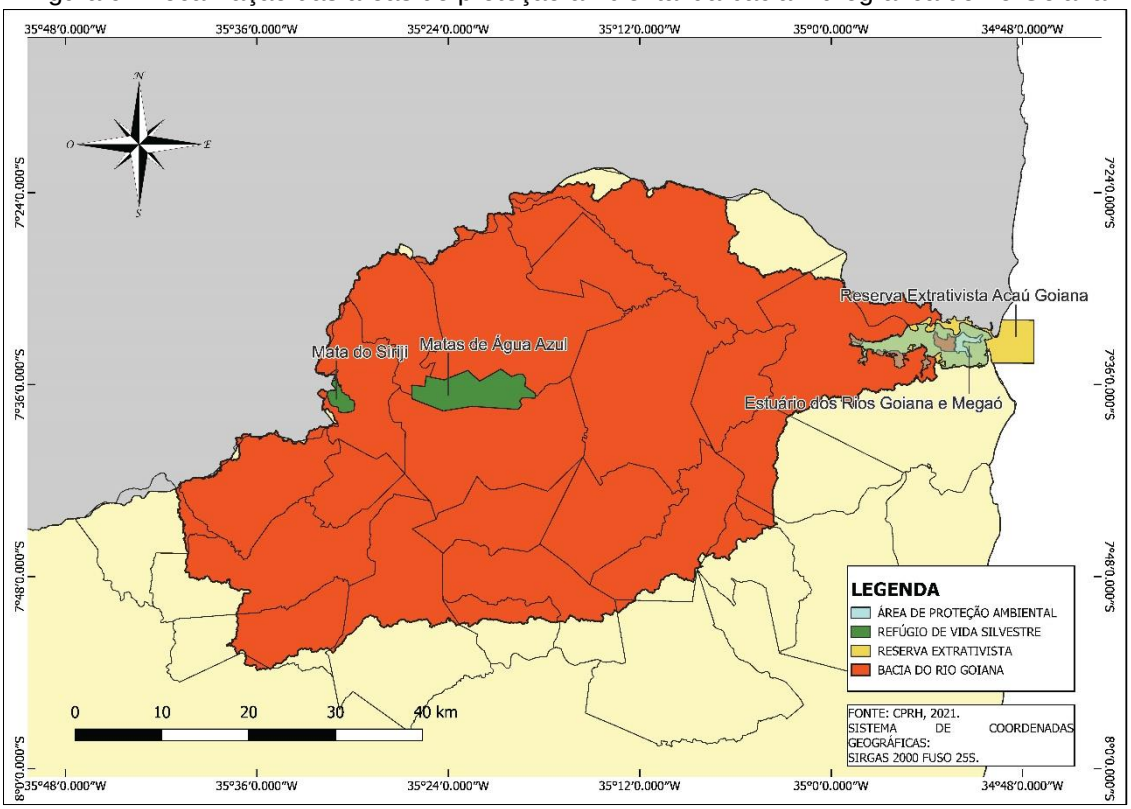
Figura 8 - Vazão média mensal das estações fluviométricas Timbaúba, Engenho Volta e Caricé



Fonte: APAC (2019).

A vegetação predominante na bacia apresenta características fitogeográficas da Zona da Mata. Nas áreas mais elevadas a oeste e à leste, há uma abundância de espécies vegetais perenifólias. No entanto, na região central, essas espécies são caducifólias, ou seja, perdem suas folhas em determinadas épocas do ano (APRILE; FARIAS, 2001). A bacia do rio Goiana possui cinco áreas de proteção presentes em seu território (Figura 9). São elas a Reserva Extrativista Acaú Goiana, os Refúgios de Vida Silvestre Mata do Siriji e Mata de Água Azul, e as Áreas de Proteção Ambiental dos Estuários dos rios Goiana e Megaó (CPRH, 2017). Essas áreas têm como objetivo a preservação da biodiversidade, a proteção dos ecossistemas e o uso sustentável dos recursos naturais na região.

Figura 9 - Localização das áreas de proteção ambiental da bacia hidrográfica do rio Goiana

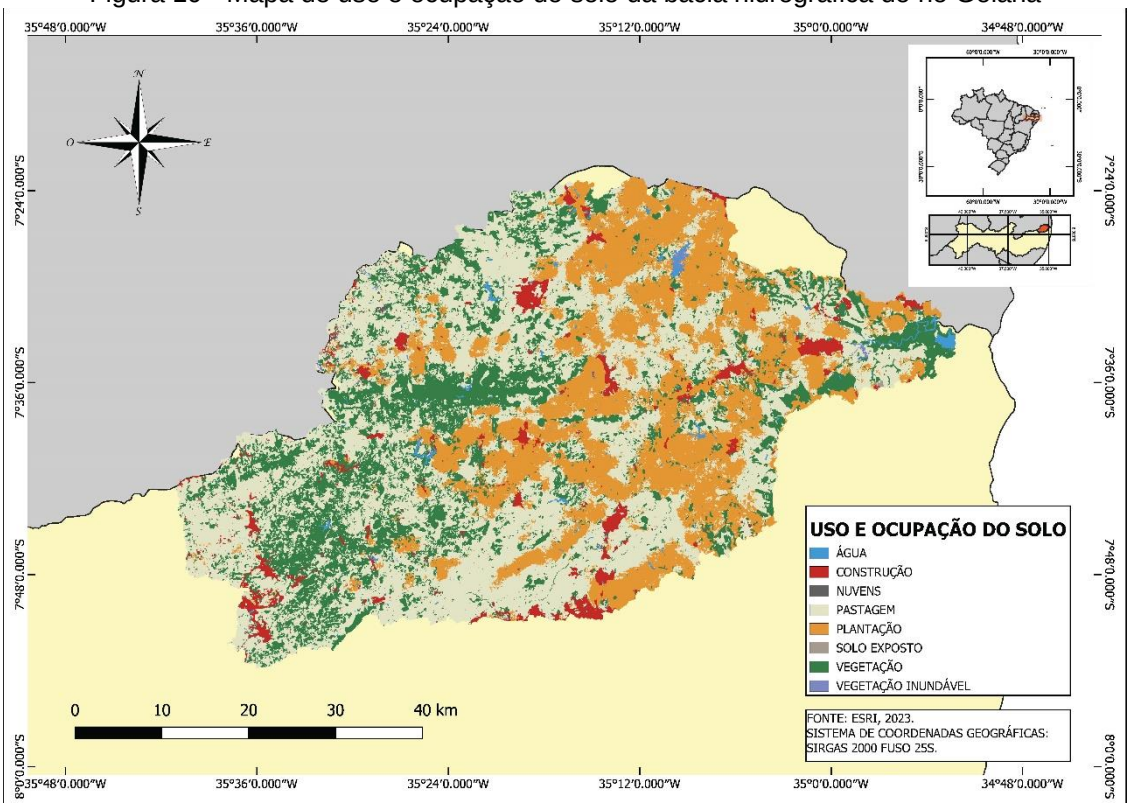


Fonte: Elaborado pelo autor a partir de CPRH (2021).

A dominialidade do rio Goiana segue os critérios estabelecidos pela Resolução 399/2004 da Agência Nacional de Águas (ANA, 2004). Em 2013, a Agência publicou a nona resolução, que determina a base cartográfica em escala de um milhão, sendo essa a diretriz oficial para a classificação. De acordo com esse critério, o rio Goiana é de domínio federal, uma vez que parte da bacia é divisa entre os estados de Pernambuco e Paraíba (APAC, 2019).

A bacia possui cinco tipos de uso do solo: uso urbano e industrial, áreas cultivadas, policultura e pecuária, áreas de Mata Atlântica, e manguezal e aquicultura na zona litorânea (Figura 10). A maior parcela da bacia é ocupada por mosaicos de agricultura e pastagem, representando 50,70% do total. Vale ressaltar também as áreas de agricultura semi-perene, que abrangem 15% da bacia, e as áreas exclusivas de pastagem, que correspondem a 18,80% da cobertura da bacia.

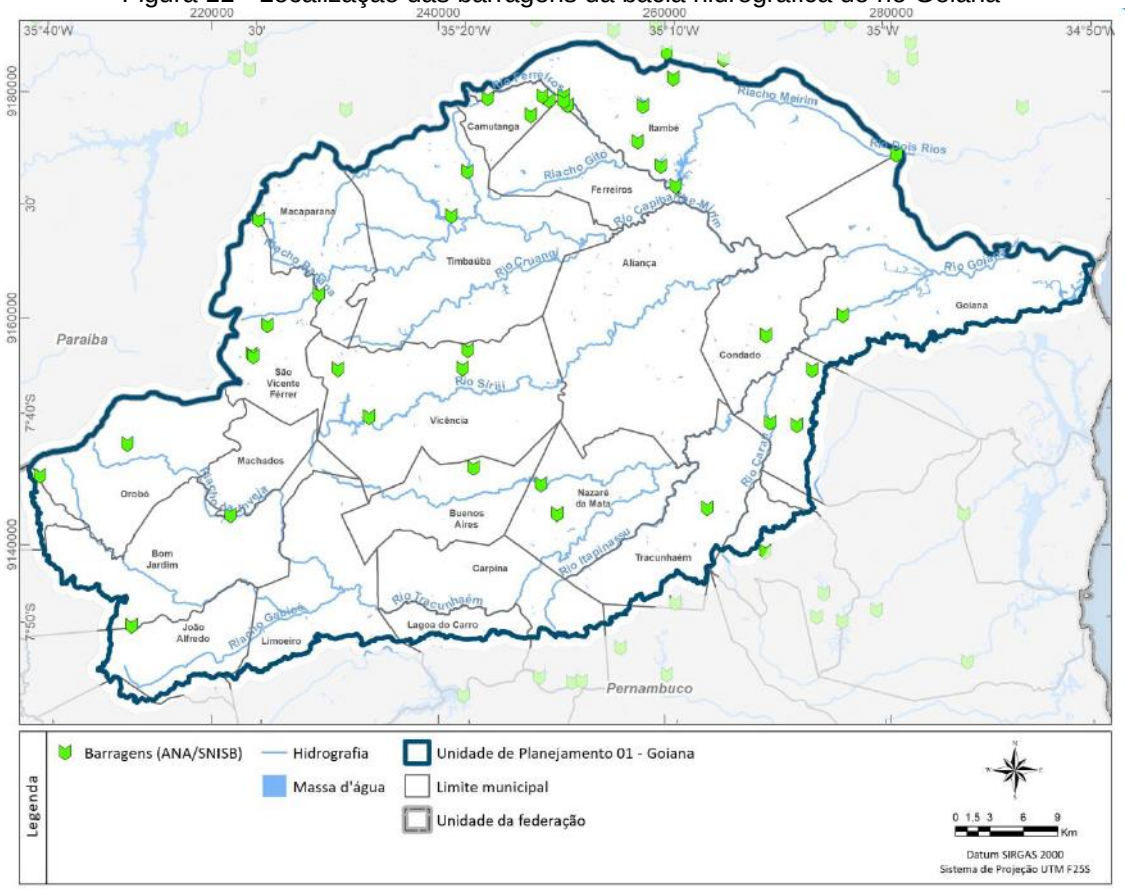
Figura 10 - Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio Goiana



Fonte: Elaborado pelo Autor a partir de ESRI (2023).

Na bacia, existem concessões para o uso da água destinadas ao abastecimento público, recepção de efluentes domésticos, industrial e agropecuária, além da irrigação de plantações (APAC, 2022). De acordo com o levantamento realizado no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), que reúne o cadastro de barragens de usos múltiplos da água, geração de energia elétrica, contenção de resíduos industriais e contenção de rejeitos de mineração em todo o território nacional, a bacia do Goiana possui 37 barragens, a maioria voltada para abastecimento humano e irrigação, das quais 9 possuem capacidade igual ou superior a 1 hm³ (Figura 11).

Figura 11 - Localização das barragens da bacia hidrográfica do rio Goiana



Fonte: APAC (2022).

A bacia possui, segundo o Censo de 2010, uma população de 835.846 habitantes distribuídos em seus 26 municípios. Araçoiaba apresentou o maior crescimento populacional desde 1991. A taxa de urbanização está acima de 70%, com uma redução da população rural, e há um aumento médio de 105% no índice de envelhecimento. A expectativa de vida aumentou de 63,50 para 71,50 anos entre 1991 e 2010, respectivamente. No entanto, a taxa média de mortalidade infantil dos municípios teve um aumento (APAC, 2022).

As principais atividades econômicas na região são a agricultura, com destaque para o cultivo de cana-de-açúcar, seguido de milho, feijão, fava e lavouras permanentes de banana, manga, limão e coco. Também vale ressaltar a pecuária, incluindo a carcinicultura, a criação de gado, suínos e aves. Além disso, o setor industrial possui relevância na região, com produção de produtos químicos (como fertilizantes) e farmacêuticos, têxteis, papel/papelão, couro e indústria automobilística, além do setor da construção (JATOBÁ; SILVA, 2022).

Em relação ao abastecimento de água, a bacia do Goiana possui seis sistemas integrados, sendo que o sistema Camutanga-Ferreiros é o único totalmente inserido na bacia. Além disso, existem os sistemas Siriji, Palmeirinha,

Carpina, Botafogo e Jucazinho, que estão parcialmente inseridos. A bacia também conta com sistemas isolados em 18 municípios para o abastecimento público, sendo que 6 desses municípios são atendidos apenas por sistemas isolados. As principais fontes de captação de água são mananciais superficiais e poços subterrâneos (JATOBÁ; SILVA, 2022).

O índice de coleta e tratamento de esgoto na bacia é de 2,02%, com 2,37% para as áreas urbanas. Já o índice de coleta sem tratamento é de 26,14% nas áreas urbanas. Apenas três municípios possuem coleta e tratamento de esgoto (ETE Goiana, ETE Nazaré da Mata e ETE Igarassu). Os demais são servidos por soluções alternativas e individuais, como as fossas sépticas (APAC, 2022).

Em relação aos resíduos sólidos, existem três destinos na bacia do Goiana: lixões, aterros sanitários e coleta seletiva. Todos os aterros estão localizados fora da bacia, mas pertencem a oito municípios da região (Aliança, Araçoiaba, Condado, Goiana, Igarassu, Itambé, João Alfredo e Timbaúba). A coleta seletiva está disponível em três municípios (Araçoiaba, Goiana e Vicência) (JATOBÁ; SILVA, 2022).

Alguns municípios dentro da bacia estão mais suscetíveis a eventos extremos, conforme constatado pelo PHA Goiana em 2022. São eles: Bom Jardim, Goiana, Macaparana, Nazaré da Mata, São Vicente Férrer, Timbaúba e Vicência. Essas áreas possuem dez trechos de rios com maior vulnerabilidade a inundações, destacando-se o trecho do rio Siriji no município de Vicência e do rio Tracunhaém no município de Goiana. Por outro lado, foram registrados 62 eventos de estiagem entre 2013 e 2019, sendo os municípios no oeste da bacia os mais afetados.

O PHA Goiana está relacionado à Política Estadual de Recursos Hídricos, pois é um instrumento de gestão instituído pela Política no estado de Pernambuco. Ele é elaborado em parceria com os Comitês de Bacias Hidrográficas (COBHs), municípios e sociedade civil organizada. O PHA Goiana foi finalizado em 2022 e propõe metodologias para determinar o enquadramento dos recursos hídricos, que é outro instrumento de gestão.

A outorga, que abrange a captação e o lançamento de águas superficiais e subterrâneas, é de responsabilidade da APAC. No entanto, o Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco (PERH/PE) propôs que as diretrizes gerais para outorga sejam elaboradas considerando as particularidades de cada

Unidade de Planejamento (UP) onde não houver COBHs e Planos de Recursos Hídricos (PDRHs). O PHA Goiana propõe ações caso seja necessária a readequação das diretrizes operacionais, técnicas e gerenciais relacionadas às concessões de outorga no estado de Pernambuco (APAC, 2022).

Outro importante instrumento é o Sistema de Informações de Recursos Hídricos (SIRH), que tem como objetivo coletar e disponibilizar dados sobre a situação dos recursos hídricos do estado. O PHA Goiana desenvolveu um banco de dados geoespacial alinhado com os aspectos estudados no Plano (APAC, 2022).

Em relação à cobrança pelo uso de recursos hídricos, a Política Estadual de Recursos Hídricos (artigo 47º) determina que é de responsabilidade dos Comitês de Bacias Hidrográficas (COBHs) realizar essa cobrança, por meio de delegação da autoridade outorgante, utilizando as Agências de Bacia dos COBHs. Na ausência da Agência de Bacias, os COBHs devem propor ao Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CRH) os valores a serem cobrados pelo uso da água na bacia (APAC, 2022).

2.2.2 Análise da oferta hídrica

O estudo foi focado nas sub-bacias drenadas pelos rios onde havia disponibilidade de dados fluviométricos e dados de outorga superficial vigentes. Dessa forma, foram analisadas uma sub-bacia drenada pelo rio Capibaribe-Mirim (P1), a sub-bacia do rio Siriji (P2) e duas sub-bacias do rio Tracunhaém (P3 e P4). Juntas, essas sub-bacias representam aproximadamente 89% da área total da bacia do rio Goiana (Figura 12). É importante ressaltar que, embora haja duas outorgas para o trecho final da bacia na base de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), não foram disponibilizados dados de estações fluviométricas para esse trecho, portanto, o trecho final do rio Goiana não foi abordado no estudo.

Inicialmente, foi realizado um levantamento de todas as estações fluviométricas na bacia do rio Goiana e selecionadas aquelas que possuíam dados consistentes (nível de consistência 2) suficientes para a construção da curva de permanência. Os dados dos postos fluviométricos foram obtidos através do site da HidroWeb (ANA, 2021), conforme listados na Tabela 1.

Neste capítulo, a bacia do rio Goiana foi subdividida em 5 sub-bacias, sendo que 4 dessas sub-bacias possuem exutórios nos postos fluviométricos

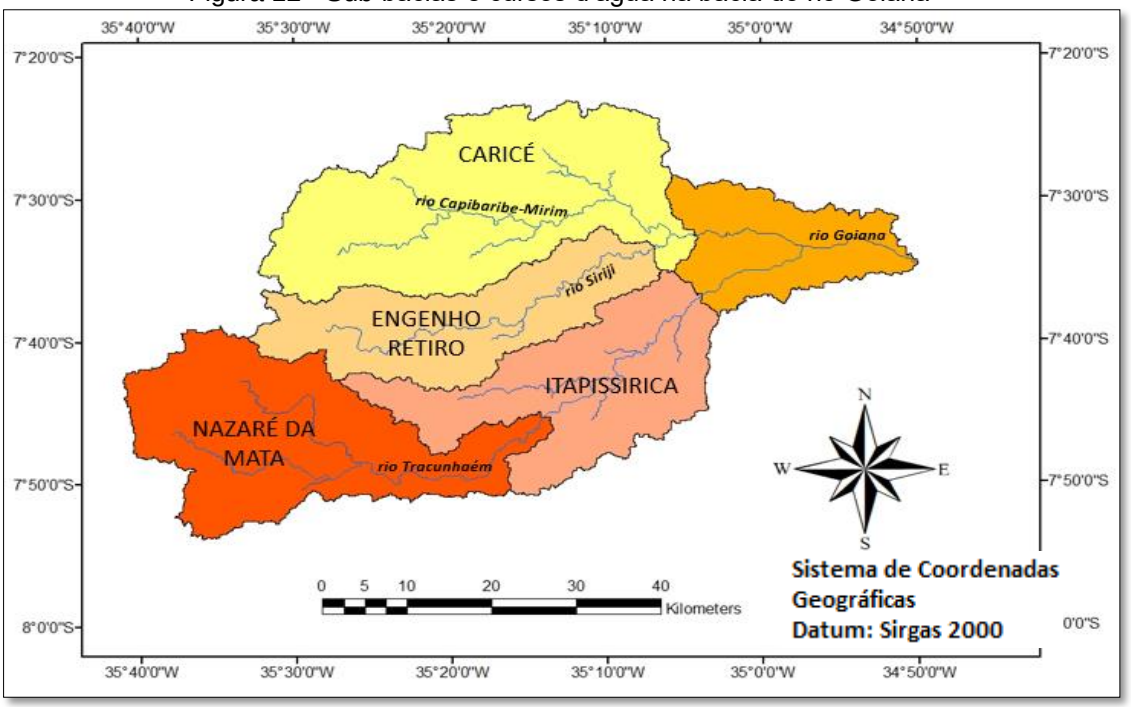
(pontos de controle). A última sub-bacia, localizada na foz, corresponde ao rio Goiana, porém não possui dados fluviométricos disponíveis. Para fins deste estudo, as sub-bacias receberam o nome das estações fluviométricas localizadas em seus exutórios (Figura 12).

Tabela 1 - Estações fluviométricas e sub-bacias correspondentes do rio Goiana entre o período de 1967 a 2014

Código	Nome	Latitude	Longitude	Areadedrenagem (km²)	Rio	Posto	Período de observação
39084000	Caricé	-7,5432	-35,0689	849,22	Capibaribe-Mirim	P1	1999 - 2014
39083000	Engenho Retiro	-7,5578	-35,1175	472,93	Siriji	P2	1977 - 2014
39084010	Nazaré da Mata	-7,7542	-35,2331	692,11	Tracunhaém	P3	1973 - 2014
39084020	Engenho Itapissirica	-7,6131	-35,0647	542,70	Tracunhaém	P4	1967 – 2014

Fonte: HidroWeb (ANA, 2021).

Figura 12 - Sub-bacias e cursos d'água na bacia do rio Goiana



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2022).

Para cada posto, foram determinadas as curvas de permanência utilizando os dados de descarga histórica consistidos até 2014, com níveis de consistência 2. Essa curva relaciona a vazão do rio com o percentual de tempo em que essa vazão é igualada ou superada ao longo do período histórico. A

curva de permanência é uma representação da disponibilidade hídrica de um trecho do curso d'água e resume a variabilidade das vazões (QUIMPO; MCNALLY, 1983; VOGUEL; FENNESSEY, 1994).

A análise das curvas de permanência permite avaliar os efeitos da sazonalidade no regime hidrológico da bacia e obter as vazões mínimas de referência de acordo com os critérios estabelecidos pelos órgãos gestores. A probabilidade de excedência de uma determinada variável ao longo do tempo é chamada de permanência. Portanto, a curva de permanência da vazão representa a probabilidade de uma descarga média diária no rio ser igualada ou superada durante o período amostral. As vazões médias diárias são tratadas como variáveis independentes e a cada descarga "q" é atribuída uma probabilidade de excedência "p" (Equações 1 e 2).

$$p = 1 - P\{Q \leq q\} \quad (1)$$

ou

$$p = 1 - F_q(q) \quad (2)$$

Onde:

p é a frequência de excedência;

q é a vazão;

P é a função de probabilidade;

$F_q(q)$ é a função densidade cumulativa de probabilidade das vazões.

Pode-se escrever a equação anterior em função de i valores de vazões (Equação 3):

$$p\,i = 1 - F\,q\,[q(i)] \quad (3)$$

Sendo:

i é o número de ordem do i ésimo valor;

$q(i)$é a ordenada de vazão de ordem i;

n é o número de dados ordenados;

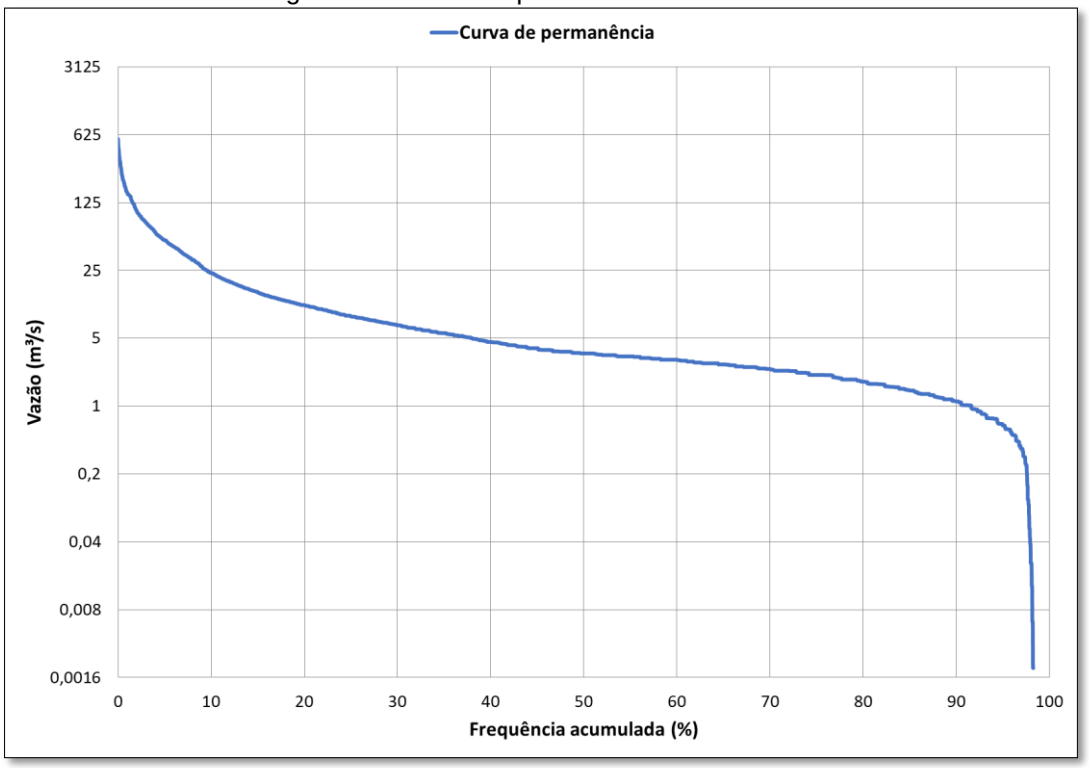
p_i é a probabilidade de excedência de q(i).

A posição de plotagem de *Weibull* correspondente é dada por (Equação 4):

$$p_i = \frac{i}{n+i} \tag{4}$$

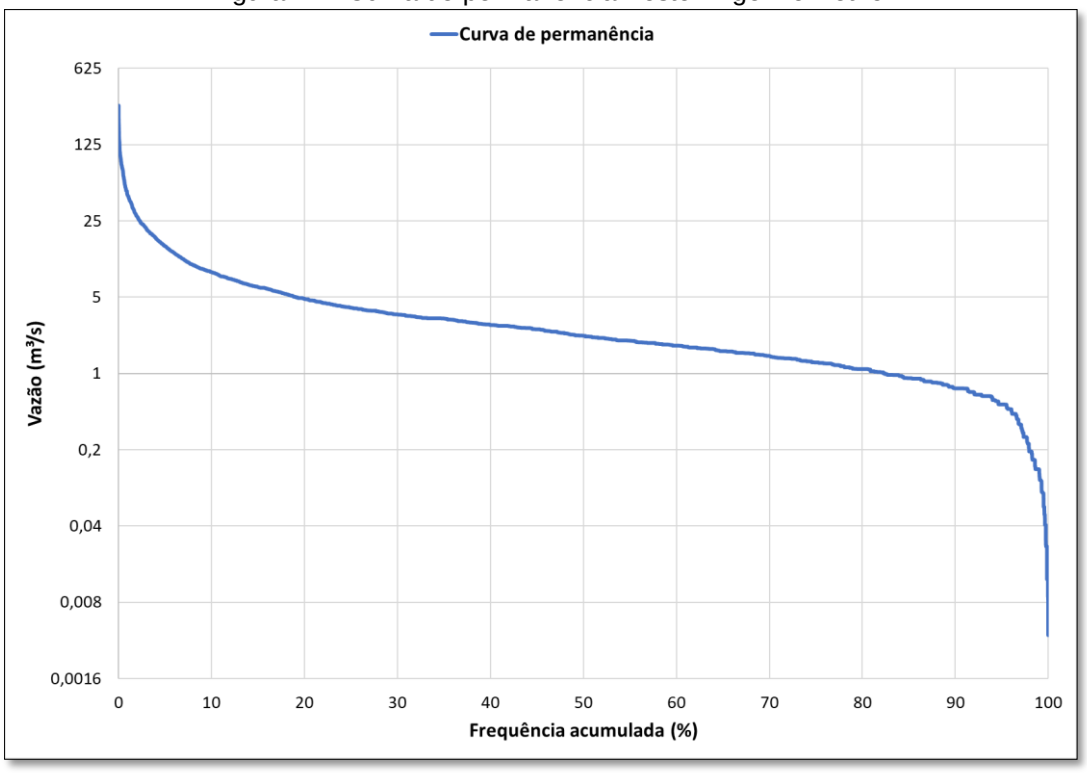
Serão apresentadas a seguir, nas figuras 13 a 16, as curvas de permanência dos postos fluviométricos.

Figura 13 - Curva de permanência Posto Caricé



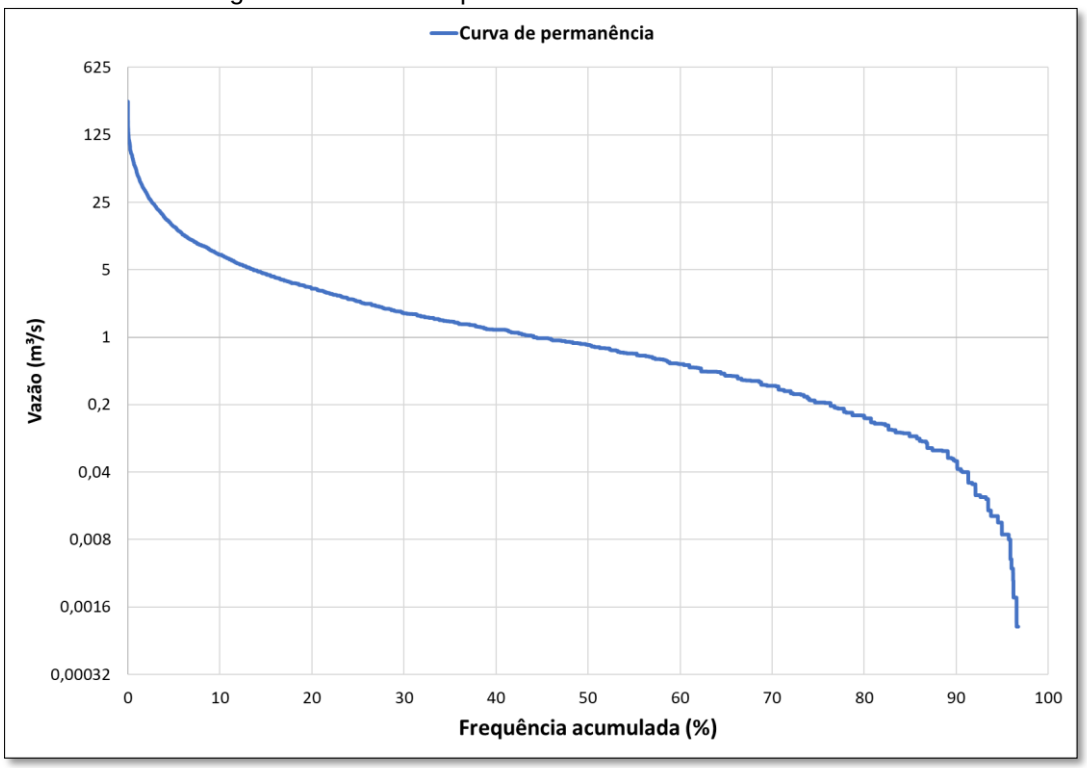
Fonte: O autor (2023).

Figura 14 - Curva de permanência Posto Engenho Retiro



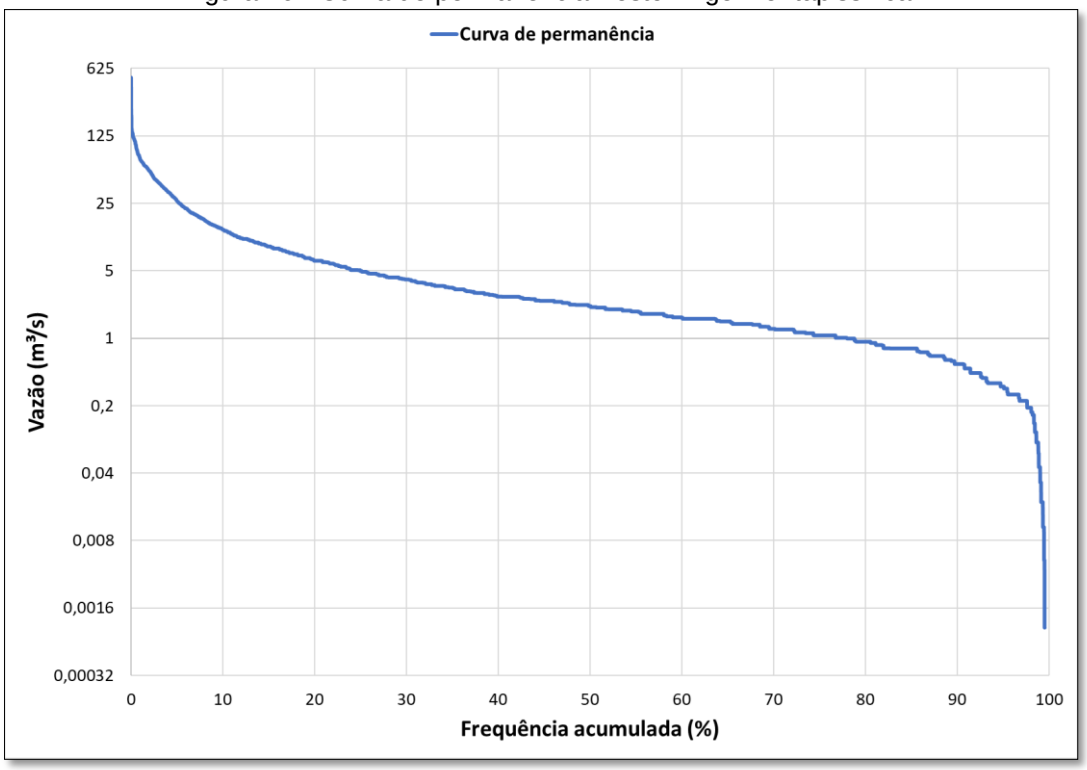
Fonte: O autor (2023)

Figura 15 - Curva de permanência Posto Nazaré da Mata



Fonte: O autor (2023).

Figura 16 - Curva de permanência Posto Engenho Itapissirica



Fonte: O autor (2023).

2.2.3 Análise da demanda hídrica

Embora a bacia de Goiana seja de domínio federal em seu rio principal, a maior parte dos cursos d'água nessa bacia possui outorgas concedidas pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). Durante o período de coleta dos dados, não foi possível levantar as outorgas emitidas pela Agência Nacional de Águas (ANA), devido à falta de informações sobre o documento que transferia a gestão do rio para o governo federal. No entanto, é importante ressaltar que o número de outorgas emitidas pela ANA nessa bacia é bastante reduzido, contando apenas com seis autorizações, o que indica um impacto relativamente pequeno no processo.

Logo, para a determinação das vazões demandadas foram considerados os dados de outorgas superficiais do órgão gestor do estado de Pernambuco, a APAC, que é a responsável pela emissão da concessão do direito de uso da água no Estado. Foram analisadas todas as outorgas válidas na APAC, filtrando as específicas da bacia do Goiana. Posteriormente, foram extraídas as coordenadas e inseridas em um *shapfile* do software de geoprocessamento QGIS, a fim de validar se todas as coordenadas estavam realmente dentro da

bacia, foram analisadas todas as outorgas válidas referentes às outorgas emitidas até outubro de 2020, período de levantamento dos dados do trabalho.

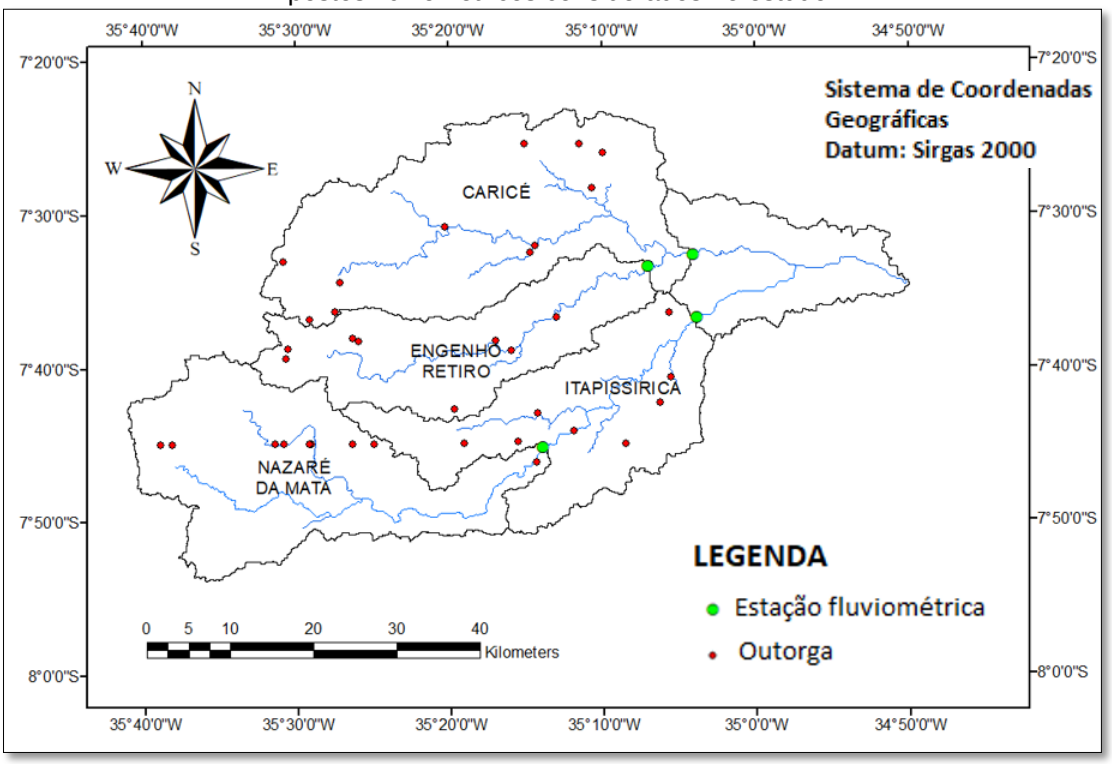
Considerando os usos de águas superficiais válidos, existem 38 captações de água na bacia do rio Goiana, todos distribuídos nas quatro sub-bacias analisadas no estudo. Entre os principais usos estão as atividades de irrigação, industrial e abastecimento público, detalhados, por sub-bacias na Tabela 2. Os usos foram distribuídos espacialmente, a fim de determinar o estresse hídrico por sub-bacia, como apresentado na Figura 17. Maior destaque para o uso com irrigação, devido ao forte setor econômico agropecuário da região que se encontra a bacia.

Tabela 2 - Usos de água outorgados em cada sub-bacia da bacia do rio Goiana

Sub-Bacia	Irrigação	Industrial	Abastecimento Público	Outros	TOTAL
Caricé	10	1	2	0	13
Engenho Retiro	3	0	5	0	8
Nazaré da Mata	5	1	1	2	9
Itapissirica	5	0	3	0	8
TOTAL	**23**	**2**	**11**	**2**	**-**

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Apac (2021).

Figura 17 - Distribuição espacial dos usos da água outorgados na bacia do rio Goiana e os postos fluviométricos considerados no estudo



Fonte: Adaptado de Silva *et al*. (2022).

2.2.4 Estimativas do estresse hidrológico

Segundo Harris *et al.* (2006), o estresse hidrológico (EH) é um indicador que quantifica a redução na descarga de um curso d'água devido às concessões para atender às diversas demandas de uso da água.

O estresse hidrológico foi estimado utilizando a metodologia proposta por Durães (2010), que estudou os critérios de concessão de outorga nos estados da Bahia, Ceará e Espírito Santo, estabelecendo um valor limite de descarga a ser concedido. Entre os três estados estudados, o Espírito Santo possui uma legislação mais rigorosa, permitindo que o total de vazões concedidas não ultrapasse 50% da Q90, sendo esse valor adotado para classificar o nível mais elevado de estresse no trecho analisado. Para fins de análise qualitativa, foi considerado o valor médio da classe mais restritiva para determinar as classes Baixo e Médio. De acordo com Durães, Mello e Beskow (2014), essa metodologia leva em conta a análise da curva de permanência, que reflete a sazonalidade, as características fisiográficas das sub-bacias, a localização e a geologia. Dessa forma, ela fornece aos órgãos gestores uma ferramenta para avaliar o estresse hidrológico.

O estresse hidrológico (HS) é calculado dividindo o somatório das vazões outorgadas em cada sub-bacia pelo limite correspondente de vazão que pode ser outorgado, conforme os critérios estabelecidos pelo estado. Em Pernambuco, esse limite corresponde à vazão com 90% de permanência (Q90), como mostra a Equação 5.

$$HS_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} Q_{outorga_j}}{Q_{90\%}} \times 100 \quad (5)$$

Onde, $\mathrm{HS_i}$ é o estresse hidrológico na sub-bacia i em porcentagem; $\mathrm{Q_{outorga_j}}$ é a vazão da outorga j(m³/s); n é o número total de outorga na sub-bacia i e $\mathrm{Q_{90}}$ é a vazão com 90% de permanência (m³/s).

O nível de estresse hidrológico foi avaliado em cada sub-bacia, com base nos pontos de controle fornecidos na Tabela 1, e esses resultados foram apresentados na Tabela 3. Importante ressaltar que, na obtenção do resultado não aplicada a Equação 5.

Tabela 3 - Classificação dos níveis de estresse hidrológico

Nível de Estresse	Critério
Baixo	O somatório das vazões outorgadas está abaixo de 25% de Q_{90}
Médio	O somatório das vazões outorgadas está entre 25 a 50% de Q_{90}.
Alto	O somatório das vazões outorgadas supera 50% de Q_{90}.

Fonte: Adaptado de Durães; Mello e Beskow (2014).

2.2.5 Alternativas para a solução do déficit hídrico

Ao analisar os dados disponíveis na Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) sobre a Bacia do Rio Goiana, é evidente que nos últimos anos a região tem enfrentado um déficit hídrico significativo (APAC, 2022). Esse déficit é resultado de um aumento considerável no uso de irrigação nas diversas culturas agrícolas, principalmente na produção de cana-de-açúcar, que ocupa a maior parte da área cultivada na região.

Além disso, fatores como o crescimento populacional, a demanda crescente por irrigação e o aumento da demanda por água nos setores comercial e industrial têm gerado conflitos pelo uso dos recursos hídricos na bacia. O

período mais chuvoso concentra-se nos meses de março a julho, enquanto os meses de setembro a fevereiro apresentam uma deficiência hídrica acumulada de 389,8 mm. No entanto, nos meses de maio a julho, há um excedente hídrico acumulado de 240 mm. Essas características classificam a região como uma área de clima úmido subúmido, megatérmico, com uma moderada deficiência hídrica durante o verão (MOURA, *et al.,* 2023).

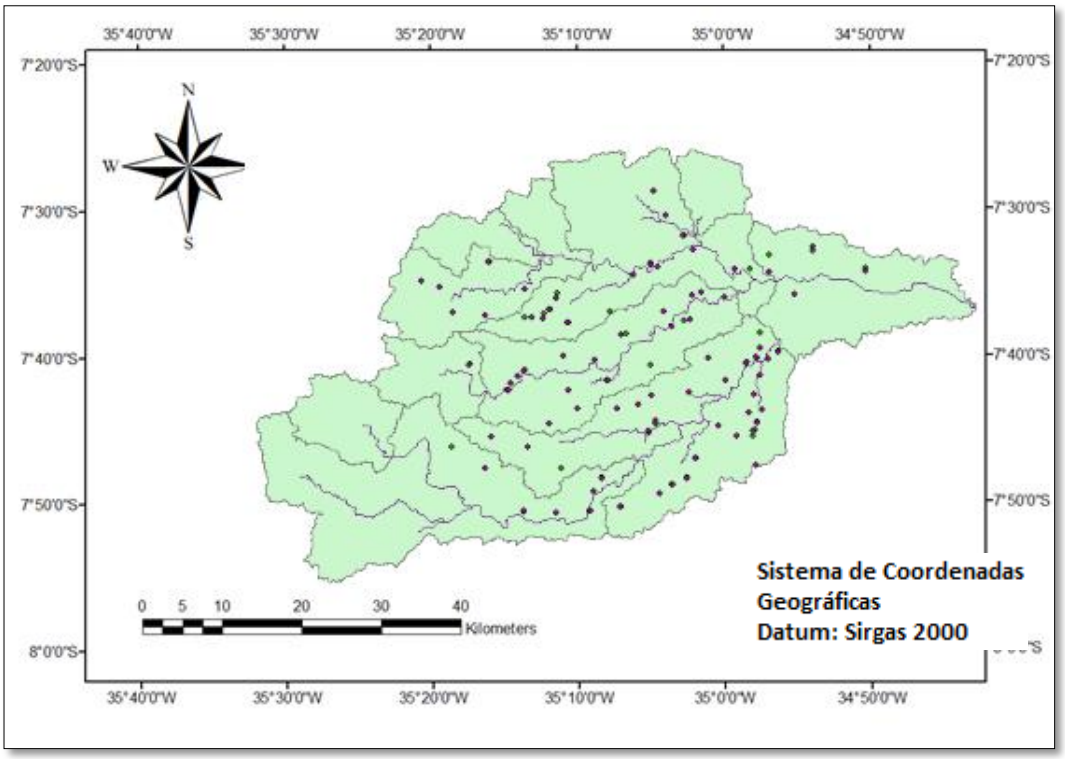
Na bacia do Goiana, foi realizado um estudo piloto chamado Águas do Norte em 2007, que analisou a implantação de 124 barragens de pequeno e médio porte na região da Zona da Mata Norte do estado de Pernambuco, com o objetivo de solucionar o déficit hídrico na área. A seleção dos locais para as barragens foi feita de maneira a distribuí-las de forma mais homogênea possível, visando atender o maior número de usos viáveis. Dessa forma, esse estudo abrangente, que engloba toda a bacia do Goiana, é considerado uma alternativa para mitigar o estresse hidrológico na região, com foco na resolução do déficit hídrico por meio da implantação dessas barragens (APAC, 2013).

Para cada barragem, foram calculadas três capacidades de acumulação e suas respectivas vazões regularizadas, levando em consideração níveis de confiança de 100%, 90% e 80% no atendimento da demanda hídrica. Durante as simulações, adotou-se um valor de 10% da vazão máxima retirada de cada barramento para o período chuvoso, que compreende os meses de abril a agosto. Essa limitação foi estabelecida devido à ausência de demanda por irrigação nesse período, que é o maior uso na região. Já para os meses de setembro a março, utilizou-se a vazão máxima de retirada do reservatório, uma vez que nesse período todos os usos coexistem, conforme mencionado no estudo Águas do Norte.

Além disso, foram adotados os seguintes valores para as vazões: médias afluentes naturais de longo período, vazões mínimas afluentes do mês de fevereiro - que representa o período de menor disponibilidade hídrica na região -, vazões regularizadas com 100% de confiança tanto para o período seco quanto para o período úmido, e vazões regularizadas médias, obtidas por meio de uma média ponderada entre as vazões regularizadas. Nessa média ponderada, foi atribuído o peso sete para o período seco e o peso cinco para o período úmido. Esses valores foram adotados para garantir uma análise abrangente e consistente das características hidrológicas da região, segundo o estudo de Torres (2007).

Utilizando o processo de geoprocessamento, foram selecionadas as barragens que se encontram dentro da bacia do Goiana, a partir das 124 estruturas disponibilizadas no estudo de Torres (2007). Essa etapa possibilitou a identificação das barragens responsáveis por suprir a demanda hídrica na referida bacia. Os resultados dessa seleção estão apresentados de forma visual na Figura 18, fornecendo uma representação gráfica das barragens selecionadas e sua distribuição espacial dentro da área de estudo.

Figura 18 - Distribuição espacial dos barramentos propostos pelo estudo Águas do Norte de Torres (2007)



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Torres (2007).

Com base na localização geográfica dos reservatórios em relação à sub-bacia do rio Goiana e nos resultados da avaliação do estresse hidrológico, é possível estabelecer uma hierarquia para a implantação dessas estruturas e identificar as regiões prioritárias para a execução de obras hídricas.

Essa abordagem estratégica proporcionará a mitigação do déficit hídrico e a redução de conflitos relacionados ao uso da água na referida bacia. Ao considerar a distribuição das barragens de acordo com as necessidades e a demanda por recursos hídricos em cada sub-bacia, é possível tomar decisões mais eficientes e direcionadas, garantindo o máximo aproveitamento dos recursos disponíveis e priorizando as áreas mais vulneráveis em termos de estresse hídrico. Dessa forma, a hierarquização das estruturas e a identificação

de regiões prioritárias contribuirão para o planejamento e a gestão sustentável dos recursos hídricos na bacia do rio Goiana.

2.3 Resultados e discussão

Na Tabela 4, foram registrados os resultados obtidos nas curvas de permanência, as demandas hídricas por sub-bacias e os níveis de estresse hidrológico correspondentes a cada uma delas, de acordo com a classificação mencionada anteriormente. Além disso, a Tabela 4 também apresentou a razão de escoamento (RE), que representa a vazão média específica por unidade de área.

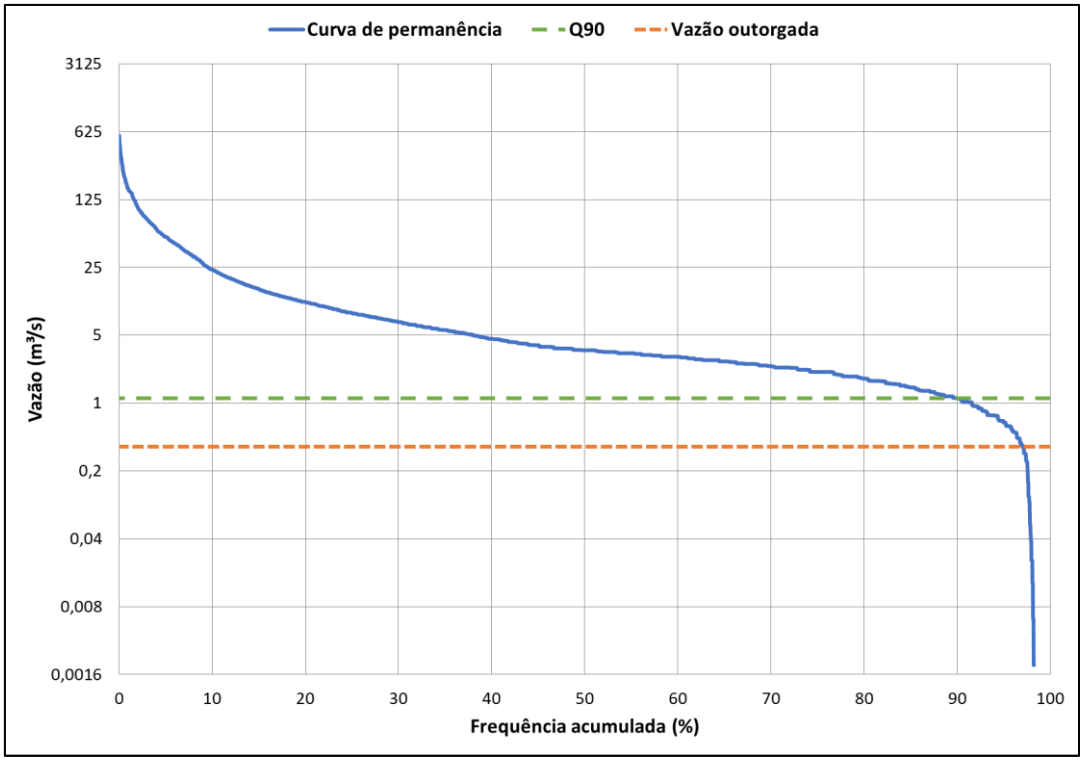
Tabela 4 - Informações sobre a vazão específica, a vazão de referência, demanda e indicador de estresse hidrológico

Ponto de Controle	RE $(\mathrm{L.s^{-1}.km^{-2}})$	Q_{90} (m³/s)	Q(outorga) (m³/s)	$\frac{Q_{outorga}}{Q_{90}} * 100$	EH
P1 (Caricé)	4,130	1,121	0,356	31,77 %	Médio
P2 (Engenho Retiro)	4,684	0,731	0,147	20,14 %	Baixo
P3 (Nazaré da Mata)	1,198	0,052	0,049	94,76 %	Alto
P4 (Itapissirica)	3,962	0,539	0,120	22,23 %	Baixo

Fonte: O autor (2023).

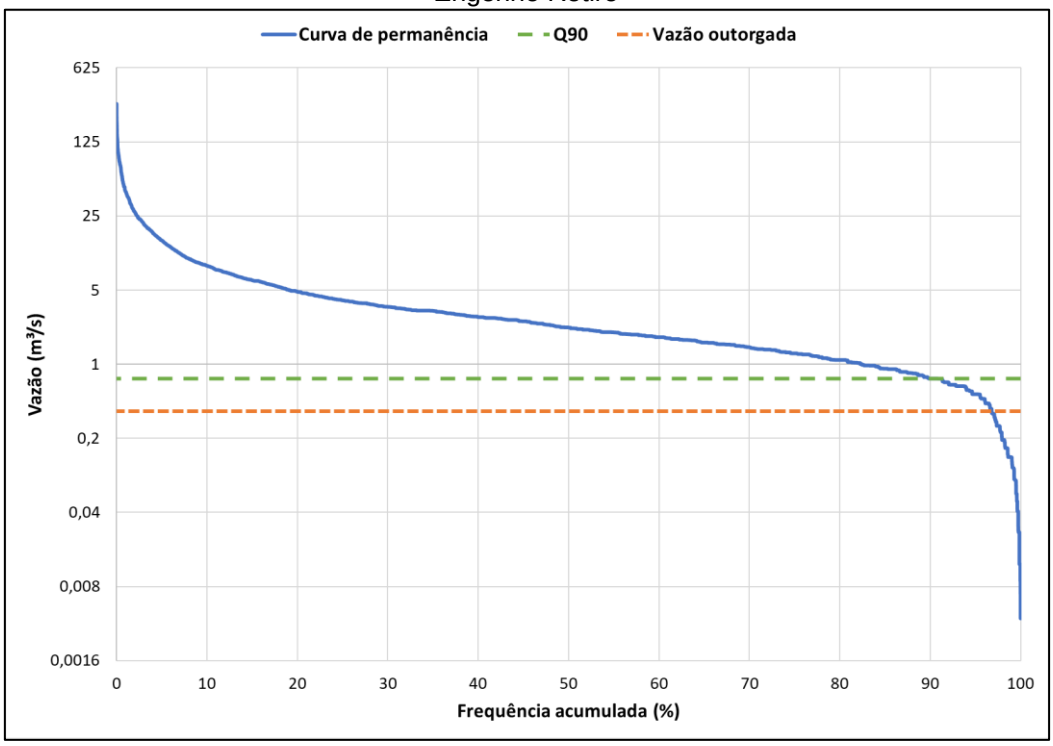
Nas Figuras 19 até 22, é possível observar as curvas de permanência que mostram as demandas outorgadas em cada sub-bacia, bem como os valores correspondentes a Q_{90} para as quatro seções de controle que foram estudadas.

Figura 19 - Curva de permanência, Q_{90} e a demanda outorgada para sub-bacia Caricé



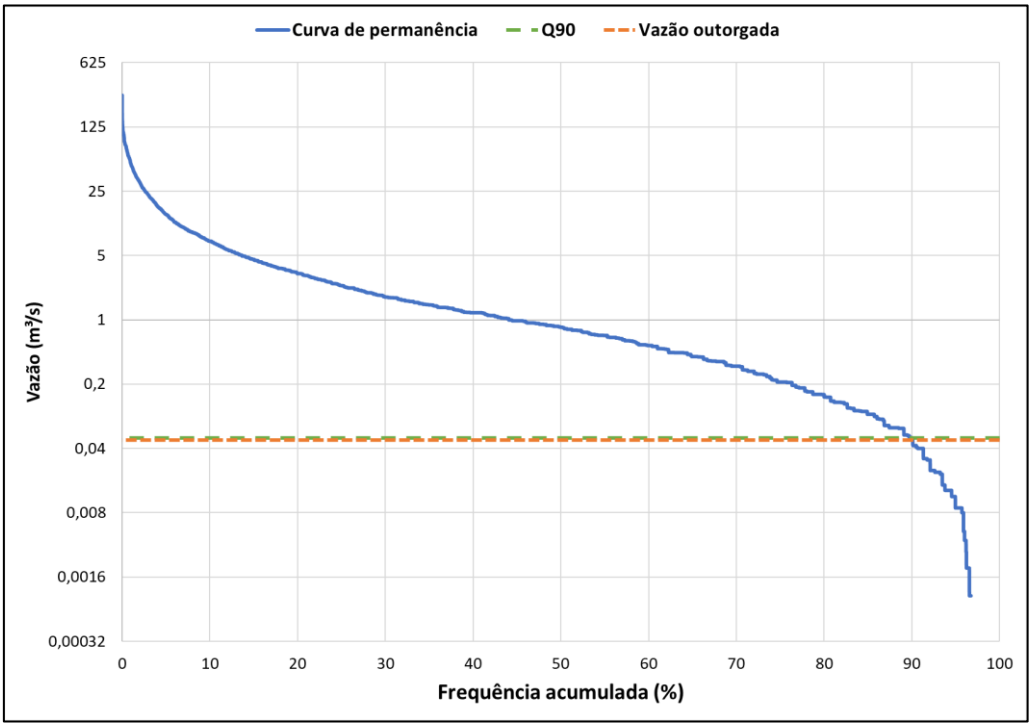
Fonte: O autor (2023).

Figura 20 - Curva de permanência, Q_{90} e a demanda outorgada para sub-bacia Engenho Retiro



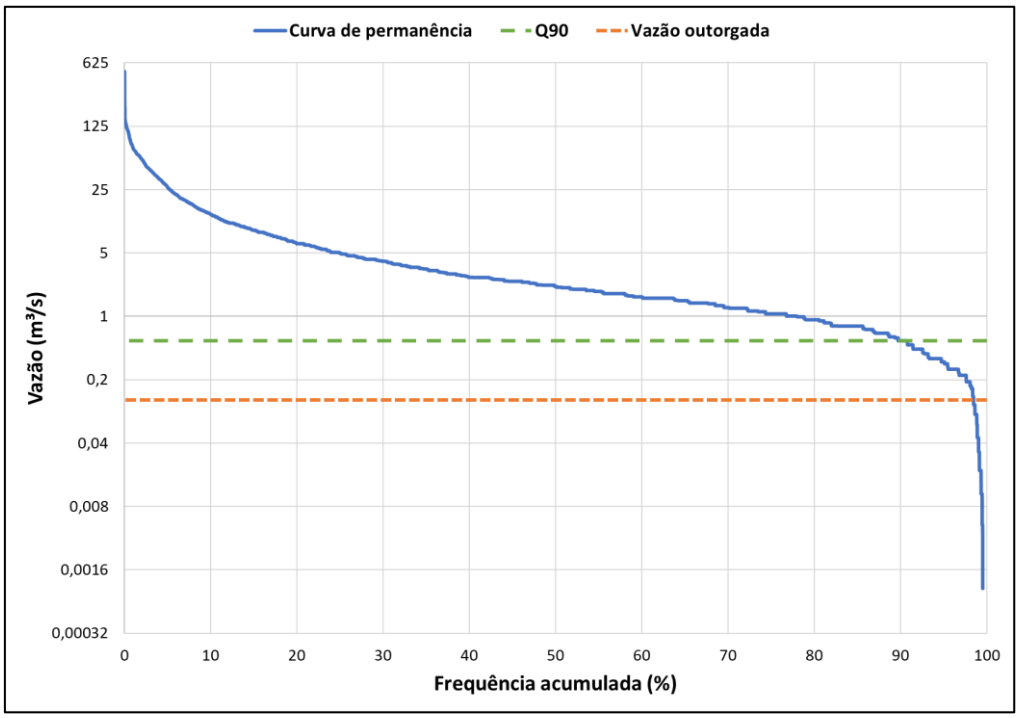
Fonte: O autor (2023).

Figura 21 - Curva de permanência, Q_{90} e a demanda outorgada para sub-bacia Nazaré da Mata



Fonte: O autor (2023).

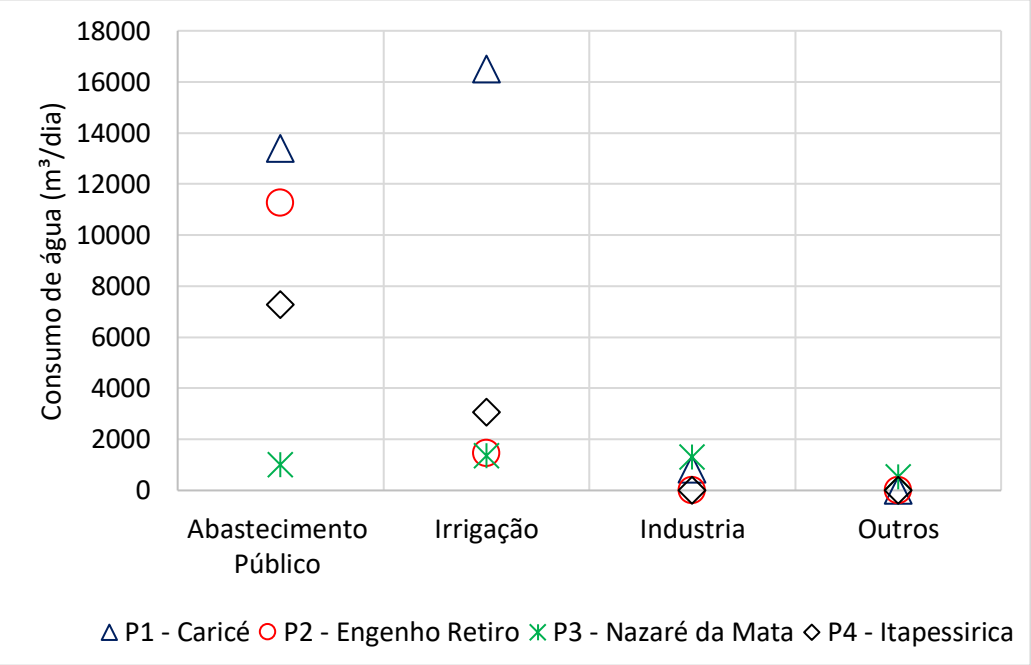
Figura 22 - Curva de permanência, Q_{90} e a demanda outorgada para sub-bacia Engenho Itapissirica



Fonte: O autor (2023).

A Figura 23, por sua vez, apresenta os consumos de água por diferentes usos nos pontos de controle, fornecendo informações sobre como a água está sendo utilizada em cada área analisada.

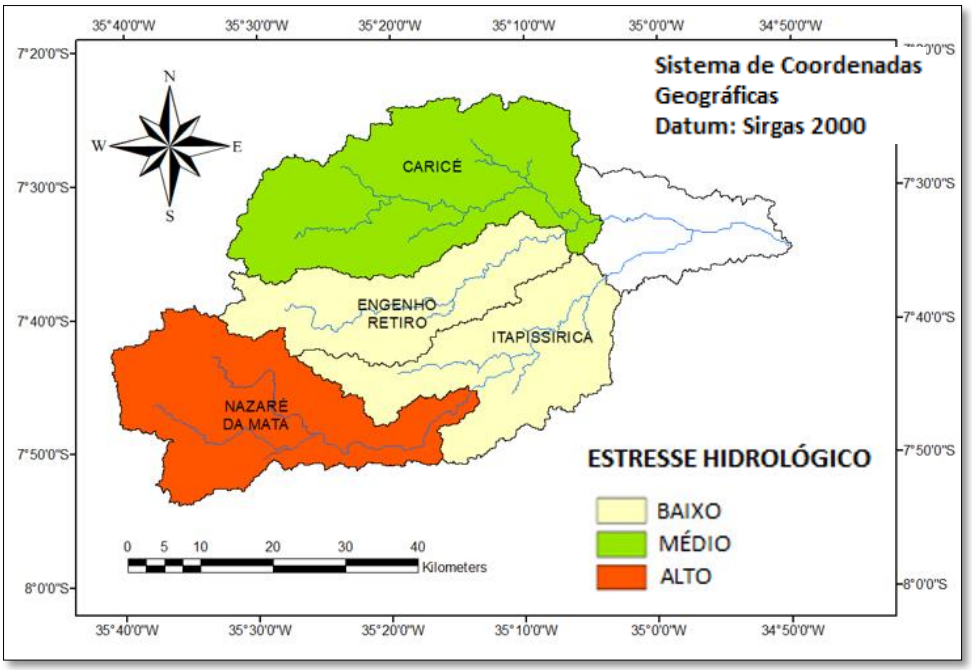
Figura 23 - Demandas hídricas por uso nos pontos de controle, da bacia do rio Goiana



Fonte: Adaptado de Silva *et al*. (2022).

Já na Figura 24, é apresentado o mapeamento do estresse hidrológico nas sub-bacias do rio Goiana que foram analisadas. Esse mapa destaca as áreas onde existe uma maior pressão sobre os recursos hídricos, indicando os níveis de estresse em cada sub-bacia.

Figura 24 - Mapa do estresse hidrológico por sub-bacia, bacia do rio Goiana



Fonte: Adaptado de Silva *et al*. (2022).

Um fator importante a ser destacado é a constante atualização do banco de dados da APAC (Agência Pernambucana de Águas e Clima), o que permite uma avaliação precisa das vazões outorgadas. Essa atualização contínua é fundamental para facilitar a gestão dos recursos hídricos no Estado, garantindo um uso mais eficiente e sustentável dos recursos disponíveis.

Na sub-bacia do rio Capibaribe-Mirim, especificamente na seção de controle localizada na Estação Caricé (P1), que corresponde a cerca de 29,62% da bacia do Goiana, foi observada uma demanda hídrica total de 0,356 m³/s. Esse valor representa aproximadamente 31,77% da descarga disponível para concessão na região.

Com base nesses números, a sub-bacia do Caricé é classificada como tendo um nível de estresse hidrológico "Médio". A maior parte da vazão outorgada, cerca de 0,155 m³/s, é destinada à COMPESA para abastecimento público. Essa parcela corresponde a aproximadamente 43,57% das vazões outorgadas na sub-bacia.

É importante destacar que o percentual mais significativo das outorgas na sub-bacia Caricé é direcionado ao abastecimento público devido ao maior número de áreas urbanas na bacia. Apesar de apresentar um nível de estresse hídrico considerado "Médio", é sugerido que as futuras concessões para o uso

da água sejam avaliadas criteriosamente em termos dos benefícios socioeconômicos da região.

Além do abastecimento público, essa região também possui uma demanda significativa de água para irrigação, especialmente impulsionada pela atividade de bananicultura.

A área de contribuição do rio Tracunhaém foi dividida em duas sub-bacias, sendo que cada uma delas possui um ponto de controle específico. A sub-bacia de Nazaré da Mata (P3) e a sub-bacia do Engenho Itapissirica (P4) são os exutórios desses pontos de controle.

O consumo de água nas duas sub-bacias é de 0,049 m³/s e 0,120 m³/s, respectivamente. No entanto, na sub-bacia de Nazaré da Mata, foi observado um alto grau de estresse hidrológico, atingindo 94,76% e classificado como "Alto". Esse alto nível de estresse hidrológico é principalmente resultado do consumo de água em atividades industriais na região e na irrigação para o cultivo da cana-de-açúcar.

Esses resultados são semelhantes aos encontrados em estudos anteriores realizados em bacias hidrográficas no estado de Minas Gerais, como apontado por Durães; Mello e Beskow (2014). Essa similaridade sugere que o alto grau de estresse hidrológico é um desafio comum em diferentes regiões, o que reforça a necessidade de medidas de gestão e controle dos recursos hídricos para garantir a sustentabilidade dessas bacias.

Ao analisar as concessões de uso em toda a bacia do rio Goiana, é possível observar que a sub-bacia de Nazaré da Mata representa apenas 7,00% da soma das vazões de outorga. No entanto, essa sub-bacia enfrenta desafios em termos de disponibilidade hídrica em comparação com as demais sub-bacias. É importante levar em consideração os impactos causados por essas demandas excessivas para a gestão dos recursos hídricos nessa região. Apesar da importância econômica da indústria na sub-bacia, é necessário avaliar os impactos ambientais no ecossistema do rio e considerar a possibilidade de estabelecer um limite máximo em relação à descarga com 90% de permanência no tempo (Q_{90}) ao emitir outorgas futuras.

Já a sub-bacia com seção de controle na estação Engenho Itapissirica (P4), no rio Tracunhaém, apresenta um nível de estresse hidrológico classificado como "Baixo", indicando uma região com um razoável conforto em termos de disponibilidade hídrica. A vazão total estimada para outorga nessa sub-bacia é

de 0,539 m³/s, o que corresponde a aproximadamente 22,00% do total de descarga disponível para concessão em todas as sub-bacias analisadas. O abastecimento público é a maior demanda concedida nessa sub-bacia, representando aproximadamente 70,00% das concessões.

No caso da sub-bacia com seção de controle na estação Engenho Retiro (P2), no rio Siriji, é observada uma demanda hidrológica total de 0,147 m³/s, o que corresponde a aproximadamente 22,00% do total dos usos consuntivos válidos para as sub-bacias analisadas. Essa sub-bacia possui um nível de estresse hidrológico classificado como "Baixo", com cerca de 20,00% da descarga limite (Q90) concedida. O uso predominante nesse trecho é o abastecimento público, com um total de outorgas de 0,130 m³/s, representando aproximadamente 89,00% do total concedido na sub-bacia e sendo a maior proporção para essa finalidade entre todas as sub-bacias analisadas.

Durães, Mello e Beskow (2014) enfatizaram que houve um aumento no nível de estresse hidrológico em uma das bacias estudadas em comparação com os resultados de Durães (2010) na mesma bacia. Os autores argumentam que esse aumento no estresse hidrológico está relacionado à inclusão de usuários insignificantes no banco de dados, o que aprimora o processo de avaliação do grau de comprometimento dos recursos hídricos. O estudo não considerou os valores dos usos insignificantes devido à indisponibilidade desses dados, o que merece atenção, pois mesmo sem essa informação, uma sub-bacia apresentou um nível elevado de estresse hidrológico.

É fundamental, contudo, que os gestores de recursos hídricos estejam atentos aos usos considerados insignificantes, conforme definidos em Pernambuco para as águas superficiais, como derivações e captações com vazão média inferior a 0,5 L/s, e os barramentos de rios intermitentes com volume de acumulação máximo de 200.000 m³ (APAC, 2022).

Os resultados obtidos indicam a necessidade de uma discussão mais aprofundada sobre as concessões para esse tipo de uso, especialmente nas sub-bacias com maior estresse hidrológico, uma vez que um grande número deles pode comprometer as futuras demandas por água. É importante considerar os impactos cumulativos e potenciais e assegurar que a gestão dos recursos hídricos leve em conta essas questões para garantir a sustentabilidade do abastecimento de água e evitar conflitos futuros.

No âmbito internacional, pode ser citada a Bacia do Murray-Darling é uma das maiores e mais importantes bacias hidrográficas da Austrália. Ela abrange uma vasta área geográfica que se estende por vários estados australianos, como Queensland, Nova Gales do Sul, Vitória, Austrália Meridional e Território da Capital Australiana. Essa região é conhecida por seus rios, riachos, pântanos e áreas úmidas, e desempenha um papel essencial como fonte de água para a agricultura, o meio ambiente e as comunidades locais. Apesar da sua extensão no ponto de vista geográfico, a bacia apresenta pluviosidade considerada baixa, com uma média anual de 457 mm. Há variações consideráveis no período de chuvas de um ano para outro com ciclos intensos de secas, sendo essas muito frequentes (BOND *et al.,* 2017).

Assim como na Bacia do rio Goiana, a Bacia do Murray-Darling a irrigação desempenha um importante papel facilitador da produção agrícola na região, no entanto, a segurança hídrica da região foi ameaçada pela variação da precipitação climática. Entre as décadas de 1950 a 1960 foram construídos grandes reservatórios de água no intuito de favorecer a irrigação, o que por um lado fomentou a produção agrícola e por outro resultou no aumento dramático do uso da água destinado a irrigação durante o período das secas.

Bond *et al.* (2017) apontam que o uso da água varia entre as partes norte e sul da bacia. No Sul, existem grandes represas que armazenam água para atender às necessidades de irrigação na produção de alimentos, como hortaliças, vegetais e laticínios. Por outro lado, no Norte, a água é principalmente obtida diretamente dos rios ou capturada durante as enchentes e armazenada em áreas planas, sendo principalmente utilizada no cultivo de algodão. Esses diferentes modos de uso da água têm causado impactos negativos na quantidade e no fluxo dos rios, prejudicando o ecossistema dos rios e das áreas alagadas que dependem das enchentes sazonais. Como resultados têm surgido conflitos relacionados ao uso e à qualidade da água.

Essa experiência mostra a relevância de estudar o impacto da implantação de reservatórios na bacia para diminuir o déficit hídrico e reduzir o nível de estresse na bacia.

No ano de 2007 o parlamento Australiano aprovou o chamado “Ato da Água de 2007” ou “*Water Act 2007*” que teve por objetivo a melhoria nos resultados de gestão de água da região. O plano incluiu alguns elementos, dentre eles uma determinação formal do volume para retirada destinado a

irrigação e um suporte ambiental que atuaria como um gestor das outorgas para o uso de água. Entretanto, o plano apenas se tornou efetivo em 2012 com a determinação de metas claras para recuperar a vazão ecológica, restringindo inclusive, a captação de água de importantes rios da Bacia do Murray-Darling destinados ao uso na irrigação. A política governamental optou por investir em medidas de aumento da eficiência hídrica, em vez de comprar outorgas de uso da água, visando reduzir perdas físicas sem diminuir o volume total usado na irrigação. Até 2021, aproximadamente AU$ 6 bilhões foram gastos na recuperação de 70% do volume de água necessário para garantir a sustentabilidade hídrica, conforme previsto no Plano de Bacia de Murray-Darling (GRAFTON; WHEELER, 2018). Esse é outro caminho que pode ser adotado na redução do estresse hídrico nas sub-bacias, não só a construção de obras para aumento da disponibilidade hídrica.

Corroborando ao estudo Bond (2021) sugere que uma das possíveis formas de sanar o problema, seria a adoção de uma abordagem descentralizada e participativa, considerando os usos múltiplos da água. Isso envolve estabelecer limites e volumes sustentáveis de água, incluindo a identificação da vazão ecológica necessária para preservar o ecossistema ribeirinho. Além disso, o estudo aponta a fundamental importância do estabelecimento de regras claras para adaptar as outorgas de uso da água às mudanças de longo prazo na disponibilidade hídrica.

No Brasil, o estado de Alagoas, propôs o desenvolvimento de um modelo conceitual de tomada de decisão em grupo para diagnosticar as barreiras existentes na gestão pública orientada por resultados do Sistema de Gestão de Recursos Hídricos (SGRH). O modelo fundamenta-se em um método de pesquisa operacional flexível que incorporou feedbacks sistemáticos sobre as metas de não conformidade, aplicados ao contexto do repasse de recursos financeiros do governo por meio do Programa de Fortalecimento da Gestão de Recursos Hídricos (PROGESTÃO). O objetivo do programa é fomentar a integração entre a gestão de recursos hídricos (WRM) e a regulamentação do uso da água, tanto em nível nacional quanto estadual.

O programa prevê quatro tipologias para medir a intensidade dos conflitos pelo uso da água nas bacias hidrográficas: (A) Baixo; (B) Regular; (C) Alto; (D) Muito Alto. A tipologia é escolhida pela unidade da federação de acordo com seu nível de complexidade atual de gestão embasados em normativos legais. No

primeiro ciclo do programa (2013-2017), Alagoas foi classificado na tipologia B. No entanto, de acordo com o relatório do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada de 2017, algumas metas estabelecidas nesse ciclo não foram alcançadas, enquanto outras foram subestimadas. Diante disso, verificou-se que a classificação não era a mais adequada. Consequentemente, no segundo ciclo (2018-2021), o estado de Alagoas foi reclassificado como Tipologia C, a qual apresenta um maior grau de complexidade e desafios (LEVINO *et al.,* 2023).

No âmbito do programa, foram abordados os desafios relacionados aos diversos usos dos recursos hídricos, destacando-se a necessidade de implementar ações para alcançar as metas estabelecidas. O modelo conceitual proposto teve como objetivo auxiliar os gestores públicos estaduais a compreender os problemas associados ao não cumprimento dessas metas, visando a melhoria dos processos deficientes e o aprimoramento da gestão dos recursos hídricos em suas múltiplas utilizações. Essa abordagem visa elevação da eficiência do sistema de outorgas e a redução de perdas que venham estressar o sistema.

A implementação do PROGESTÃO em Alagoas teve um impacto positivo na gestão dos recursos hídricos do estado, estimulando o planejamento, monitoramento e controle das águas. No entanto, apesar dos benefícios observados, o programa não alcançou plenamente os objetivos estabelecidos, resultando em um menor financiamento por parte da Agência Nacional de Águas (ANA) e afetando as atividades diárias do departamento e o sistema de gestão da água.

Stinghen e Mannich (2022) traçaram um panorama da gestão de bacias críticas nos estados do Brasil, com foco voltado a alocação de água em situações de escassez e demanda superando a disponibilidade hídrica. Dezessete estados foram utilizados no levantamento hídrico, dentre eles estão: São Paulo, Paraná, Bahia, Ceará, Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Goiás, Rio Grande do Norte, Distrito Federal, Espírito Santo e Maranhão.

Para a execução da pesquisa, foi realizado um levantamento das estratégias adotadas pelas instituições estaduais de recursos hídricos, identificando suas peculiaridades, ferramentas e denominações utilizadas para alocar água nessas situações. Observou-se que a Alocação Negociada foi destacada como uma importante abordagem, porém muitos estados não realizam nenhum tipo de procedimento para lidar com essas situações. O estudo

sugere a utilização de um indicador comum que reflita o grau de comprometimento de uma bacia, sendo o balanço entre as demandas e a disponibilidade hídrica a principal variável para identificar áreas críticas.

A pesquisa examinou a evolução da regulamentação das outorgas nos estados brasileiros ao longo do tempo, identificando se houve a implementação de procedimentos ou ações específicas para lidar com áreas críticas. Na maioria dos estados brasileiros não há procedimentos bem definidos para o tratamento de áreas críticas. Aproximadamente 40% dos estados possuem alguma forma de ferramenta ou regulamentação nesse sentido. Geralmente, os estados que já consolidaram ou implementaram o instrumento de outorga há mais tempo são aqueles que possuem algum tipo de procedimento. Alguns estados iniciaram o processo de regulamentação da outorga antes mesmo da Lei das Águas de 1997.

2.4 Conclusões da análise do estresse hidrológico

O estudo realizado buscou avaliar o nível de estresse hidrológico nas sub-bacias do rio Goiana, em Pernambuco. A pesquisa utilizou como base as vazões superficiais outorgadas e as vazões com permanência de 90% do tempo. Os resultados destacaram uma situação de "Alto" estresse hidrológico na sub-bacia de Nazaré da Mata, com 94,76% da vazão outorgável utilizada, principalmente para fins industriais e abastecimento público. Na sub-bacia Caricé, o grau de estresse hidrológico foi considerado "Médio", com 31,77% da vazão outorgada em relação à disponibilidade. A maior parte das outorgas nessa sub-bacia foi destinada à Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) para abastecimento público, representando cerca de 43,57% do consumo outorgado. As demandas de irrigação também contribuíram para esse nível de estresse. Saliente-se que o grau de estresse hídrico "Médio" nesse trecho deve servir como um alerta para futuras outorgas. As demais sub-bacias apresentaram um resultado de estresse hidrológico considerado "Baixo" (entre 0% e 25%).

No desenvolvimento do estudo foram utilizados o banco de dados das outorgas superficiais disponibilizadas pela APAC além das séries históricas de vazões presentes nas estações fluviométricas operadas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). A atualização regular de tais informações é recomendada no sentido de aprimorar as outorgas para usos

insignificantes, evitando com isso, pressões adicionais sobre o consumo superficial de água nas sub-bacias com níveis "Alto" de estresse.

Durante o estudo foi possível observar que a importância em avaliar o grau de estresse hidrológico consiste em auxiliar a gestão dos recursos hídricos e a emissão de outorgas futuras, permitindo uma maior segurança para os ecossistemas fluviais e os usuários dos recursos hídricos. A abordagem possui fácil implementação e execução, além de fornecer informações discretizadas sobre o grau de estresse na bacia, servindo como guia para embasar decisões e planejamentos. Os resultados podem ser compartilhados com a população, contribuindo para o planejamento de novos empreendimentos nos diversos setores econômicos.

Com isso, os dados podem ainda serem utilizados pelos gestores de recursos hídricos para planejar ações de educação ambiental e direcionar recursos para as regiões mais afetadas, visando reduzir o grau de estresse. Podem de igual modo, estudar medidas para diminuir o estresse em sub-bacias comprometidas. Os órgãos de gestão estaduais podem vincular o sistema de outorga aos resultados do estresse em cada sub-bacia, possibilitando atualizações automáticas com a concessão de novas outorgas e a simulação do impacto da introdução de novas demandas sobre o rio.

3. APLICAÇÃO DE MODELO HIDROLÓGICO DE CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA PARA AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS HIDROLÓGICOS NA BACIA DO RIO GOIANA

O capítulo tem por finalidade estimar os parâmetros hidrológicos da bacia em estudo utilizando um modelo hidrológico de calibração automática. A avaliação do desempenho do modelo foi realizada por meio de medidas estatísticas de qualidade do ajuste e análises qualitativas dos hidrogramas simulados em relação às observações, considerando tanto as vazões máximas quanto as tendências.

3.1 Fundamentação teórica

A partir de agora serão abordados conceitos sobre os Modelos Hidrológicos e sua respectiva classificação. Também serão estudados os usos dos modelos hidrológicos e as formas de calibração.

3.1.1 Modelos hidrológicos

De acordo com Tucci (2001), o ciclo hidrológico envolve uma série de processos responsáveis pelo movimento da água entre a atmosfera e a superfície da Terra. Sua dinâmica pode ser descrita da seguinte maneira: a ocorrência de precipitação, que pode se manifestar como chuva, neve, orvalho, geada ou granizo, e atinge a superfície terrestre. Nesse momento, parte da água é interceptada pela vegetação ou por reservatórios superficiais, enquanto outra parte passa pelo processo de evaporação. Posteriormente, a água infiltrada no solo sofre infiltração, com sua taxa sendo gradualmente reduzida até atingir a saturação. Uma parcela da água segue o caminho do escoamento subterrâneo, enquanto outra segue o caminho do escoamento superficial. Além disso, as plantas desempenham o papel de transpiração, que, juntamente com a evaporação, contribui para a parcela conhecida como evapotranspiração.

A função dos modelos hidrológicos consiste em simplificar a representação dos fenômenos que ocorrem no ciclo hidrológico. Esses modelos são aplicados nas bacias hidrográficas, que são unidades de estudo definidas pela delimitação natural de uma área onde as águas que caem sobre ela convergem para um ponto comum chamado exutório. As bacias hidrográficas

são consideradas sistemas físicos, nos quais o volume de água precipitada é a entrada e o volume de água escoada é a saída (TUCCI, 2001).

Os modelos hidrológicos são amplamente utilizados para compreender os fenômenos que ocorrem no ciclo hidrológico, tanto no exutório quanto em sua totalidade. Eles desempenham diversas funções, como preencher lacunas nos dados hidrológicos, calcular e prever inundações e secas, realizar previsões em cenários específicos e investigar o impacto das alterações no uso do solo (LOU, 2010; BECK *et al.,* 2017). Além do fluxo superficial, modelos mais avançados podem também simular o transporte de sedimentos, nutrientes e poluentes, bem como prever mudanças climáticas e eventos de inundação (BAO *et al.,* 2012).

É importante destacar que todos os modelos hidrológicos apresentam simplificações devido ao custo computacional envolvido. Quanto mais dados de entrada são utilizados, maior é a demanda por cálculos e tempo de processamento, exigindo máquinas mais eficientes. Além disso, há uma grande variabilidade de dados dentro de uma mesma bacia e a ausência de informações necessárias para uma modelagem precisa dos processos reais. Essas simplificações introduzem incertezas nas estimativas realizadas (BECK *et al.,* 2017).

Os modelos hidrológicos requerem múltiplos dados de entrada, como dados pluviométricos, vazões, informações sobre o uso do solo, evapotranspiração e outros. No entanto, algumas bacias hidrográficas podem não possuir essas informações devido à falta de monitoramento ou deficiências nos dados disponíveis. Nessas situações, é importante realizar o processo de regionalização, que visa transferir dados de forma direta ou indireta para suprir essas lacunas.

Para tornar um modelo aplicável, é necessário proceder à calibração de seus parâmetros. Esse processo consiste em buscar os valores que ajustem os dados calculados aos dados medidos em campo, geralmente as vazões. A validação do modelo na região em estudo envolve a aplicação dos valores calibrados dos parâmetros para simular outros períodos da série histórica que não foram utilizados na calibração. Para realizar essas avaliações, são empregados indicadores estatísticos que indicam o grau de correlação entre as informações calculadas e observadas.

É importante destacar que os parâmetros ótimos encontrados durante a calibração do modelo não necessariamente refletem o comportamento ideal do

modelo em longo prazo. Mudanças nas características das bacias ao longo do tempo podem impactar as vazões resultantes. Quando os parâmetros possuem significado físico, seus valores podem estar associados às características específicas da bacia, permitindo assim a realização de um processo de regionalização para estimar seus valores em outras bacias hidrográficas. Tanto a calibração quanto a regionalização são processos de grande importância, pois possibilitam obter medidas mais precisas das vazões (WAGENER; MCINTYRE, 2005; BECK *et al.,* 2017).

3.1.2 Classificação dos modelos hidrológicos

A classificação dos modelos hidrológicos, de acordo com Tucci (2005), baseia-se em suas características gerais e pode ser dividida em quatro categorias: modelos concentrados e distribuídos; estocásticos e determinísticos; conceituais e empíricos; contínuos e discretos.

3.1.2.1 Modelos concentrados distribuídos

A classificação em modelos concentrados e distribuídos está relacionada à consideração das relações espaciais. Os modelos concentrados utilizam dados médios de entrada que representam toda a área da bacia hidrográfica. Por outro lado, os modelos distribuídos levam em conta a variabilidade espacial das informações hidrológicas dentro da bacia, dividindo-a em unidades de área menores onde os cálculos são realizados (SILANS *et al.,* 2000).

3.1.2.2 Modelos estocásticos e determinísticos

A classificação em modelos estocásticos e determinísticos está relacionada ao tipo de variáveis consideradas. Nos modelos estocásticos, os dados de entrada incorporam uma componente aleatória que busca capturar condições diferentes das registradas no período observado, permitindo uma variação nos dados de saída. Por outro lado, os modelos determinísticos são baseados nos dados observados anteriores (ALMEIDA; SERRA, 2017).

3.1.2.3 Modelos conceituais e empíricos

A classificação em modelos conceituais e empíricos está relacionada com as características das variáveis dos modelos. Nos modelos empíricos, as

equações que os governam não possuem uma correspondência explícita com o comportamento físico dos fenômenos hidrológicos na bacia hidrográfica. Por outro lado, os modelos conceituais utilizam equações clássicas presentes na literatura e consideram a maioria dos parâmetros que descrevem os fenômenos físicos ocorridos (LOU, 2010).

3.1.2.4 Modelos contínuos e discretos

A classificação em modelos contínuos e discretos está relacionada aos intervalos de simulação considerados. Os modelos discretos simulam eventos individuais, como ocorrências de cheias com passo de tempo diário ou intradiário, ou um ano hidrológico com dados diários, por exemplo. Por outro lado, os modelos contínuos buscam reproduzir o comportamento contínuo do sistema físico em cada passo de tempo, geralmente diário ou mensal. A escolha do tipo de modelo e do intervalo de tempo influencia o número de cálculos necessários e, consequentemente, o custo computacional envolvido (TUCCI, 2005).

3.1.3 Usos de modelos hidrológicos

Os modelos hidrológicos desempenham diversos papéis importantes em várias áreas de estudo e aplicação. Eles são utilizados para preencher lacunas em séries de vazões, avaliar o impacto das mudanças climáticas, simular a qualidade da água, estudar o transporte de sedimentos, dimensionar obras hidráulicas, realizar previsões de vazão em tempo real, integrar-se a modelos atmosféricos, modelar ecossistemas, dimensionar redes de abastecimento urbano e sistemas de esgoto, projetar reservatórios e barragens para geração de energia, irrigação, abastecimento de água e controle de cheias, além de auxiliar no gerenciamento dos recursos hídricos. Essa ampla gama de aplicações mostra a importância dos modelos hidrológicos em várias áreas relacionadas à água e ao seu uso sustentável (MARTINEZ, 2014).

Para ajustar um modelo hidrológico e torná-lo adequado aos diferentes processos mencionados, é necessário seguir uma série de etapas fundamentais, dentre as quais podem ser destacadas:

3.1.3.1 Coleta e preparação dos dados

É essencial reunir informações relevantes, como dados pluviométricos, vazões, características da bacia hidrográfica e do solo, entre outros. Os dados devem ser preparados e organizados adequadamente para serem utilizados no modelo (MARTINEZ, 2014).

3.1.3.2 Calibração dos parâmetros

Nessa etapa, busca-se ajustar os parâmetros do modelo para que ele reproduza com precisão as observações de campo, geralmente as vazões. Isso envolve realizar iterações e comparações entre os resultados do modelo e os dados observados, a fim de encontrar a combinação de parâmetros que melhor represente o comportamento hidrológico real (MARINEZ, 2014).

3.1.3.3 Validação do modelo

Uma vez calibrado, o modelo deve ser validado para verificar se ele é capaz de reproduzir com acurácia os eventos hidrológicos em períodos diferentes daqueles utilizados na calibração. Isso ajuda a verificar a robustez do modelo e a sua capacidade de prever o comportamento hidrológico em condições distintas (MARTINEZ, 2014).

3.1.3.4 Análise de sensibilidade

Nessa etapa, é realizada uma análise dos parâmetros do modelo para compreender a sensibilidade de cada um deles e identificar quais têm maior influência nos resultados. Isso auxilia na compreensão dos processos hidrológicos e na identificação de pontos críticos que requerem mais atenção e precisão nos dados (MARTINEZ, 2014).

3.1.4 Calibração de modelos hidrológicos

A calibração de modelos hidrológicos envolve a determinação dos parâmetros do modelo que proporcionam o melhor ajuste entre os dados observados e os dados calculados. A busca pelos valores ideais dos parâmetros pode ser realizada por meio da calibração manual ou automática, métodos que serão sucintamente explicados a seguir.

3.1.4.1 Calibração manual

A calibração manual implica na intervenção direta do usuário, que ajusta manualmente os valores dos parâmetros para se aproximarem dos valores observados da variável de saída. Esse processo é iterativo e continua até que o usuário considere que o ajuste obtido é adequado para o objetivo do modelo. No entanto, a calibração manual pode ser um procedimento moroso, repetitivo e tedioso, especialmente quando o modelo possui um grande número de parâmetros e o usuário tem pouca experiência (COLLISCHONN; TUCCI, 2003). Isso ocorre porque é difícil deduzir a lógica subjacente para ajustar os parâmetros e aprimorar a representação do sistema (SOROOSHIAN; GUPTA, 1995).

Uma das principais limitações da calibração manual é a falta de um critério mensurável e abrangente que considere todas as características visualmente analisadas. Isso torna difícil determinar quando encerrar o processo de calibração (SOROOSHIAN; GUPTA, 1995). Além disso, a calibração manual baseia-se em critérios subjetivos, o que implica que diferentes usuários podem obter conjuntos de parâmetros distintos para uma mesma bacia.

Entre as vantagens da calibração manual, destaca-se a possibilidade de o usuário desenvolver familiaridade com o programa e os parâmetros por meio da experiência, tornando o processo de calibração, às vezes, mais eficiente. Além disso, a calibração manual tende a ajustar os parâmetros de forma mais representativa da realidade física do processo simulado.

3.1.4.2 Calibração automática

Dado quão ineficiente pode chegar a ser o processo de calibração manual, em muitos casos se recorre a técnicas matemáticas de otimização que ajudam a reduzir o tempo utilizado na busca de um resultado ótimo, através do processo chamado de calibração automática.

Com o objetivo de tornar mais rápido e eficiente, no processo de calibração foi desenvolvido algoritmos de otimização que se baseiam na utilização intensiva de computadores para a calibração automática de modelos hidrológicos. Nesse sentido, desde a década de 1960, diferentes técnicas para a calibração automática de modelos hidrológicos têm sido desenvolvidas. Atualmente, um grande número de técnicas encontra-se disponíveis para esse fim.

Um procedimento comum para estimar os valores dos parâmetros de modelos chuva-vazão envolve os seguintes elementos principais: 1) definição da função objetivo; 2) escolha do algoritmo de otimização; 3) definição do critério de parada (MARTINEZ, 2014).

Na calibração automática, o objetivo é encontrar os valores dos parâmetros do modelo que otimizem (maximizem ou minimizem) a função objetivo, que representa a meta a ser alcançada no processo de calibração. Quando apenas uma função objetivo é otimizada, o processo é chamado de mono-objetivo. No entanto, quando duas ou mais funções objetivo são otimizadas, o processo é chamado de multi-objetivo.

A superfície que é formada pela função-objetivo no espaço dos parâmetros é conhecida como superfície de resposta, conforme descrito por Sorooshian e Gupta (1995). Um algoritmo de otimização é um procedimento lógico que é empregado para explorar essa superfície de resposta e obter os valores dos parâmetros que otimizam (maximizam ou minimizam) a função-objetivo, considerando a faixa de valores viáveis para cada parâmetro. No contexto da calibração de modelos hidrológicos, as técnicas numéricas iterativas de otimização são amplamente utilizadas, pois a função-objetivo resultante do uso desses modelos é geralmente implícita (TUCCI, 1998).

A calibração automática tem uma relação direta com o modelo hidrodinâmico PCSWMM em múltiplas estações fluviométricas. O PCSWMM é um software amplamente utilizado para simulação hidrodinâmica de sistemas de drenagem urbana, que permite a análise do comportamento hidrológico e hidrodinâmico em diferentes pontos ao longo de uma bacia hidrográfica.

No contexto da calibração automática, o PCSWMM pode ser utilizado para simular o escoamento e as características hidrodinâmicas em várias estações fluviométricas distribuídas pela bacia hidrográfica. O processo de calibração automática visa ajustar os parâmetros do modelo hidrodinâmico de forma a otimizar o ajuste entre os valores observados nas estações fluviométricas e os valores simulados pelo modelo.

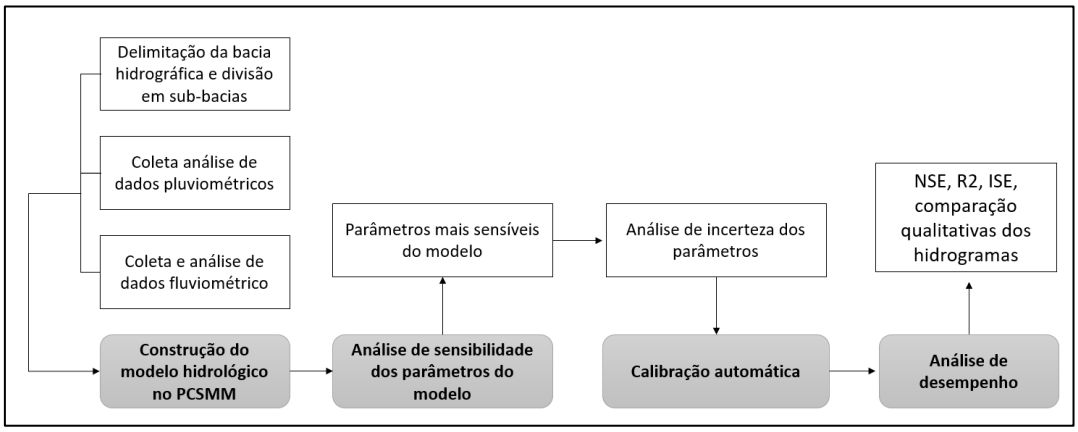
Ao utilizar a calibração automática em conjunto com o modelo PCSWMM e múltiplas estações fluviométricas, é possível obter uma melhor representação do comportamento hidrodinâmico da bacia hidrográfica e melhorar a precisão das previsões e análises relacionadas ao sistema de drenagem urbana. Isso contribui para a tomada de decisões mais eficientes em termos de gestão e

planejamento urbano, visando a mitigação de problemas relacionados a inundações e impactos ambientais associados ao escoamento de águas pluviais.

3.2 Materiais e métodos

A estratégia metodológica para alcançar os objetivos do estudo, envolve as seguintes etapas: (1) Construção do modelo hidrológico no PCSWMM; (2) Análise de sensibilidade e incerteza dos parâmetros do modelo; (3) Calibração automática por meio das múltiplas estações fluviométricas e sub-bacias; (4) Análise de desempenho, quantitativa e qualitativa, do modelo. A Figura 25 apresenta o fluxograma das etapas da pesquisa.

Figura 25 - Fluxograma das etapas do estudo



Fonte: Adaptado de Ferreira *et al*. (2022).

3.2.1 Pluviometria e fluviometria da região

Nesta etapa do trabalho, a bacia do rio Goiana foi dividida em 10 sub-bacias. Para 9 dessas sub-bacias, foram utilizados os seguintes critérios de divisão: sub-bacias com exutório nos postos fluviométricos (pontos de controle) e sub-bacias com exutório nos reservatórios da bacia. A última sub-bacia corresponde ao Rio Goiana, que está localizada na foz e não possui estação fluviométrica.

No total, a bacia possui cinco estações fluviométricas, todas operadas pela ANA, e quatro reservatórios, conforme apresentado nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 -Postos fluviométricos e correspondente sub-bacia, da bacia do rio Goiana

Posto Fluviométrico	Latitude	Longitude	Área drenada(km²)	Rio
Engenho Volta	-7,5219	-35,2883	250,17	Capibaribe-Mirim
Caricé	-7,5432	-35,0689	450,16	Capibaribe-Mirim
Engenho Retiro	-7,5578	-35,1175	359,24	Siriji
Itapissirica	-7,3161	-35,0647	542,70	Tracunhaém
Nazaré da Mata	-7,7542	-35,2331	570,52	Tracunhaém

Fonte: Adaptado de Ferreira *et al*. (2022).

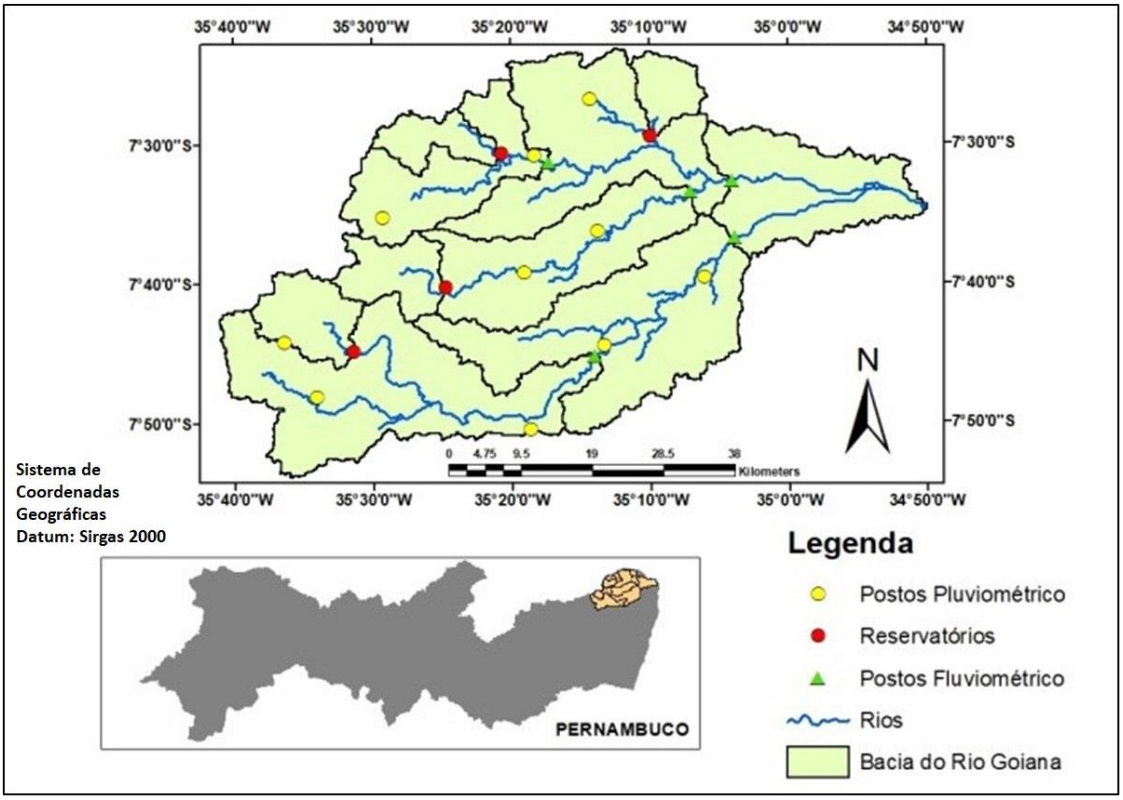
Tabela 6 - Reservatórios da bacia do rio Goiana

Reservatórios	Latitude	Longitude	Área drenada (km²)	Rio
Guararema	-7,4917	-35,1664	69,54	Capibaribe-Mirim
Tiúma	-7,5139	-35,3383	79,34	Capibaribe-Mirim
Siriji	-7,6389	-35,2839	113,68	Siriji
Palmeirinha/ Pedra Fina	-7,7483	-35,5242	121,59	Tracunhaém

Fonte: Adaptado de Ferreira *et al*. (2022).

Para fins deste estudo, as sub-bacias receberam o nome das estações fluviométricas ou reservatório no seu exutório (Figura 26).

Figura 26 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Goiana, com estações pluviométricas e fluviométricas e reservatórios



Fonte: Adaptado de Ferreira et al. (2022).

Para a calibração, foram utilizados dados diários de vazão coletados no período de 01 a 30 de junho de 2013. Já para a validação, foram utilizados dados diários de vazão coletados no período de 01 a 30 de setembro do ano seguinte, 2014. Esses períodos foram selecionados devido à consistência dos dados, a ausência de falhas e à ocorrência de chuvas intensas na região.

Os dados de precipitação diária foram obtidos de 10 postos pluviométricos (conforme apresentado na Tabela 7), todos operados pela APAC (2021). Desses postos, 2 estão localizados dentro dos limites das sub-bacias Engenho Volta, Engenho Retiro e Itapissirica, 3 estão localizados na sub-bacia Nazaré e 1 está localizado na sub-bacia Caricé.

Tabela 7 - Postos pluviométricos da bacia do rio Goiana

Postos Pluviométricos	Latitude	Longitude	Código
Nazaré da Mata	-7,7408	-35,2228	97
Vicência	-7,6536	-35,3183	134
Aliança	-7,6042	-35,2306	66
Ferreiros	-7,4461	-35,2386	457
Lagoa do Carro	-7,8422	-35,3114	204
Bom Jardim	-7,8017	-35,5678	139
Orobó	-7,7372	-35,6069	463
Itaquitinga	7,6597	-35,1014	101
São Vicente Ferrer	-7,5875	-35,4889	271

Fonte: Apac (2021).

O modelo PCSWMM associa a cada sub-bacia apenas uma série de dados de precipitação. Portanto, foi utilizado o método de interpolação ponderado pelo inverso da distância ao quadrado, para a obtenção das chuvas em cada sub-bacia. Esse método considera que a chuva em um local (centróide das sub-bacias), pode ser calculada como uma média ponderada das chuvas em pluviômetros da região. A ponderação é feita de forma que os postos pluviométricos mais próximos têm um peso maior no cálculo da média, conforme a Equação 6 (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015).

$$Pm_i = \frac{\sum_{j=1}^{NP} \frac{P_j}{d_{ij}^2}}{\sum_{j=1}^{NP} \frac{1}{d_{ij}^2}} \quad (6)$$

Onde:

NP = Número de postos fluviométricos

P j = Chuva observada no posto$j$ (mm)

d_{ij} = Distância entre o centróide da sub-bacia i e o posto pluviométrico j.

3.2.2 Modelo hidrodinâmico PCSWMM

O modelo utilizado neste estudo é o PCSWMM (*Personal Computer Storm Water Management Model*), baseado no SWMM (versão 5) da USEPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos), e é integrado a um sistema de informações geográficas (SIG). O PCSWMM é amplamente utilizado em diversos estudos e tem demonstrado ser eficaz na análise de soluções e respostas hidrológicas (AHIABLAME; SHAKYA, 2016; AKHTER; HEWA, 2016; LEE; NIETCH; PANGULURI, 2017; BIBI; KARA; BEDADA, 2023).

Nesse modelo, cada sub-bacia é representada como uma superfície retangular que possui uma inclinação uniforme (S) e uma largura de escoamento (W), que direcionam o fluxo para um único ponto no canal de saída. O escoamento superficial é gerado ao modelar a sub-bacia como um reservatório não-linear (ROSSMAN, 2015).

Os principais dados de entrada do modelo são: a área das sub-bacias (em hectares), a declividade média (em porcentagem), a largura superficial de escoamento (em metros), o percentual de área impermeável (%), a rugosidade de *Manning* para as áreas impermeáveis e permeáveis, e a profundidade de armazenamento nas depressões das áreas impermeáveis e permeáveis (em milímetros). Além disso, foi escolhido o modelo de infiltração *Curve Number* (CN) utilizado para estimar a quantidade de água que infiltra no solo, levando em conta as características do solo, vegetação e cobertura do terreno (ROSSMAN, 2015).

O modelo SWMM é tradicionalmente utilizado em modelagens de bacias em áreas urbanas de pequenas e médias dimensões, principalmente como ferramenta de gestão e detecção de pontos de alagamento. A inclusão de novos recursos, como um ambiente GIS e ferramentas de análise de sensibilidade e calibração automática, na versão PCSWMM, incentivou seu uso em outros tipos de sistemas hídricos. Neste capítulo, o desempenho do modelo será testado em uma bacia predominantemente rural e de grandes dimensões.

Munir, Ahmad e Hafeez (2020) comprovaram a eficácia do modelo PCSWMM em bacias rurais de grandes dimensões ao utilizarem as ferramentas de calibração automática do modelo, obtendo valores de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e coeficiente de determinação entre 0,75 e 0,97, e 0,94 e 0,98, respectivamente. Da mesma forma, Ghofrani, Sposito e Faggian (2019) também

utilizaram o modelo PCSWMM em uma bacia predominantemente rural e obtiveram resultados positivos.

3.2.3 Análise de sensibilidade e calibração

O PCSWMM utiliza a ferramenta chamada SRTC (Sensitivity-based Radio Tuning Calibration - Calibração de Sintonia de Rádio Baseada em Sensibilidade) para realizar a calibração dos modelos hidrológicos em relação aos dados observados ou para testar atributos e parâmetros de sensibilidade. Essa ferramenta requer estimativas de incertezas para os atributos e parâmetros a serem calibrados. No SWMM (versão 5), o modelo é executado utilizando os valores limites da faixa de sensibilidade especificada pelo usuário.

O PCSWMM oferece a opção ao usuário de considerar valores intermediários dentro do limite especificado para cada parâmetro nos gráficos de sensibilidade. Isso possibilita verificar se há linearidade ou não na sensibilidade de um parâmetro em relação à sua resposta (CHI WATER, 2021).

Sendo assim, a primeira etapa na calibração do modelo consistiu em selecionar os parâmetros mais sensíveis e estimar uma faixa de incerteza para eles. Essa incerteza representa os limites nos quais o usuário se sente confortável com o ajuste do parâmetro e é expressa como um desvio percentual em relação ao seu valor atual (melhor estimativa).

Os valores inferior e superior dos parâmetros para uma determinada incerteza são calculados pelo PCSWMM de acordo com as Equações 7 e 8 (CHI WATER, 2021).

Valores dos parâmetros inferiores:

$$P_{inf} = P_{atual} \times \left(\frac{1}{1+\frac{U}{100}} \right) \quad (7)$$

Valores dos parâmetros superiores:

$$\mathrm{P_{sup}} = \mathrm{P_{atual}} \times \left(1 + \frac{\mathrm{U}}{100} \right) \quad (8)$$

Onde:

P_{inf}= Valor do parâmetro para o limite inferior da faixa de incerteza;

P_{sup} = Valor do parâmetro para o limite superior da faixa de incerteza;

P_{atual} = Valor atual do parâmetro estimado; e

$U\ (\%)$ = Incerteza considerada

A estratégia adotada para a calibração do modelo foi a de realizar análises conjuntas das sub-bacias, considerando os respectivos rios aos quais elas estão associadas. Por exemplo, as sub-bacias Engenho Volta, Caricé, Guararema e Tiúma drenam suas águas para o rio Capibaribe-Mirim. Portanto, a calibração dos parâmetros dessas sub-bacias foi realizada em conjunto, levando em consideração os dois pontos de controle existentes nesse rio. O mesmo procedimento foi adotado para os outros rios, como o rio Siriji com as sub-bacias Engenho Retiro e Siriji, e o rio Tracunhaém com as sub-bacias Nazaré, Palmeirinha e Itapissirica.

É importante que os métodos de calibração não permitam que os parâmetros ultrapassem limites máximos e mínimos fisicamente significativos. Portanto, é necessário determinar cuidadosamente os limites de cada parâmetro de calibração, a fim de aumentar a precisão e eficiência do processo (JAMES, 2005). As primeiras estimativas dos parâmetros do modelo devem ser as mais próximas possíveis dos valores calibrados. Dessa forma, é fundamental identificar uma faixa realista e fisicamente significativa para os parâmetros do modelo.

Da análise realizada no estudo deve-se considerar principalmente que, no que se refere aos limites dos parâmetros de calibração é indispensável sua observação para assegurar a precisão e eficiência do processo de calibração do modelo hidrológico. Tal feito permitirá que os resultados obtidos sejam considerados mais confiáveis, refletindo de forma mais precisa o comportamento hidrológico da bacia em estudo. Assim, os parâmetros analisados nesse estudo foram:

- **Largura superficial de escoamento (W)** – Para estimar sistematicamente a largura da sub-bacia, a área medida da sub-bacia é dividida pelo comprimento do caminho de fluxo mais longo. Foi atribuída para esse parâmetro uma faixa de incerteza de $\pm$60%, dada as possibilidades de erro tanto na medição área como no comprimento do maior curso d'água.

- **Percentual de área impermeável (%)** – Em relação as áreas impermeáveis da bacia, foram atribuídas um valor inicial de 10% para todas as sub-bacias com uma faixa de incerteza de $\pm$100%. Todas as bacias são predominantemente rurais, com as áreas urbanas pequenas em termos percentuais, não mais do que 20% das áreas das sub-bacias.

- **Coeficiente de rugosidade de *Manning* das áreas impermeáveis e permeáveis (n_i e n_p)**– Os valores iniciais deste parâmetro foram estabelecidos de acordo com Bedane e Clausen (2009) e ASCE (1992). Devido à alta variabilidade do coeficiente de rugosidade de Manning para diferentes tipos de cobertura do solo, o limite e a faixa deste parâmetro são muito difíceis de estimar. Portanto, adotou-se um limite de $\pm$ 100% em relação ao valor inicial estabelecido inicialmente, 0,030 para as áreas permeáveis e 0,015 para as áreas impermeáveis (ROSSMAN, 2015).

- **Profundidade de armazenamento nas depressões das áreas impermeáveis e permeáveis (D_i e D_p)**- É definida como a parcela da água que é armazenada em depressões e esgotada apenas por evaporação. O seu valor varia de acordo com o tipo de solo e declividade da bacia. O manual do usuário do PCSWMM, recomenda para as áreas impermeáveis um limite de 0,13 mm a 1,50 mm e para as áreas permeáveis 1,5 mm a 6,5 mm (ROSSMAN, 2015). Também foi atribuído uma faixa de incerteza de $\pm$100% e o valor inicial a mediana dos valores apresentados acima.

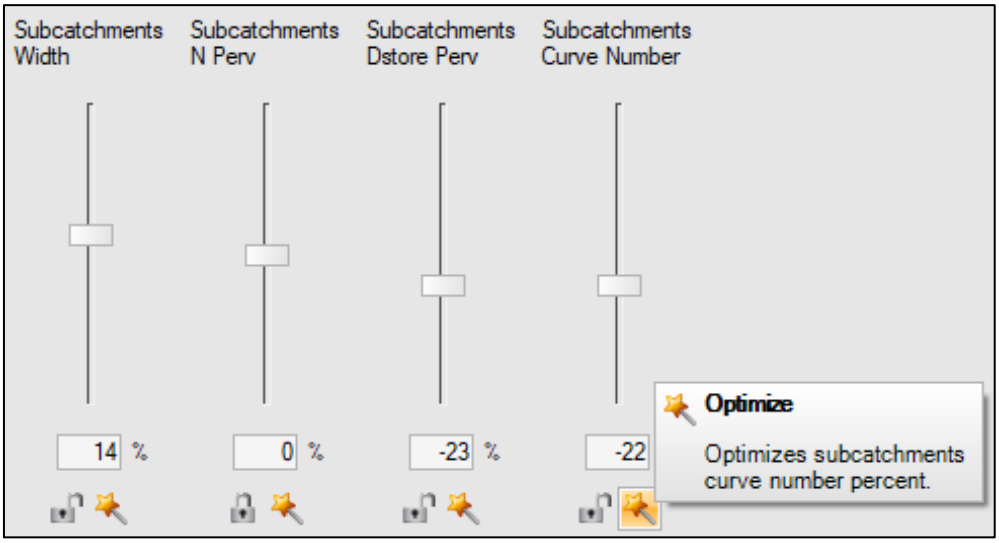
- *Curve Number* (CN)– O valor inicial do CN foi atribuído com base em dados oficiais da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2021) em seu portal “Metadados”. A faixa de incerteza utilizada foi de $\pm$100%. Para esse parâmetro os limites fisicamente aceitáveis são de 0 a 100, onde o próprio modelo restringe o seu valor nesta faixa.

Os arquivos de série temporal observados podem ser abertos na ferramenta SRTC (após a execução da sensibilidade) ou no painel Gráfico (antes de iniciar a ferramenta SRTC). Nesse caso, é possível selecionar períodos ou faixas de valores para executar a calibração, o que reduz o tempo computacional necessário (CHI WATER, 2017).

Na janela de calibração do SRTC, são apresentados os controles deslizantes de sintonia de rádio (Figura 27) para cada parâmetro. Esses

controles permitem visualizar automaticamente o efeito calculado do ajuste de cada parâmetro.

Figura 27 - Recurso de controle deslizante de sintonia a rádio, software PCSWMM



Fonte: *Chi Water*, (2021).

O botão "*Optimize*" realiza a calibração automática de cada parâmetro, que é otimizado com base nas medidas de ajuste de erro ISE *(integral ofthesquareoftheerror*) ou NSE (*Nash–Sutcliffeefficiency*).

3.2.4 Análise estatística do erro

A ferramenta de calibração SRTC, calcula várias estatísticas de erro entre séries temporais com as mesmas unidades em tempo real. As estatísticas incluem, a classificação do erro quadrado integral, o valor do integral *ofthesquareoftheerror*(ISE), *Nash–Sutcliffeefficiency* (NSE), coeficiente de determinação (R^2), erro padrão de estimativa (SEE), mínimos quadrados simples (LSE), mínimos quadrados simples adimensionais (LSE dim), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e raiz do erro quadrático médio sem dimensão (dim RMSE).

3.3 Resultados e discussão

Nesse ponto serão discutidos e analisados os ajustes quantitativos do *(integral ofthesquareoftheerror* (ISE), a *Nash–Sutcliffeefficiency* (NSE) e o coeficiente de determinação (R^2), além dos ajustes qualitativos dos hidrogramas observados e calculados pelo modelo.

Erro Quadrado Integral (ISE)

O erro quadrado integral é uma medida de adequação entre as respostas observadas e modeladas. O ISE integra o quadrado do erro ao longo do tempo. Uma característica deste índice é que ele proporciona grandes ponderações para erros grandes e pequenas ponderações para erros pequenos. O critério ISE é definido matematicamente conforme as Equações 9 ou 10.

$$\text{ISE}=\int_0^T e^2(t)dt \tag{9}$$

$$ISE = \frac{\left[\sum_{i=1}^{N}\left(Q_o(i)-Q_c(i)\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}}{\sum_{i=1}^{N} Q_o(i)} \tag{10}$$

Onde:

$e(t)$= Erro residual;
$Q_o(i)$= Valor observado para a i-ésima observação;
$Q_c(i)$ = Valor computado para a observação i; e
N= Número de valores observados ou calculados.

As mesmas notações serão utilizadas nas equações apresentadas adiante. Importante, salientar que quanto menor o valor do ISE, melhor é a correspondência do modelo com os valores observados. O valor do ISE é avaliado conforme a classificação a seguir (SARMA; DELLEUR; RAO, 1973):

- ISE<3,0 “excelente”;
- $3{,}0 < ISE < 6{,}0$ “muito bom”;
- $6{,}0 < ISE < 10{,}0$ “bom”;
- $10{,}0 < ISE < 25{,}0$ “razoável”;
- $\mathrm{ISE} > 25{,}0$ “ruim”.

Eficiência Nash-Sutcliffe (NSE)

A eficiência Nash-Sutcliffe (NSE) (Equação 11) é uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância residual (“ruído”) em comparação com a variância dos dados medidos (“sinal”) (NASH; SUTCLIFFE, 1970). A equação é a seguinte:

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_o(i) - Q_c(i))^2}{\sum(Q_o(i) - \overline{Q_o})^2} \quad (11)$$

Onde:

$\overline{Q_o}$ é a média dos dados observados.

Os valores de eficiência de *Nash-Sutcliffe* podem variar de $-\infty$ a 1. Essencialmente, quanto mais próximo de 1, mais preciso é o modelo. *Moriasi et al* (2015) propuseram a seguinte classificação para o NSE.

- $0.75 < NSE \leq 1$, “muito bom”;
- $0.65 < NSE \leq 0.75$, “bom”;
- $0.50 < NSE \leq 0.65$, “satisfatório”.
- $\mathrm{NSE} \leq 0.50$, “não satisfatório”.

Coeficiente de determinação (R^2)

O coeficiente de determinação R² (Equação 12) é uma medida resumida que informa o quão bem a linha de regressão da amostra se ajusta aos dados (GUJARATI; PORTER, 2009). Pode ser interpretado como a proporção da variância na variável dependente que é previsível a partir da variável

independente. Um R^2 igual a 1 indica que a linha de regressão se ajusta perfeitamente aos dados.

$$R^2 = \left(\frac{\sum(Q_o(i)-\overline{Q_o})(Q_c(i)-\overline{Q_c})}{\sqrt{\sum(Q_o(i)-\overline{Q_o})^2\sum(Q_c(i)-\overline{Q_c})^2}}\right)^2 \quad (12)$$

Onde:

$\overline{Q_c}$ é a média dos valores calculados.

Baseando-se em estudos hidrológicos em modelos chuva-vazão, Moriasi *et al.* (2015), também propuseram uma classificação para o R^2, sendo ela:

- $\mathrm{R}^2 > 0.85$, "muito bom";
- $0.70 \leq \mathrm{R}^2 \leq 0.85$, "bom";
- $0.50 < R^2 < 0.70$, "satisfatório".
- $\mathrm{R}^2 \leq 0.50$, "não satisfatório".

Os parâmetros do modelo PCSWMM foram analisados quanto a sua sensibilidade em relação ao pico de vazão nas sub-bacias. A profundidade de armazenamento nas depressões das áreas impermeáveis e permeáveis ($\mathrm{D_i}$ e $\mathrm{D_p}$), e a rugosidade de Manning das áreas impermeáveis ($\mathrm{n_i}$) não apresentaram nenhuma sensibilidade ao modelo. A insensibilidade a estes parâmetros é induzida principalmente pela baixa proporção de áreas impermeáveis e devido aos limites de valores predefinidos para estes, que são relativamente estreitos. Resultados similares de insensibilidade desses parâmetros no modelo SWMM foram encontrados por Krebs *et al.* (2013).

Em seu estudo Krebs *et al.* (2013) utilizaram um modelo SWMM de alta resolução para analisar uma pequena bacia hidrográfica altamente urbanizada no sul da Finlândia. O estudo envolveu a configuração, calibração, validação e análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo. Os resultados mostraram que, devido à alta resolução espacial e às sub-bacias homogêneas com limites de parâmetros estreitos, o modelo SWMM se mostrou insensível à fração de cobertura impermeável. Além disso, a otimização do modelo para o fluxo de

conduíte resultou em boas estatísticas de desempenho durante a calibração e validação do modelo.

De forma resumida, o estudo de Krebs *et al.* (2013) demonstrou que o modelo SWMM de alta resolução foi eficaz na análise da bacia hidrográfica estudada, apresentando resultados satisfatórios na calibração e validação do modelo.

Em relação ao CN (*Curve Number*) e a rugosidade de *Manning* das áreas permeáveis (n_p) nas sub-bacias, foram os parâmetros com maior sensibilidade, seguidos da largura superficial de escoamento (W) das sub-bacias, todos analisados dentro da faixa de incerteza especificada. Formiga *et al.* (2016), realizaram análise de sensibilidade de parâmetros do modelo SWMM seguida de calibração automática por meio de um algoritmo de otimização R-NSGA acoplado ao modelo, os parâmetros mais sensíveis foram, também, a largura superficial de escoamento (W) e a rugosidade de *Manning* das áreas impermeáveis (n_i). Os resultados corroboram com o estudo realizado por Formiga *et al.,* (2016).

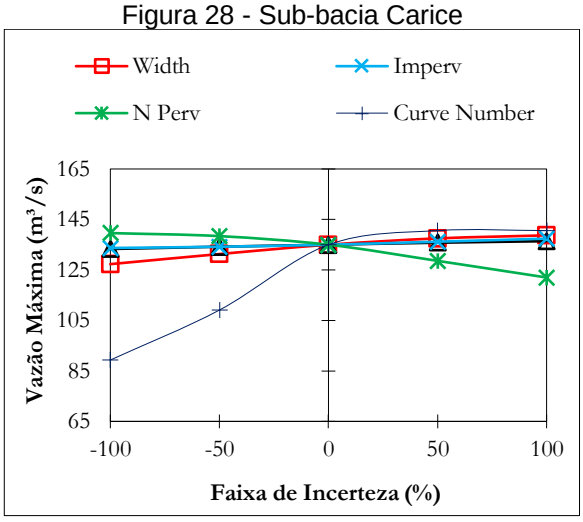
O estudo de Formiga *et al*. (2016) teve como objetivo calibrar o modelo hidrológico *Storm Water Management Model* (SWMM) para a Bacia Hidrográfica do Arroio Cancela, localizada em Santa Maria, Rio Grande do Sul. Foi utilizado o algoritmo evolucionário multiobjetivo R-NSGA para realizar a calibração. O modelo SWMM foi modificado para permitir seu acoplamento com o algoritmo R-NSGA no ambiente MATLAB. Foram utilizadas no estudo, as funções objetivo Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (COE), Erro da Vazão de Pico (EQP) e Erro do Volume Escoado (EVOL) simultaneamente na calibração do modelo. Sendo proposto um método para determinar a maior compatibilidade entre as soluções, a fim de selecionar as melhores soluções.

Os resultados mostraram que os parâmetros calibrados do SWMM foram próximos aos valores físicos da bacia, exceto os valores relacionados à equação de Horton. As soluções de maior compatibilidade apresentaram um melhor desempenho nos eventos de validação, destacando a importância da otimização multiobjetivo. O modelo SWMM mostrou ser adequado para ser aplicado em eventos de grande intensidade em bacias pequenas sem informações de vazão, devido à sua boa representatividade física do problema. O algoritmo de otimização demonstrou uma capacidade satisfatória de convergência, atingindo valores próximos aos ótimos teóricos para cada função objetivo separadamente.

O CN pode alterar a vazão máxima em até 65%, considerada grande. Após o ajuste, o valor mínimo foi encontrado na sub-bacia Itapissirica, localizada na região sul da bacia do rio Goiana, com o valor de 17,14. Isso corrobora com resultados encontrados por Junior, Rodrigues e Oliveira (2019) para o CN após o processo de calibração. Em relação ao CN, o valor mais alto foi de 54,51, na sub-bacia Guararema, localizada na região norte da bacia, próxima à divisa com o Estado da Paraíba. Esse valor está em consonância com os resultados obtidos pelo PHA Goiana (APAC, 2022), que indicou uma classificação hidrológica dos solos da bacia, a maioria pertencente ao grupo B, com infiltração acima da média após intenso umedecimento prévio.

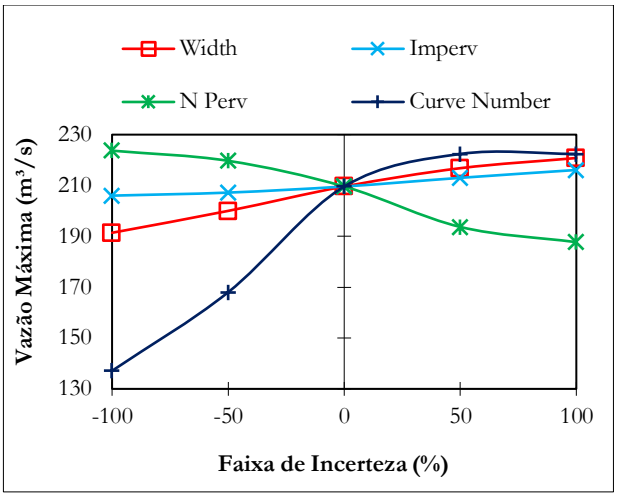
Analisado o CN conjuntamente com as sub-bacias de cada rio, observou-se uma proximidade nos seus valores. As sub-bacias Caricé, Engenho Volta, Guararema e Tiúma que drenam suas águas para o rio Cabiparibe-Mirim, localizado na região mais ao norte da bacia, apresentou um valor médio do CN de 47,44. As sub-bacias Engenho Retiro e Siriji, as quais contribuem para o rio Siriji, região central da bacia, apresentou um CN médio de 23,10. E na região mais ao sul da bacia, onde fica o rio Tracunhaém, o qual possui as sub-bacias Itapissirica, Nazaré e Palmeirinha, obtive-se um CN médio no valor 17,62. Os valores de todos os parâmetros, inicial e calibrado, são apresentados nos gráficos de sensibilidade em relação ao pico de vazão nas Figuras de 28 a 32 que realizam a Análise de Sensibilidade das Sub-bacias:

Figura 28 - Sub-bacia Carice



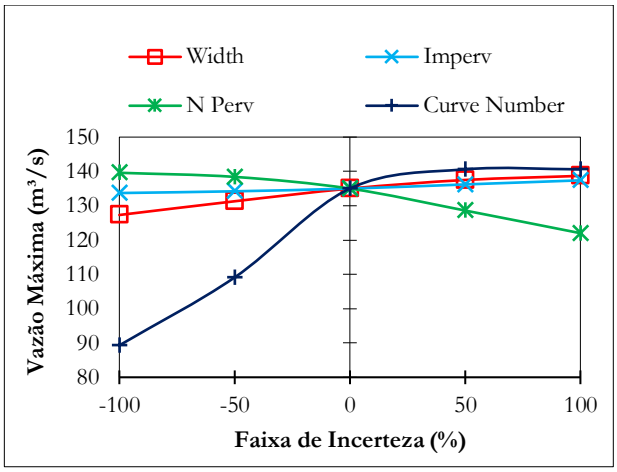
Fonte: O autor (2023).

Figura 29 - Sub-bacia Engenho Retiro



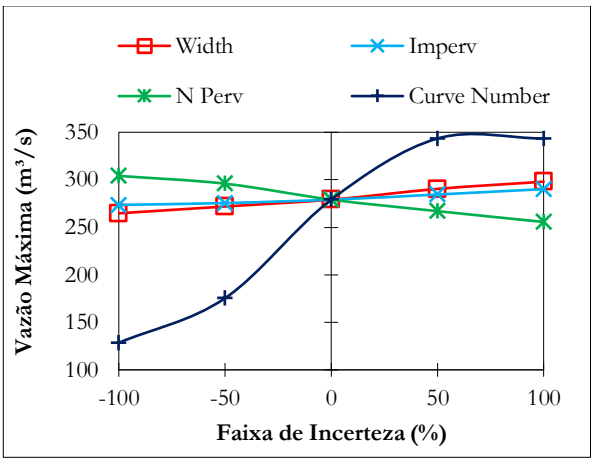
Fonte: O autor (2023).

Figura 30 - Sub-bacia Engenho Volta



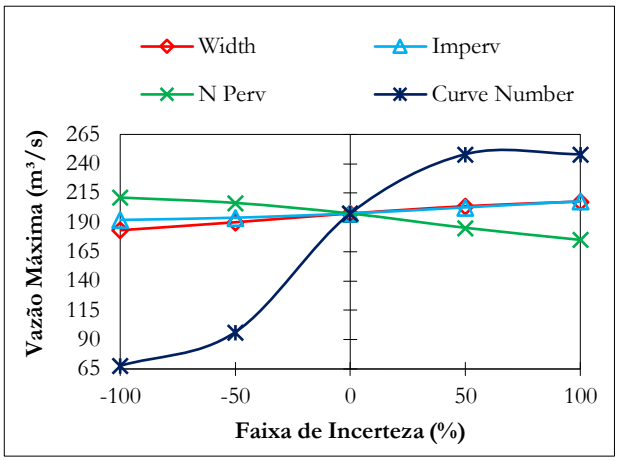
Fonte: O autor (2023).

Figura 31 - Sub-bacia Engenho Itapissirica



Fonte: O autor (2023).

Figura 32 - Sub-bacia Nazaré



Fonte: O autor (2023).

Em relação às medidas de ajuste qualitativo, as sub-bacias Engenho Retiro, Caricé e Nazaré, todas com pontos de controle, apresentaram os melhores valores em relação a eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NSE), com os respectivos valores de 0,919;0,899 e 0,884, esses valores possuem desempenho classificado como “muito bom” para *Moriasi et al.* (2015). As mesmas sub-bacias, em relação ao coeficiente de determinação R^2, também apresentaram resultados considerados como “muito bom”, com os seguintes valores: 0,919 para Engenho Retiro, 0,918 para Caricé e 0,89 para Nazaré.

No processo de validação, as sub-bacias Engenho Retiro e Caricé obtiveram um NSE de 0,649 e 0,711, respectivamente. Esses resultados são considerados “satisfatório” e “bom”, respectivamente. A sub-bacia Nazaré apresentou um NSE de -5,03, o que indica um resultado "não satisfatório". Em um estudo realizado por Gao *et al.* (2008), que utilizaram uma estratégia semelhante de calibração localizada por sub-bacias e uma análise global com um algoritmo de otimização para calibração automática, foram analisadas 57 sub-bacias. Apenas uma delas obteve um resultado considerado insatisfatório em termos de Eficiência de Nash, com um valor negativo para o mesmo.

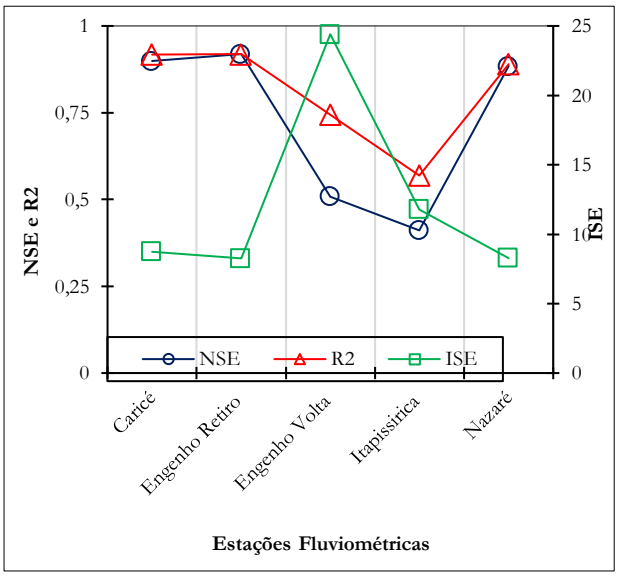
Nas análises de validação, o R^2 manteve um desempenho satisfatório nas sub-bacias Engenho Retiro e Caricé, e um resultado não satisfatório para Nazaré, apresentando um R^2 de 0,490. Os resultados obtidos nas sub-bacias Engenho Retiro e Caricé, em relação aos índices de NSE e R^2, são consistentes com o estudo realizado por Wang *et al.* (2020). Nesse estudo, os autores desenvolveram um modelo de calibração automática utilizando um algoritmo genético (GA) aplicado a bacias de grandes dimensões. Isso sugere que os

valores alcançados nessas sub-bacias são comparáveis e estão de acordo com os resultados obtidos em estudos anteriores que utilizaram abordagens semelhantes. Essa consistência fortalece a confiabilidade dos resultados e indica a eficácia do método de calibração automática empregado pelos autores.

As demais sub-bacias, Engenho Volta e Itapissirica, apresentaram resultados, quanto ao NSE, “satisfatório” e “não satisfatório”, respectivamente. Em relação a validação, a sub-bacia Itapissirica obteve um NSE de 0,812, ou seja, melhor do que o resultado calibrado. Já a sub-bacia Engenho Volta obteve um resultado “ruim” com o valor do NSE menor que zero. O coeficiente de determinação para as mesmas bacias, apresentaram-se todos acima do limite considerado satisfatório, tanto na calibração quanto na validação.

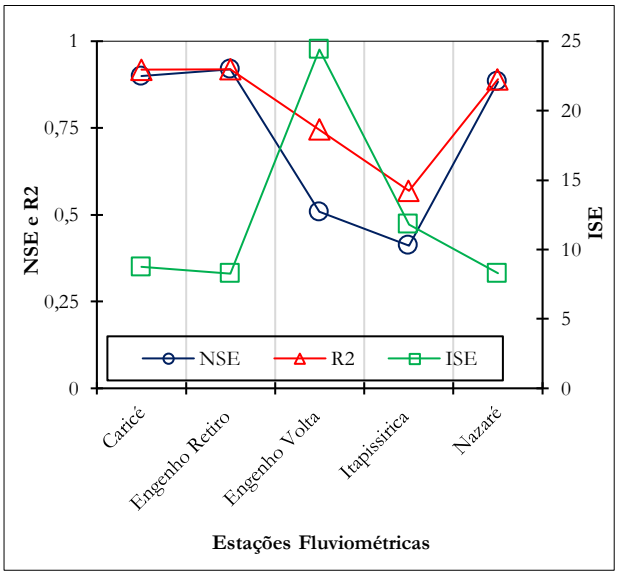
O comportamento do modelo, quando analisado pelo Erro Quadrado Integral (ISE) foi considerado bom para as sub-bacias Engenho Retiro, Caricé e Nazaré, as mesmas que obtiveram bons resultados quanto ao NSE e o R^2, no processo de calibração. Ainda na calibração, a sub-bacia Itapissirica apresentou um resultado “razoável” e apenas a sub-bacia Engenho Volta obteve um resultado “ruim” para este índice. Todos resultados do NSE e R^2 estão apresentados graficamente nas Figura 33 e 34 e na Tabela 08.

Figuras 33 - Resultados NSE, R2 e ISE (Calibração)



Fonte: O autor (2023).

Figuras 34 - Resultados NSE, R2 e ISE (Validação)



Fonte: O autor (2023)

Tabela 8 - Resultados estatísticos ISE, NSE e R^2

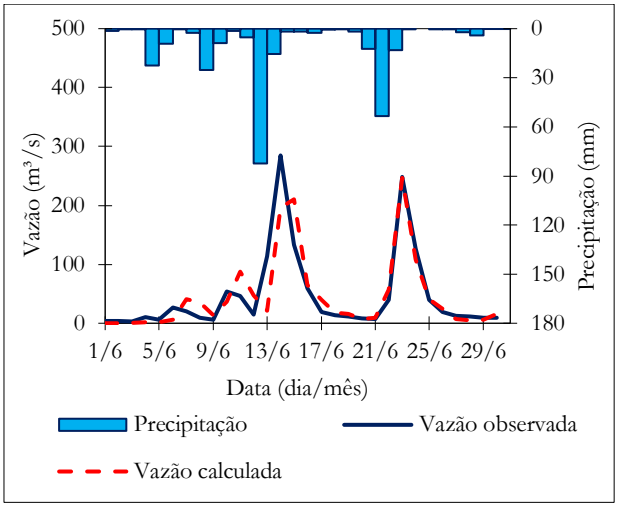
	SUB-BACIA CARICÉ		SUB-BACIA ENGENHO RETIRO		SUB-BACIA ENGENHO VOLTA		SUB-BACIA ITAPISSIRICA		SUB-BACIA NAZARÉ	
	Calibração	**Validação**	**Calibração**	**Validação**	**Calibração**	**Validação**	**Calibração**	**Validação**	**Calibração**	**Validação**
Classificação do Erro Quadrado Integral	Bom	Razoável	Bom	Razoável	Razoável	Ruim	Razoável	Bom	Bom	Ruim
Erro Quadrado Integral (ISE)	8.74	13.2	8.26	15	24.4	50.8	11.8	9.96	8.29	39.5
Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE)	0.899	0.711	0.919	0.649	0.508	-2.51	0.411	0.812	0.884	-5.03
Coeficiente de determinação (R^2)	0.918	0.82	0.919	0.849	0.745	0.887	0.569	0.836	0.89	0.49

Fonte: O autor (2023).

Para a validação, o Erro Quadrado Integral (ISE), ocorreu um resultado “bom” apenas em uma sub-bacia, Itapissirica, nas demais os resultados foram considerados de razoável a ruim. Essa medida também foi analisada por Jaiswal *et al.* (2014), os quais, avaliando o desempenho da calibração automática e validação de 41 sub-bacias, obtiveram o resultados em um nível considerado “excelente” para esse índice em todas as sub-bacias.

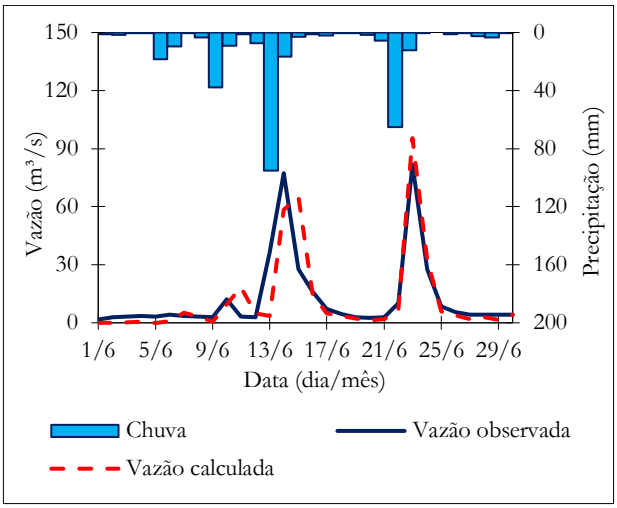
A correspondência entre os hidrogramas observados e calculados pelo modelo PSWMM pode ser visto nas Figuras de 35 a 39, e nas validações das Figuras 40 a 44. É possível notar que os fluxos calibrados, em geral, se ajustam melhor às observações (o modelo se ajusta melhor tanto nos pontos de máximo como de mínimo). O desempenho do modelo para a série de vazões validadas é, em termos gerais, considerado satisfatório, desempenho semelhante foi constatado por Gao *et al.*(2008).

Figura 35 - Hidrograma observado e calibrado (Sub-bacia Carice)



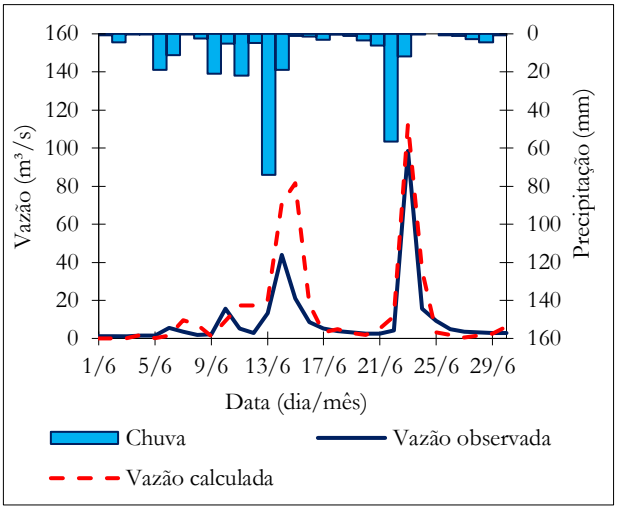
Fonte: O autor (2023).

Figura 36 - Hidrograma observado e calibrado (sub-bacia Engenho Retiro)



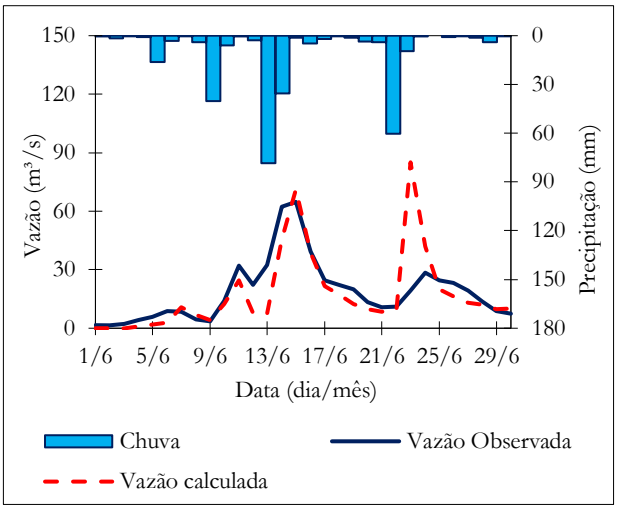
Fonte: O autor (2023).

Figura 37 - Hidrograma observado e calibrado (sub-bacia Engenho Volta)



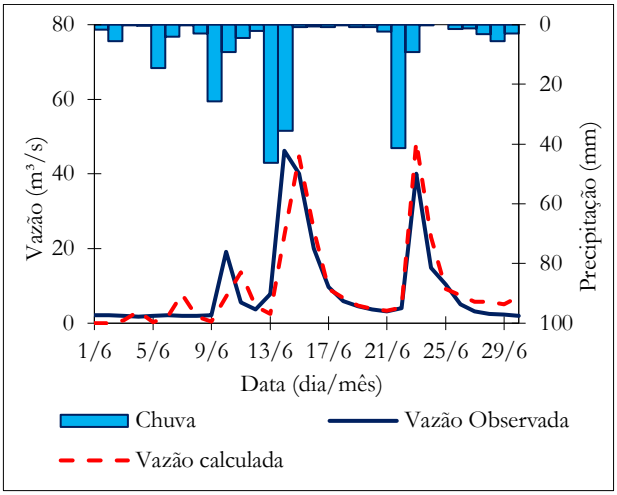
Fonte: O autor (2023).

Figura 38 - Hidrograma observado e calibrado (sub-bacia Engenho Itapissirica)



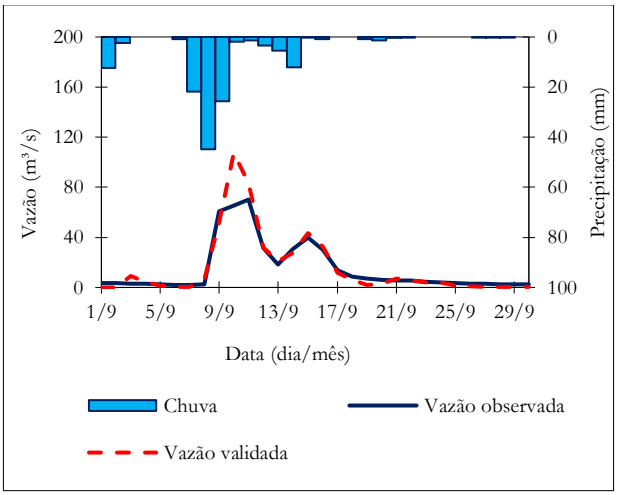
Fonte: O autor (2023).

Figura 39 - Hidrograma observado e calibrado (sub-bacia Nazaré)



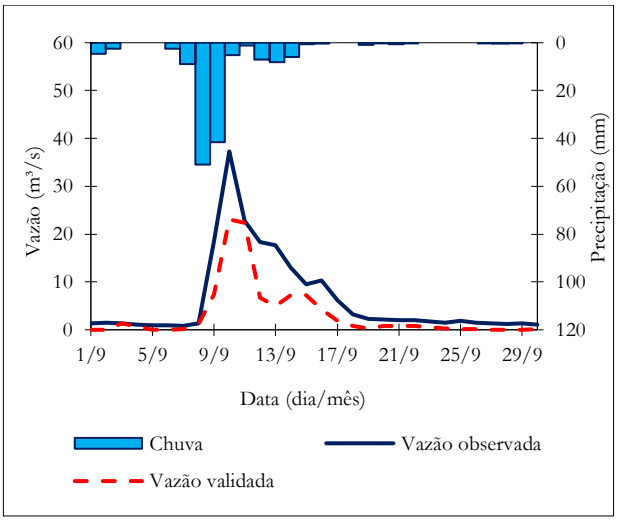
Fonte: O autor (2023).

Figura 40 - Hidrograma observado e validado (sub-bacia Caricé)



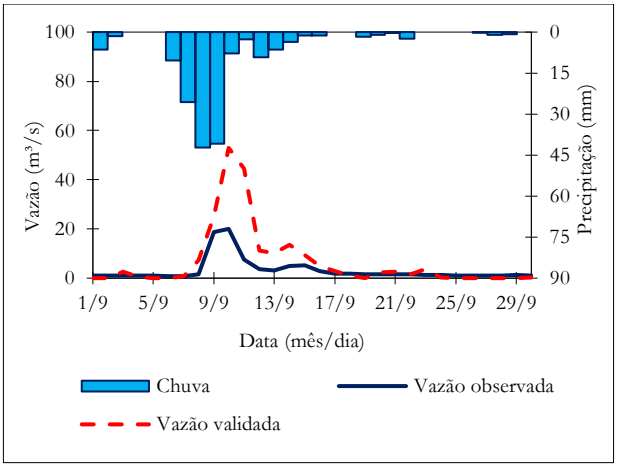
Fonte: O autor (2023).

Figura 41 - Hidrograma observado e validado (sub-bacia Engenho Retiro)



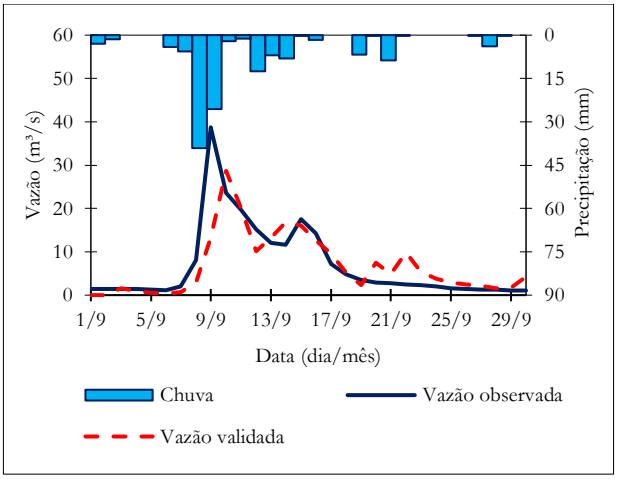
Fonte: O autor (2023).

Figura 42 - Hidrograma observado e validado (sub-bacia Engenho Volta)



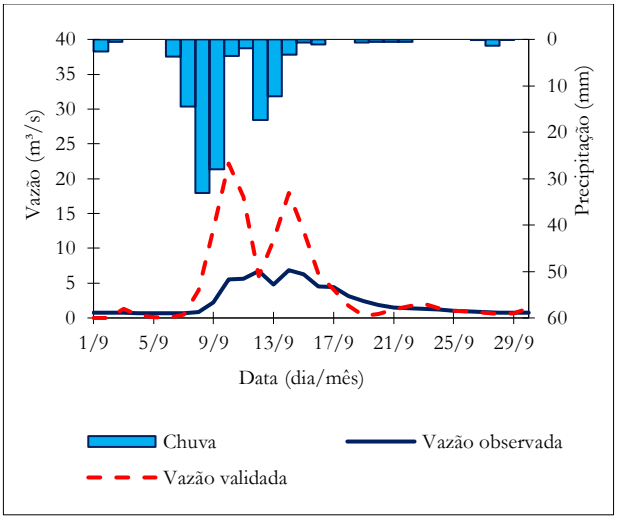
Fonte: O autor (2023).

Figura 43 - Hidrograma observado e validado (sub-bacia Itapissirica)



Fonte: O autor (2023).

Figura 44 - Hidrograma observado e validado (sub-bacia Nazaré)



Fonte: O autor (2023).

A melhor correspondência entre os picos de vazão é observada na sub-bacia Nazaré com uma variação de apenas 5,11%, após o processo de calibração. Quanto ao volume de total de escoamento, a sub-bacia Caricé apresentou uma variação de 1,83% em relação ao mesmo dado observado. Em todas as sub-bacias, após a calibração, a variação entre os picos de vazão observados e calculado, não ultrapassaram 25,00%. O volume total de escoamento, em 4 das 5 sub-bacias controladas, a variação não passou dos 6,00%. Os demais resultados quanto a estes critérios são apresentados na Tabela 09 e 10.

Os resultados, após as calibrações, quanto às variações das vazões máximas e volume total de escoamento, em 90,00% dos casos ficaram dentro dos limites recomendados por James (2005). Porém, o autor também argumenta que as tolerâncias de calibração precisam considerar as imprecisões inerentes aos dados observados e aos objetivos propostos na modelagem hidrológica.

Tabela 09 - Resultado das vazões de calibração

	CARICE		ENGENHO RETIRO		ENGENHO VOLTA		ENGENHO ITAPISSIRICA		NAZARÉ	
	observado	**calibrado**	**observado**	**calibrado**	**observado**	**calibrado**	**observado**	**calibrado**	**observado**	**calibrado**
Vazão Máxima (m^3/s)	284,8	246,8	81,77	95,43	98,53	112,7	64,79	85,07	46,21	48,7
Vazão Mínima (m^3/s)	3,011	0,1452	1,695	0,02871	1,121	0,09377	1,493	0,07024	1,75	0,2285
Vazão Média (m^3/s)	47,22	51,48	12,92	13,49	10,08	17,26	19,16	19,44	9,365	10,53
Volume Total de Escoamento (m^3)	118300000	120500000	32360000	31570000	25260000	40400000	48010000	45500000	23470000	24640000

Fonte: O autor (2023).

Tabela 10 - Resultado das vazões validação

	CARICE		ENGENHO RETIRO		ENGENHO VOLTA		ENGENHO ITAPISSIRICA		NAZARÉ	
	observado	**validado**	**observado**	**validado**	**Observado**	**validado**	**observado**	**validado**	**observado**	**validado**
Vazão Máxima (m^3/s)	70,16	107,4	37,28	23,07	20,03	52,93	38,72	28,67	6,859	22,17
Vazão Mínima (m^3/s)	1,988	0,2866	0,818	0,004431	0,804	0,002234	1,069	0,3483	0,679	0,03046
Vazão Média (m^3/s)	15,19	18	6,408	3,586	3,208	7,598	7,12	7,656	2,444	5,002
Volume Total de Escoamento (m^3)	38050000	42120000	16060000	8390000	8037000	17780000	17840000	17910000	6125000	11700000

Fonte: O autor (2023).

3.4 Conclusões da calibração automática

A ferramenta de calibração automática disponível no modelo PCSWMM amplia o leque de recursos para a tomada de decisão e o planejamento das ações dos gestores de recursos hídricos. A aplicação da calibração automática proporcionou resultados precisos para a bacia modelada, eliminando a necessidade de utilizar métodos tradicionais baseados em tentativa e erro. Isso garante aos gestores uma maior assertividade e economia de tempo, especialmente em situações de emergência, como grandes enchentes durante períodos chuvosos, onde decisões corretas devem ser tomadas rapidamente e os recursos emergenciais devem ser alocados de forma adequada. Os recursos de análise de sensibilidade do modelo PCSWMM permitem uma avaliação precisa dos parâmetros hidrológicos mais sensíveis da bacia hidrográfica, considerando várias respostas do modelo, como vazão máxima, mínima, média e volume total de escoamento. Isso contribui para uma compreensão mais aprofundada dos processos hidrológicos e auxilia na tomada de decisões informadas.

No que diz respeito aos resultados estatísticos (ISE, R^2 e NSE) e à avaliação qualitativa entre os hidrogramas observados e simulados, a maioria das sub-bacias apresentou resultados bastante satisfatórios. No entanto, duas sub-bacias, Engenho Volta e Nazaré, demonstraram uma discrepância entre os resultados da calibração e da validação. Enquanto os resultados da calibração foram classificados como "satisfatórios" e "bons" (NSE = 0,508 em Engenho Volta e NSE = 0,884 em Nazaré), os resultados da validação foram considerados "ruins" (NSE = -2,51 em Engenho Volta e NSE = -5,03 em Nazaré). A ferramenta de calibração automática disponível no modelo PCSWMM mostrou-se altamente eficaz em comparação com a abordagem de calibração por tentativa e erro, que geralmente é demorada. Além disso, permite uma avaliação imediata das alterações nos hidrogramas ao modificar os parâmetros dentro da faixa especificada pelo usuário, por meio do recurso SRTC (Sensitivity-based Radio Tuning Calibration).

A utilização dessa ferramenta no processo de gestão de recursos hídricos proporciona agilidade na tomada de decisões, especialmente em situações de emergência, como eventos de cheias excepcionais, gestão de riscos em reservatórios e possíveis rupturas de barragens. Além disso, a obtenção de

dados de descarga em múltiplas sub-bacias reduz a necessidade de construir vários modelos para determinar essas variáveis, o que contribui para uma abordagem mais eficiente e econômica no monitoramento e na gestão dos recursos hídricos.

4. ABORDAGEM INTEGRADA DA SEGURANÇA HÍDRICA NA BACIA DO RIO GOIANA POR MEIO DO ESTRESSE HIDROLÓGICO E DA CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA

Após a determinação da localização geográfica do reservatório em relação à sub-bacia do rio Goiana e a obtenção dos resultados da avaliação do estresse hidrológico, procedeu-se à hierarquização da implantação dos barramentos conforme indicado pelo estudo de Torres (2007).

A hierarquização da implantação das estruturas, baseada nos resultados da classificação do estresse hidrológico, proporciona ao gestor hídrico a capacidade de direcionar recursos financeiros e planejar projetos e obras de infraestrutura com o objetivo de reduzir o déficit hídrico. Esse direcionamento é crucial para atender prioritariamente as áreas mais necessitadas e mitigar os conflitos relacionados ao uso da água na bacia hidrográfica.

O estudo de Torres (2007) realizou uma estimativa da média anual da vazão regularizada para cada reservatório, considerando a capacidade de fornecimento necessária para garantir um percentual de confiança de 100%. A Tabela 11 apresenta as estruturas de reservatórios e suas respectivas vazões médias regularizadas.

Essa análise é crucial para compreender a disponibilidade de água em cada reservatório e determinar sua capacidade de atender às demandas de forma confiável. Através dessas estimativas, é possível planejar e gerenciar de forma mais eficiente o uso dos recursos hídricos, garantindo um suprimento adequado em diferentes períodos e reduzindo o risco de escassez.

Tabela 11 - Vazão média regularizada das barragens (Continua)

Barragem	Vazão média regularizada com 100% de confiança (m³/s)	Barragem	Vazão média regularizada com 100% de confiança (m³/s)	Barragem	Vazão média regularizada com 100% de confiança (m³/s)	Barragem	Vazão média regularizada com 100% de confiança (m³/s)
Itaquitinga 1	0,0256	Aliança 7	0,0396	Timbaúba 2	0,0191	Nazaré da Mata 8	0,007
Itaquitinga 2	0,0256	Aliança 8	0,0228	Timbaúba 4	0,0381	Nazaré da Mata 9	0,0218
Itaquitinga 3	0,0188	Aliança 9	0,0166	Timbaúba 5	0,0579	Tracunhaém 1	0,0106

Tabela 11 - Vazão média regularizada das barragens (Conclusão)

Barragem	Vazão média regularizada com 100% de confiança (m³/s)	Barragem	Vazão média regularizada com 100% de confiança (m³/s)	Barragem	Vazão média regularizada com 100% de confiança (m³/s)	Barragem	Vazão média regularizada com 100% de confiança (m³/s)
Itaquitinga 4	0,015	Aliança 10	0,056	Timbaúba 6	0,0219	Tracunhaém 2	0,0601
Itaquitinga 7	0,0769	Carpina 1	0,0231	Timbaúba 7	0,0351	Tracunhaém 3	0,0226
Itaquitinga 9	0,0409	Carpina 2	0,0274	Timbaúba 8	0,0358	Tracunhaém 4	0,007
Itaquitinga 10	0,0236	Carpina 3	0,0313	Vicência 1	0,0313	Tracunhaém 5	0,0313
Itaquitinga 11	0,0299	Carpina 4	0,0051	Vicência 2	0,0173	Tejucupapo 1	0,0893
Itaquitinga 12	0,0519	Carpina 5	0,0276	Vicência 3	0,0365	Ferreiros 1	0,0202
Itaquitinga 13	0,0541	Carpina 6	0,0248	Vicência 4	0,0721	Ferreiros 2	0,0373
Goiana 1	0,019	Carpina 7	0,0212	Vicência 5	0,0871	Ferreiros 3	0,0176
Goiana 2	0,0299	Macaparana 1	0,0151	Vicência 6	0,0195	Nazaré da Mata 3	0,0043
Goiana 3	0,1183	Macaparana 2	0,0403	Vicência 7	0,0479	Nazaré da Mata 4	0,0088
Goiana 4	0,1283	Macaparana 3	0,0227	Vicência 8	0,1208	Nazaré da Mata 5	0,0153
Goiana 5	0,0184	Macaparana 4	0,0374	Vicência 9	0,0133	Nazaré da Mata 6	0,0584
Goiana 6	0,0195	Macaparana 5	0,0122	Nazaré da Mata 1	0,026	Nazaré da Mata 7	0,0066
Aliança 1	0,0231	Murupê 2	0,0358	Nazaré da Mata 2	0,0448	Timbaúba 1	0,0275
Aliança 2	0,0219	Murupê 3	0,0261	Aliança 4	0,0261	Murupê 5	0,0178
Aliança 3	0,047	Murupê 4	0,0147	Aliança 5	0,0816	Murupê 8	0,0334
Aliança 6	0,0194						

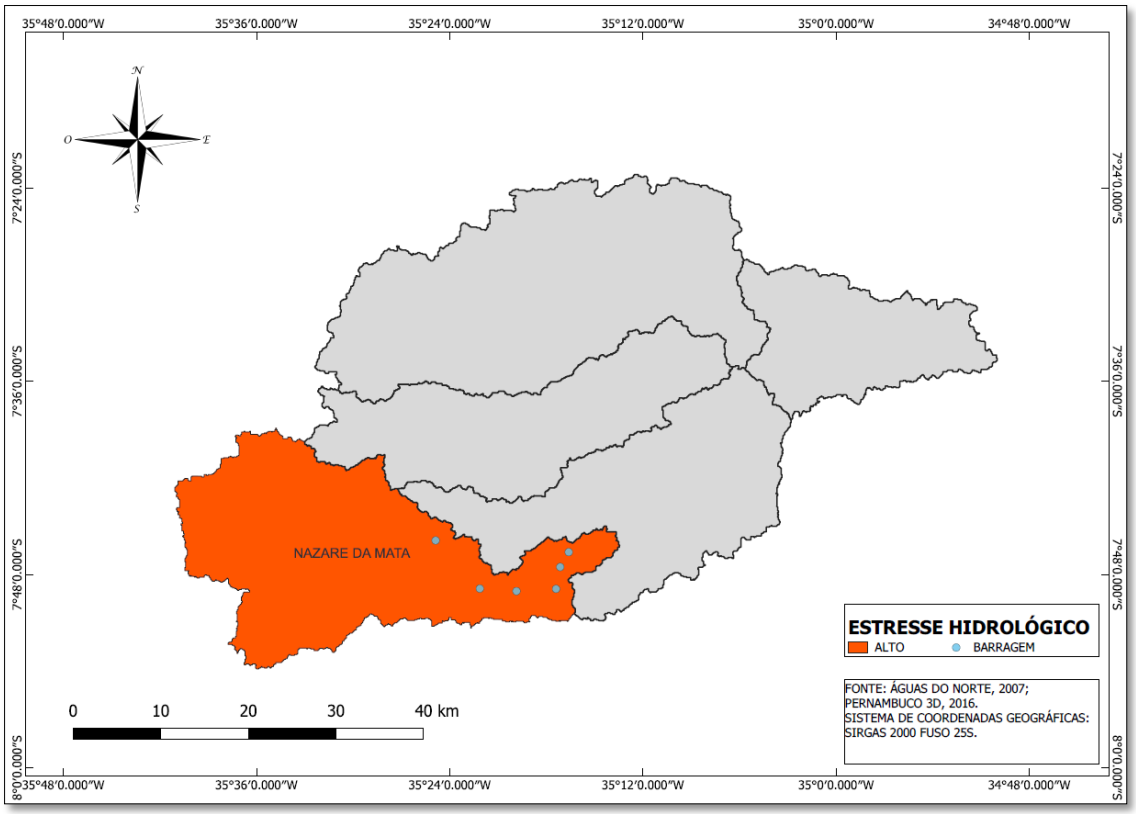
Fonte: Elaborado pelo Autor a partir de Torres (2007).

Os barramentos nas sub-bacias avaliadas pelo estresse hidrológico (Caricé, Engenho Retiro, Nazaré da Mata e Itapissirica) foram organizados utilizando um sistema de informação geográfica (SIG). A prioridade de implantação das estruturas foi determinada com base na classificação do estresse hidrológico, sendo consideradas as categorias "Alto", "Médio" e "Baixo". Para a ordenação dentro de cada sub-bacia, levou-se em conta a prioridade das barragens com os maiores valores de média da vazão regularizada para uma confiança de 100%.

As Figuras 45 a 47 ilustram os barramentos separados de acordo com a classificação do estresse hidrológico. Essas representações gráficas permitem uma visualização clara e organizada das estruturas, facilitando a compreensão das prioridades de implantação e destacando as áreas com maior necessidade de intervenção.

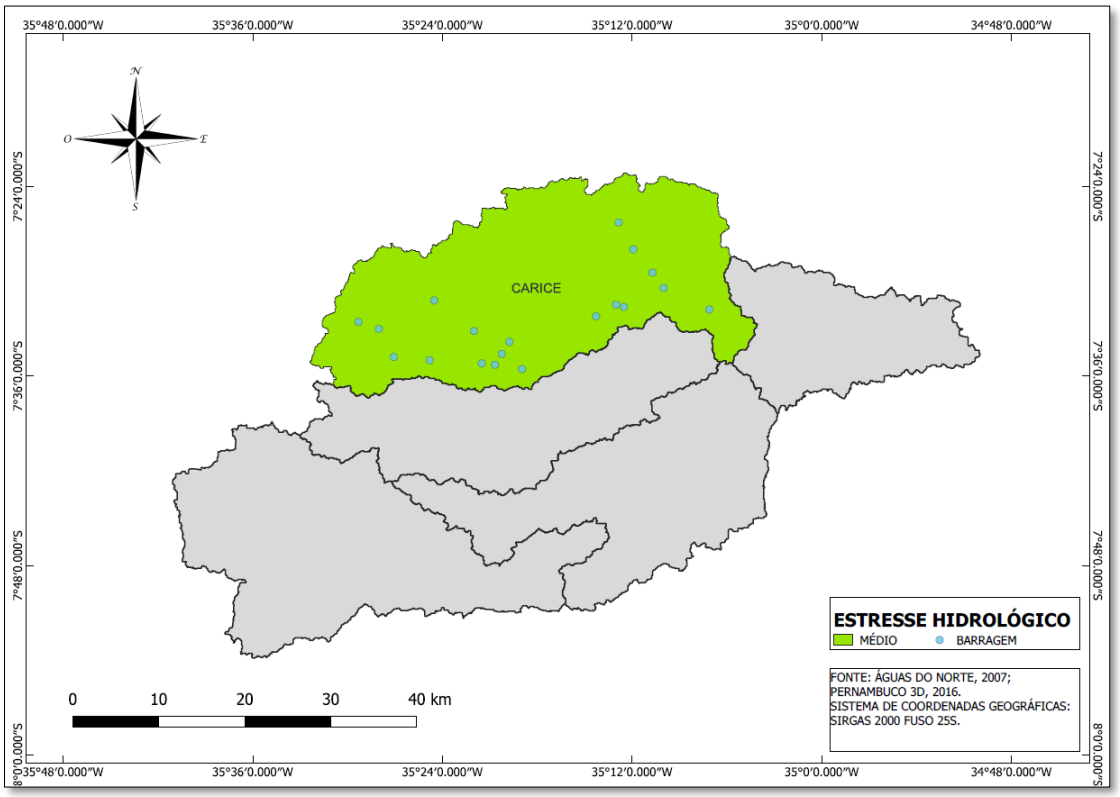
A utilização do sistema de informação geográfica e da classificação do estresse hidrológico é uma abordagem eficaz para orientar o planejamento e a tomada de decisões relacionadas à implantação de barramentos nas sub-bacias avaliadas. Essa metodologia permite uma alocação estratégica dos recursos e uma melhor gestão dos recursos hídricos, visando garantir um suprimento adequado de água e minimizar os impactos negativos causados pela escassez hídrica em regiões vulneráveis.

Figura 45 - Distribuição espacial dos barramentos nas áreas com estresse hidrológico “Alto”



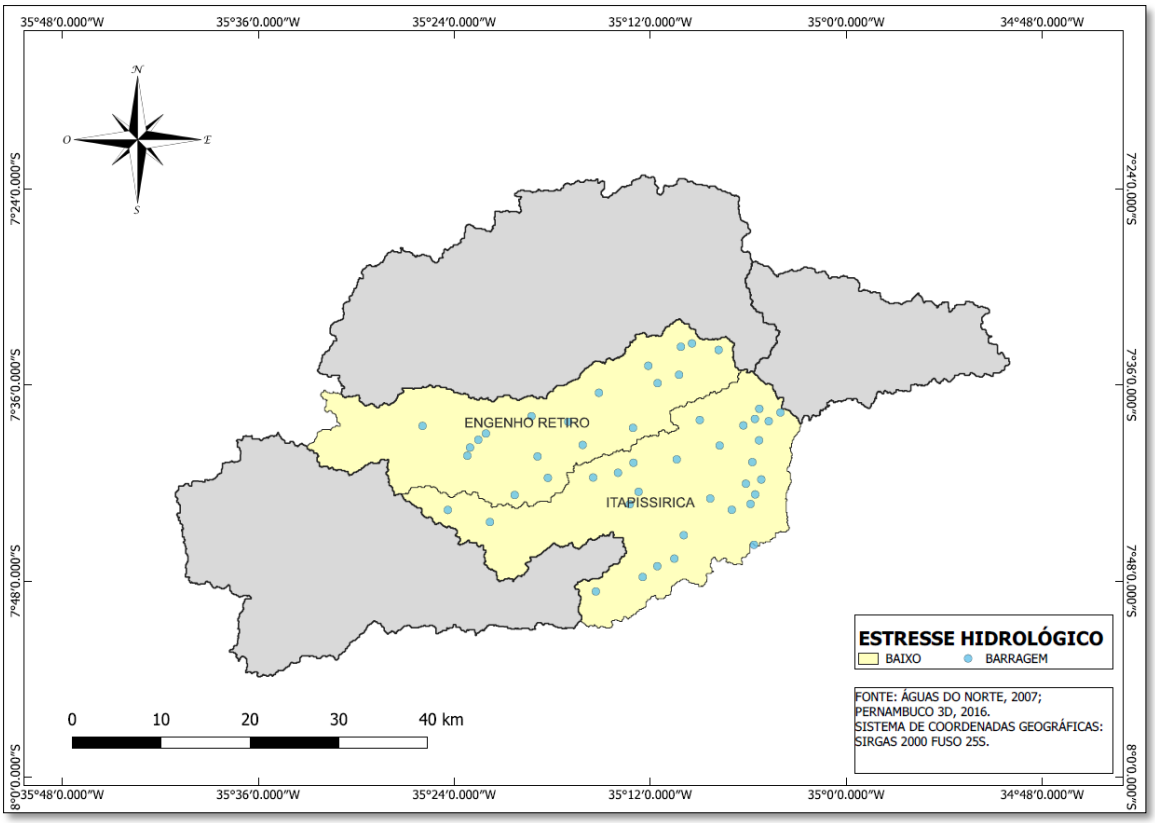
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Torres (2007).

Figura 46 - Distribuição espacial dos barramentos nas áreas com estresse hidrológico “Médio”



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Torres (2007).

Figura 47 - Distribuição espacial dos barramentos nas áreas com estresse hidrológico “Baixo”



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Torres (2007).

Na Tabela 12, é apresentada a hierarquização da implantação das barragens na bacia do rio Goiana, com base no estresse hidrológico. A tabela inclui informações como as coordenadas UTM (sistema de coordenadas Universal *Transverse Mercator*) na projeção SIRGAS 2000 e fuso 24S, a vazão média regularizada para o cenário de 100% de confiança, a classificação do estresse hidrológico e a sub-bacia correspondente.

Esses dados fornecem uma visão detalhada da priorização das barragens, considerando sua localização geográfica, capacidade de vazão regularizada e a classificação do estresse hidrológico. A hierarquização permite direcionar os esforços de implantação de barragens para as áreas mais críticas em termos de disponibilidade de água, garantindo uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos na bacia do rio Goiana.

As coordenadas UTM na projeção SIRGAS 2000 e fuso 24S são importantes para localizar com precisão cada barragem dentro da bacia, facilitando a identificação e o planejamento das estruturas. A vazão média regularizada para o cenário de 100% de confiança representa a estimativa da vazão necessária para atender às demandas de forma confiável.

A classificação do estresse hidrológico é um indicativo da vulnerabilidade das sub-bacias em relação à disponibilidade de água. Através dessa classificação, é possível identificar as áreas que requerem maior atenção e ação prioritária no que diz respeito à implantação de barragens. Tais dados são essenciais para embasar decisões estratégicas relacionadas à gestão de recursos hídricos na bacia do rio Goiana, permitindo uma alocação eficiente de recursos e um planejamento mais adequado para garantir a segurança hídrica na região.

Tabela 12 - Vazão média regularizada das barragens (Continua)

Ordem de implantação das estruturas	Barragem	Latitude (m)	Longitude (m)	Vazão média regularizada com 100% de confiança (m^3/s)	Estresse	Sub-bacia
1	CARPINA 3	9137978	247922	0,0313	ALTO	NAZARE DA MATA
2	CARPINA 5	9135188	242942	0,0276	ALTO	NAZARE DA MATA
3	CARPINA 2	9139686	248891	0,0274	ALTO	NAZARE DA MATA
4	CARPINA 6	9135460	247461	0,0248	ALTO	NAZARE DA MATA
5	CARPINA 1	9140938	233676	0,0231	ALTO	NAZARE DA MATA
6	CARPINA 4	9135453	238753	0,0051	ALTO	NAZARE DA MATA
7	TIMBAÚBA 5	9161791	242077	0,0579	MÉDIO	CARICE
8	ALIANÇA 3	9166236	253040	0,047	MÉDIO	CARICE
9	MACAPARANA 2	9164627	227753	0,0403	MÉDIO	CARICE
10	TIMBAÚBA 4	9160660	239755	0,0381	MÉDIO	CARICE
11	MACAPARANA 4	9161357	229515	0,0374	MÉDIO	CARICE
12	FERREIROS 2	9174081	257325	0,0373	MÉDIO	CARICE
13	TIMBAÚBA 7	9160031	244460	0,0351	MÉDIO	CARICE

Tabela 12 - Vazão média regularizada das barragens (Continua)

14	TIMBAÚBA 1	9164461	238816	0,0275	MÉDIO	CARICE
15	ALIANÇA 4	9167355	256262	0,0261	MÉDIO	CARICE
16	ALIANÇA 1	9167611	255347	0,0231	MÉDIO	CARICE
17	MACAPARANA 3	9167988	234165	0,0227	MÉDIO	CARICE
18	ALIANÇA 2	9169592	260883	0,0219	MÉDIO	CARICE
19	TIMBAÚBA 6	9160521	241311	0,0219	MÉDIO	CARICE
20	FERREIROS 1	9177224	255617	0,0202	MÉDIO	CARICE
21	TIMBAÚBA 2	9163197	242972	0,0191	MÉDIO	CARICE
22	GOIANA 1	9167101	266222	0,019	MÉDIO	CARICE
23	FERREIROS 3	9171374	259572	0,0176	MÉDIO	CARICE
24	MACAPARANA 1	9165430	225364	0,0151	MÉDIO	CARICE
25	MACAPARANA 5	9161009	233676	0,0122	MÉDIO	CARICE
26	GOIANA 4	9156668	269562	0,1283	BAIXO	ITAPISSIRICA
27	VICÊNCIA 8	9143729	239288	0,1208	BAIXO	ITAPISSIRICA
28	VICÊNCIA 5	9152485	249685	0,0871	BAIXO	ENGENHO RETIRO
29	ALIANÇA 5	9161461	257029	0,0816	BAIXO	ENGENHO RETIRO
30	ITAQUITINGA 7	9150647	268805	0,0769	BAIXO	ITAPISSIRICA
31	VICÊNCIA 4	9151162	244610	0,0721	BAIXO	ENGENHO RETIRO
32	TRACUNHAÉM 2	9141319	269038	0,0601	BAIXO	ITAPISSIRICA
33	NAZARÉ DA MATA 6	9152499	265116	0,0584	BAIXO	ITAPISSIRICA
34	ALIANÇA 10	9163289	264948	0,056	BAIXO	ENGENHO RETIRO
35	ITAQUITINGA 13	9145253	266517	0,0541	BAIXO	ITAPISSIRICA

Tabela 12 - Vazão média regularizada das barragens (Continua)

36	ITAQUITINGA 12	9145921	268626	0,0519	BAIXO	ITAPISSIRICA
37	VICÊNCIA 7	9148751	245786	0,0479	BAIXO	ENGENHO RETIRO
38	NAZARÉ DA MATA 2	9155367	262862	0,0448	BAIXO	ITAPISSIRICA
39	ITAQUITINGA 9	9148208	268090	0,0409	BAIXO	ITAPISSIRICA
40	ALIANÇA 7	9164008	261945	0,0396	BAIXO	ENGENHO RETIRO
41	VICÊNCIA 3	9155094	248044	0,0365	BAIXO	ENGENHO RETIRO
42	MURUPÊ 2	9154537	231637	0,0358	BAIXO	ENGENHO RETIRO
43	TIMBAÚBA 8	9158384	251486	0,0358	BAIXO	ENGENHO RETIRO
44	MURUPÊ 8	9145064	234535	0,0334	BAIXO	ITAPISSIRICA
45	VICÊNCIA 1	9153718	238781	0,0313	BAIXO	ENGENHO RETIRO
46	TRACUNHAÉM 5	9139710	260075	0,0313	BAIXO	ITAPISSIRICA
47	ITAQUITINGA 11	9147004	269148	0,0299	BAIXO	ITAPISSIRICA
48	MURUPÊ 3	9153007	237922	0,0261	BAIXO	ENGENHO RETIRO
49	NAZARÉ DA MATA 1	9154440	255345	0,026	BAIXO	ENGENHO RETIRO
50	ITAQUITINGA 1	9154782	267775	0,0256	BAIXO	ITAPISSIRICA
51	ITAQUITINGA 2	9155519	269071	0,0256	BAIXO	ITAPISSIRICA
52	ITAQUITINGA 10	9148692	269825	0,0236	BAIXO	ITAPISSIRICA
53	ALIANÇA 8	9159506	258092	0,0228	BAIXO	ENGENHO RETIRO
54	TRACUNHAÉM 3	9137617	256526	0,0226	BAIXO	ITAPISSIRICA
55	NAZARÉ DA MATA 9	9146514	264084	0,0218	BAIXO	ITAPISSIRICA

Tabela 12 - Vazão média regularizada das barragens (Conclusão)

56	CARPINA 7	9135958	251258	0,0212	BAIXO	ITAPISSIRICA
57	VICÊNCIA 6	9146796	242058	0,0195	BAIXO	ENGENHO RETIRO
58	ALIANÇA 6	9163624	260695	0,0194	BAIXO	ENGENHO RETIRO
59	ITAQUITINGA 3	9155273	270629	0,0188	BAIXO	ITAPISSIRICA
60	GOIANA 5	9156260	271945	0,0184	BAIXO	ITAPISSIRICA
61	MURUPÊ 5	9151200	236703	0,0178	BAIXO	ENGENHO RETIRO
62	VICÊNCIA 2	9155697	243905	0,0173	BAIXO	ENGENHO RETIRO
63	ALIANÇA 9	9160461	260504	0,0166	BAIXO	ENGENHO RETIRO
64	NAZARÉ DA MATA 5	9150913	260289	0,0153	BAIXO	ITAPISSIRICA
65	ITAQUITINGA 4	9153109	269548	0,015	BAIXO	ITAPISSIRICA
66	MURUPÊ 4	9152126	237000	0,0147	BAIXO	ENGENHO RETIRO
67	VICÊNCIA 9	9148818	250887	0,0133	BAIXO	ITAPISSIRICA
68	TRACUNHAÉM 1	9142359	261126	0,0106	BAIXO	ITAPISSIRICA
69	NAZARÉ DA MATA 4	9150508	255416	0,0088	BAIXO	ITAPISSIRICA
70	NAZARÉ DA MATA 8	9147232	256010	0,007	BAIXO	ITAPISSIRICA
71	TRACUNHAÉM 4	9138847	258163	0,007	BAIXO	ITAPISSIRICA
72	NAZARÉ DA MATA 7	9145819	255028	0,0066	BAIXO	ITAPISSIRICA
73	NAZARÉ DA MATA 3	9149369	253679	0,0043	BAIXO	ITAPISSIRICA

Fonte: O autor (2023).

Na sub-bacia Nazaré da Mata, que possui o maior estresse hidrológico, foram distribuídos apenas seis reservatórios. Na região classificada como estresse hidrológico "Médio", foram identificadas 19 barragens, enquanto nas

áreas classificadas como "Baixo" foram encontrados 48 barramentos. No entanto, é importante ressaltar que a quantidade de estruturas não é necessariamente um reflexo do potencial de redução do déficit hídrico em uma região. Sendo necessário analisar como as vazões regularizadas contribuem para mitigar o estresse hidrológico em cada sub-bacia.

Outro parâmetro importante considerado neste estudo é o impacto que a implantação das estruturas pode ter na redução do estresse hidrológico em cada sub-bacia, por meio das vazões regularizadas proporcionadas pelos reservatórios. Para isso, foi realizado o somatório das vazões médias regularizadas, juntamente com a Q_{90} (vazão correspondente a 90% de confiança) de cada sub-bacia, a fim de determinar um novo nível de estresse hidrológico (EH_{novo}). A Tabela 13, a seguir, apresenta as demandas hídricas por sub-bacia, as vazões médias regularizadas e os novos níveis de estresse hidrológico em cada uma delas.

Tabela 13 - Informações sobre a vazão média regularizada, a vazão de referência, demanda e indicador do novo estresse hidrológico (EH_{novo}) e do estresse hidrológico sem a implantação dos barramentos (EH)

Ponto de Controle	Vazão média regularizada Q_{reg} (m³/s)	Q_{90} (m³/s)	Q(outorga) (m³/s)	$\frac{Q_{outorga}}{Q_{90}+Q_{reg}} * 100$	EH	EH_{novo}
P1 (Caricé)	0,539	1,121	0,356	21,45%	Médio	Baixo
P2 (Engenho Retiro)	0,704	0,731	0,147	10,24%	Baixo	Baixo
P3 (Nazaré da Mata)	0,139	0,052	0,049	25,65%	Alto	Médio
P4 (Itapissirica)	0,996	0,539	0,120	7,82%	Baixo	Baixo

Fonte: O **a**utor (2023).

A implantação das barragens resultou na redução do nível de estresse hidrológico em todas as sub-bacias analisadas. Mesmo na sub-bacia Nazaré da Mata, que possui o menor número de estruturas, a classificação do estresse passou de "Alto" para "Médio", alterando o percentual de estresse hidrológico de 94,76% para 25,65%. Esse valor está próximo do limite para ser classificado como "Baixo", conforme definido por Durães, Mello e Beskow (2014).

Na sub-bacia Caricé, que originalmente possuía um nível de estresse "Médio", a implantação das barragens reduziu o estresse para "Baixo", com uma diminuição percentual de 10,32%, passando de 31,77% para 21,45%. Essa mudança de classificação, de acordo com Durães, Mello e Beskow (2014) proporciona segurança hídrica para a população, reduz conflitos relacionados à água e aumenta o potencial de desenvolvimento econômico.

A menor redução percentual do nível de estresse hidrológico ocorreu na sub-bacia Engenho Retiro, com um total de 9,90%, indo de 20,14% para 10,24%. No entanto, essa sub-bacia já estava classificada como "Baixo" em termos de estresse. Apesar de possuir a segunda maior vazão regularizada (0,704 m^3/s), a sub-bacia já apresentava um índice de estresse baixo, o que resultou em um impacto menor na redução do nível de estresse.

Esses resultados destacam os benefícios da implantação das barragens na redução do estresse hidrológico em diferentes sub-bacias, proporcionando maior segurança hídrica, menor conflito pelo uso da água e fomentando o desenvolvimento econômico.

Atrelada à hierarquização de soluções e ao impacto na redução do déficit hídrico nas sub-bacias, a calibração automática se destaca como um mecanismo que auxilia a tomada de decisão por parte dos gestores. A facilidade de obtenção de modelos e de determinação de vazões em pontos das bacias hidrográficas contribui para a gestão hídrica, especialmente em situações de eventos extremos ou eminência de ruptura de barragens, onde é fundamental contar com valores precisos para embasar as decisões estratégicas.

Um exemplo prático da aplicação da calibração automática é na gestão de sistemas de controle de cheias. Geralmente, esses sistemas são compostos por vários reservatórios que recebem aporte de água proveniente de diferentes sub-bacias. Durante períodos de grandes eventos hidrológicos, os gestores hídricos precisam decidir sobre a operação dos dispositivos de descarga, como comportas e descargas de fundo. Nesse contexto, a utilização da ferramenta de calibração automática fornece valores diários de vazões e possibilita a modelagem de cenários futuros com base em previsões pluviométricas. Isso auxilia os gestores na tomada de decisões mais informadas e eficientes.

Outra aplicação da ferramenta de calibração automática é no auxílio à gestão de riscos relacionados à ruptura de barragens. Um exemplo mencionado no trabalho de Soares *et al.* (2023) descrevem uma situação de emergência na

Barragem de Ipanema I, localizada no município de Águas Belas, estado de Pernambuco. Nesse caso, os gestores tiveram que mobilizar esforços em poucos dias para mitigar e restaurar a segurança da estrutura, enfrentando dificuldades na previsão das cheias que atingiam a seção do barramento. Nesse contexto, a calibração automática pode fornecer uma base de dados mais robusta, contribuindo para a tomada de decisões mais seguras em eventos similares.

Em resumo, a calibração automática desempenha um papel importante na gestão hídrica, fornecendo dados confiáveis e auxiliando os gestores na tomada de decisões estratégicas, tanto na gestão de sistemas de controle de cheias quanto na gestão de riscos relacionados à ruptura de barragens. Essa ferramenta oferece uma base sólida de informações para lidar com eventos extremos e contribui para a segurança e a eficiência na gestão dos recursos hídricos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Esta tese apresentou uma estruturação em capítulos que abordou duas ferramentas essenciais para apoiar a gestão de recursos hídricos: o estresse hidrológico e a calibração automática. Para uma compreensão completa dessas ferramentas, foi realizado um embasamento teórico que abordou conceitos relacionados à segurança hídrica, outorga de uso da água, gestão dos recursos hídricos, estresse hidrológico e modelagem hidrológica.

A utilização da base de dados de outorga do sistema da APAC desempenhou um papel fundamental nesse estudo. No entanto, recomenda-se que sejam realizadas melhorias na consistência dos dados, a fim de diagnosticar áreas com maiores demandas e disponibilizar informações sobre os usos denominados insignificantes. Dessa forma, seria possível realizar um novo estudo, considerando o impacto desses usos no grau de estresse hidrológico.

Em relação à ferramenta de calibração automática, sugere-se a realização de um estudo que leve em consideração o tempo associado à elaboração de um modelo de calibração automática, comparando-o com o processo de criação de um modelo por meio do método de tentativa e erro. Essa comparação permitiria analisar as diferenças de tempo e custo computacional entre os dois processos, proporcionando uma visão mais abrangente sobre a eficiência e viabilidade dessas abordagens.

Essas recomendações visam aprimorar ainda mais as ferramentas apresentadas, permitindo um melhor uso e aproveitamento no contexto da gestão de recursos hídricos. Ao implementar as melhorias sugeridas, será possível aprofundar o conhecimento sobre o estresse hidrológico, otimizar a tomada de decisões e alocar de forma mais eficiente os recursos hídricos disponíveis.

Em suma, este estudo contribuiu para o avanço do conhecimento sobre o estresse hidrológico e a calibração automática, destacando sua importância na gestão de recursos hídricos. As análises e resultados apresentados indicaram que as ferramentas podem auxiliar os gestores nas tomadas de decisão em prol da garantia da segurança hídrica e aumentar o leque de assertividade para o gerenciamento dos recursos hídricos. As recomendações apresentadas fornecem caminhos para futuras pesquisas e aprimoramentos, promovendo uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

Ahiablame,L., Shakya, R., (2016). Modeling flood reduction effects of low impact developmentat a water shed scale. **Journal Environment Manage**, 171 (2016), pp. 81-91, 10.1016/j.jenvman.2016.01.036.

Ahmadisharaf, E., Camacho, R. A.; Zhang, H. X.; Hantush, M. M.; Mohamoud, Y. M. (2019). Calibration and Validation of Watershed Models and Advances in Uncertainty Analysis in TMDL Studies. **Journal of Hydrologic Engineering**, 24 (7). https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0001794

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

Akhter, M.S.,Hewa, G.A., (2016). The use of PCSWMM for assessing the impacts of land use change on hydrological responses and performance of WSUD in managing the impacts at my pong a catchment, **South Australia Water**, 8 (511) (2016), pp. 1-17.

ASCE. Design &Construction of Urban Storm water Management Systems, American Society of Civil Engineers. **American Society of Civil Engineers and Water Environment Federation**., New York (1992).

ANA. Agência Nacional De Águas (Brasil). **Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH).** Brasília, 2019. 112 p. ISBN: 978-85-8210-059-2.

ANA. Agência Nacional De Águas (Brasil). **Resolução nº 399, de 24 de setembro de 2004.** Disponível em: https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=100692. Acesso em: junho de 2020.

ANA. Agência Nacional De Águas (Brasil). **Atlas Água 2021 - Índice de Segurança Hídrica Urban**. Disponível em: http://dadosabertos.ana.gov.br/datasets /897b12b3081c49678a1b2161c372b70c_0/ about. Acesso em: janeiro de 2022.

APAC. Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Relatório de situação de recursos hídricos do Estado de Pernambuco 2011/2012**. Agência Pernambucana de Águas e Clima (Apac). – Recife: Apac, 2013.

APAC. **Agência Pernambucana de Águas e Clima (2019)**. Disponível em: http://www.apac.pe.gov.br Acesso em: abril de 2023.

APAC. **Agência Pernambucana de Águas e Clima. Outorga**. Disponível em: https://www.apac.pe.gov.br/outorga. Acesso em: junho de 2020

Aprile, F.M.; Farias V. P. (2001) Avaliação da qualidade da água da Bacia do rio Goiana, Pernambuco-Brasil. **Revista Bioikos**, vol. 15 nº 2. PUC-Campinas.

Archfield, S. A., Vogel, R. M., Steeves, P. A., & Sturdevant-Rees, P. (2010). The importance of appropriate credible intervals for uncertainty analysis of hydrologic and water quality models. **Water Resources Research**, 46(10).

Bakker, K., 2012. Watersecurity: research challenge sand opportunities. **Science** 337(6097), 914–915.

Barbosa, P. M. **Segurança Hidrica e Dimensão Social: um olhar sobre a região Metropolitana de Goiânia** / Priscilla Maia Barbosa – 2022. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Goiás, Instituto de Estudos Socioambientais (IESA), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Goiânia, 2022.

Bao, Z.; Zhang, J.; Liu, J.; Fu, G.; Wang, G.; He, R.; Yan, X.; Jin, J.; Liu, H.. Comparison of regionalization approaches based on regression and similarity for predictions in ungauged catchment sunder multiple hydro-climatic conditions. **Journal of Hydrology**, v. 466–467, p. 37–46, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.07.048

Beck, H. E.; Van Dijk, A. I. J. M.; De Roo, Ad; Dutra, E.; Fink, G.; Orth, R.; Schellekens, J.. Global evaluation of runoff from 10 state-of-the-arthydrological models. **Hydrologyand Earth System Sciences**, v. 21, n. 6, p. 2881–2903, 2017.

Bedan, E.S.; Clausen, J.C. (2009). Storm water run off quality and quantity from traditional and low impact development watersheds. **J. Am. Water Resour. Assoc**., 45 (4), pp. 998-1008

Bibi, T.S., Kara, K. G.; Bedada, H. J.; Bedada, R. D.; (2023). Application of PCSWMM for assessing the impacts of urbanization and climate changes on the efficiency of storm water drainage systems in managing urban flooding in Robe town, Ethiopia. **Journal of Hydrology: Regional Studies**. Volume 45. (2023). 101291. ISSN 2214-5818. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101291.

Bogardi, J.J.; Dudgeon, D.; Lawford, R.; Flinkerbusch, E.; Meyn, A.; Pahl-Wostl, C.; Vörösmarty, C. Watersecurity for a planet under pressure: interconnected challenges of a changing world call for sustainable solutions. **Current Opinion in Environmental Sustainability,** v. 4, n. 1, p. 35–43, 2012. DOI: 10.1016/j.cosust.2011.12.002.

Bond, N. R., Grigg, N., Roberts, J., McGinness, H., Nielsen, D., O'Brien, M., Overton, I., Pollino, C., Reid, J. R.W., and Stratford, D. (2018) Assessment of environmental flows cenarios using state-and-transition models. **Fresh water Biology,** (2017), 1–13.

Bond, N. R. Gestão sustentável de bacias hidrográficas : cenários do Brasil e da Austrália [recurso eletrônico] / **Vassiliki Terezinha Galvão Boulomytis, organizadora**. São Paulo, SP : EDIFSP, 2021

Brandt, S. L., Maddox, R. A., & Borchers, B. (2008). Hydrologic indicators for water-resource assessment. **US Geological Survey Scientific Investigations Report**, 2008-5094.

Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial da União, Brasília, 18 mar. 2005.

BRASIL. Lei nº 9.433. Política Nacional dos Recursos Hídricos. Brasília: **Secretaria dos Recursos Hídricos, Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal**, 1997.

Brown C, Ghile Y, Laverty M, Li K (2012) Decision scaling: linking bottom-up vulnerability analysis with climate projections in the water sector. **Water Resour Res**. 48(9):WR09537.

Carrera-Fernandez, J., Garrido, R. J. (2002). **Economia dos Recursos Hídricos**, ed. EDUFBA, Salvador-BA, 460 p.

Castro, C. N, de. Água, problemas complexos e o Plano Nacional de Segurança Hídrica / César Nunes de Castro – Rio de Janeiro: Ipea, 2022.

Chapman, T. G., Maxwell, R. M., Navarre-Sitchler, A. K., & Rasmussen, T. C. (2014). A coupled terrestrial and hydrologic model of the watershed-scale response to climate change. **Water Resources Research**, 50(5), 4047-4072.

Chi Water – Computational Hydraulics International Water. **PCSWMM support**. Retrieved February 3, 2021, from https://support.chiwater.com/

Collischonn, W., Dornelles, F. (2015). Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. 2º Edição revisada e ampliada**, Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH).**

Collischonn, W.; Tucci, C.E.M. Ajuste multi-objetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, volume 8, número 3, 27-39, 2003.

CONDEPE, FIDEM - Agência estadual de planejamento e pesquisa de Pernambuco. (2005). Bacia hidrográfica do rio goiana e sexto grupo de pequenos rios litorâneos - GL 6. **Governo do Estado de Pernambuco.** Secretaria de Planejamento – SEPLAN.

Cook, C., Bakker, K., 2012. Watersecurity: debating an emerging paradigm. **Global Environmental**. Change 22 (1), 94–102.

Cook, C., Bakker, K., 2016. Water Security: critical analysis of emerging trend sand definitions. In: Pahl-Wostl, Bhaduri, Gupta (Eds.), **Handbook on Water Security**. Edward Elgar, Cheltenham UK.

CPRH – Agência estadual de meio ambiente de Pernambuco, MMA – Ministério do Meio Ambiente. (2021). **Diagnóstico Socioambiental - Litoral Norte/Recursos Hídricos Superficiais.** Programa Nacional do Meio Ambiente.

CPRH. (2017) Monitoramento da qualidade da água de bacias hidrográficas do Estado de Pernambuco em 2017- Relatório Anual. **Agência Estadual de Meio Ambiente** – Pernambuco/Brasil.

CPRM (2019). Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais. Serviço geológico do Brasil / Relatório da Administração 2019. **Secretaria de Geologia.**

Mineração e Transformação mineral / Ministério de Minas e Defesa. Brasília: DF.

Cruz, J.C. 2001. **"Disponibilidade Hídrica para Outorga: Avaliação de Aspectos Práticos e Conceituais"**. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental: IPH/UFRGS. 205p. Porto Alegre.RS.

Daggupati, P., Yen, H., White, M. J., Srinivasan, R., Arnold, J. G., Keitzer, C. S., Sowa, S. P. (2015). Impact of model development, calibration and validation decisions on hydrological simulations in West Lake Erie Basin. **Hydrological Processes**, V. 29, 5307-5320. https://doi.org/10.1002/hyp.10536

Durães, M. F. **Caracterização e avaliação do estresse hidrológico da bacia do rio Paraopeba, por meio de simulação chuva-vazão de cenários atuais e prospectivos de ocupação e uso do solo utilizando um modelo hidrológico distribuído**. 2010. 147f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

Durães, M. F.; Mello, C. R.; Beskow, S. (2014). Estresse hidrológico: aplicação às bacias dos rios Paraopeba e Sapucaí, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos,** vol. 20 nº.2 Porto Alegre. p. 352 – 359.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, Ano: 2020. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085132/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos

Ekström, M., Kahil, T., & Söderholm, P. (2018). Renewable and non-renewable energy consumption and economic growth: Evidence from MENA countries. Energy Economics, 71, 161-176.

FERREIRA, E. de C.; SILVA, A. C. da.; CABRAL, J. J. da S. P.; AZEVEDO, J. R. G. de . Evaluation of hydrological parameters of the Goiana River basin in the State of Pernambuco using the automatic calibration tool of the hydrodynamic model PCSWMM in multiple fluviometric stations. **Research, Society and Development,** [S. l.], v. 11, n. 2, p. e15011225331, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i2.25331. Disponível em: https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/25331. Acesso em: 25 jul. 2023.

Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R. & Snyder, P. K. (2005). Global consequences of land use. **Science**, 309(5734), 570-574.

Formiga, K. T. M., Carvalho, M., Silva, K. A., Soares, A. K. (2016). Calibração do Storm Water Management Model (SWMM) utilizando algoritmos evolucionários multiobjetivo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 21(4), 697-707.https://doi.org/10.1590/s1413-41522016131862

Gain, A. K.; Giupponi, C.; Wada, Y. Measuring global water security to wards sustainable development goals. **Environmental Research Letters**, v. 11, dez. 2016. DOI: 10.1088/1748-9326/11/12/124015.

Galvão, D. M. O. **Subsídios à determinação de vazões ambientais em cursos d'água não regulados: o caso do ribeirão Pipiripau** (DF/GO). 2008. 219f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

Garambois, P. A., Roux, H.; Larnier, K., Labat, D., Dartus, D. (2015). Characterization of catch ment behaviourand rain fall selection for flash floodhydrological model calibration: catchments of the eastern Pyrenees. **Hydrological Sciences Journal**, V.60, 424-447. http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2014.909596

Gao, Y.; Vogel, R. M.; Kroll, C. N.; Poff, N. L.; Olden, J. D. (2008) Development of Representative Indicators of Hydrologic Alteration. **Journal of Hydrology**, v. 374, p. 136-147.

Gerlak, A.K., Mukhtarov, F., 2015. 'Waysofknowing' water: integrated water resources management and water security as complementary discourses. **Int. Environ. Agreements: Politics Law Econ**. 15 (3), 257–272.

Ghofrani, Z., Sposito, V., Faggian, R. (2019). Designing a Pond and Evaluating its Impactupon Storm-Water Quality and Flow: A Case Study in Rural Australia. **Ecological Chemistry and Engineering S**. 26(3), 475-491. https://doi.org/10.1515/eces-2019-0036.

Gou, J., Miao, C., Duan, Q., Tang, Q., Di, Z., Liao, W., Wu, J., Zhou, R. (2020). Sensitivity Analysis Based Automatic Parameter Calibration of the VIC Model for Stream flow Simulations Over China. **Water Resources Research**, 56, 1-19. https://doi.org/ 10.1029/2019WR025968

Gosling S.N, Zaherpour J.J, Mount N.J, Hattermann F.F, Dankers R., Arheimer B., Breuer L, Ding J, HaddelandI, Kumar R, Kundu D, Liu J, Van Griensven A, Veldkamp TIE, Vetter T, Wang X, Zhang X (2016) A comparison of changes in river run off from multiple global and catchment-scale hydrological models under global warming scenarios of 1°C, 2°C and 3°C. Clim Chang:1–19.

Grafton, R. Q.; Wheeler, S. A. Economics of Water Recovery in the Murray Darling Basin, Australia. **Annual Review of Resource Economics**, v. 10, p. 487-510, 2018.

Grey, D., Sadoff, C.W., 2007. Sinkorswim Watersecurity for growthand development. **Water Policy** 9 (6), 545–571.

GWP. Global Water Partnership , 2000. **Integrated Water Resources Management**. TAC (Technical Advisory Committee) Background Paper No. 4. GWP, Stockholm, Sweden.

Gujarati, D. N., Porter, D. C. (2009). **Basic Econometrics** 5th ed.McGraw-Hill/Irwin.

Harris, E.; Hatfield, E.; Healey, M.; Miller, D.; Schroder, D. (2006) Macro approach for watersharing in unregulated rivers. In: **International River Symposium,** 9th., Brisbane, Australia.

Hewitt C, Buontempo C, Newton P (2013). Using climate prediction stobetter serve society's needs. Eos 94(11):105–107.

Horne A, Nathan R, Poff NL, Bond N, Webb A (2019) Modelling flow-ecology responses in the Anthropocene: challenges for sustainable river in management. **Bioscience (in review)**.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Bacias e Divisões Hidrográficas do Brasil** | 2021. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/estudos-ambientais/31653-bacias-e-divisoes-hidrograficas-do-brasil.html. Acesso em: junho de 2022.

Jaiswal, R. K., Thomas, T., Galkate, R. V., Glosh, N. C., Lohani, A. K., Kumar, R. (2014). Development of Geomorphology Based Regional Nash Model for Data Scares Central India Region. **Water Resources Management**, 28 (2), 351-371. https://doi.org/10.1007/s11269-013-0486-x

James, L.D.; Shafiee-Jood, M. Interdisciplinary information for achieving water security. **Water Security**, v. 2, p.19-31, nov. 2017. DOI: 10.1016/j.wasec.2017.10.001.

James, W. (2005). Rules for Responsible Modeling. **Computational Hydraulics International.**

James, W. R. C., Wan, B., James, W. (2002). Implementation in PCSWMM using Genetic Algorithms for auto calibration and design- optimization. **Global Solutions for Urban Drainage – Proceedings of the Ninth International Conference on: Urban Drainage**; Portland, OR; United States.

Jatobá, L.; Silva, A.F. Estruturação Natural de Paisagens da Zona da Mata do Estado de Pernambuco. **Ciência Geográfica** - Bauru - XXVI - Vol. XXVI - (1): Janeiro/Dezembro – 2022.

Javaheri, H. (1998). Automatic Calibration of Urban Run-off Models Using Global Optimization Techniques. **Department of Civil Engineering and Applied Mechanic Mc Gill University**. Montreal, Canada.

Jiménez Cisneros, B.E., T. Oki, N.W. Arnell, G. Benito, J.G. Cogley, P. Döll, T. Jiang, S.S. Mwakalila, Thomas Fischer, Dieter Gerten, Regine Hock, Shinjiro Kanae, Xixi Lu, Luis José Mata, Claudia Pahl-Wostl, Kenneth M. Strzepek, Buda Su, B. van den Hurk (2014). Freshwater resources. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. **Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**: 229-269.

Junior, L. C. G. V., Rodrigues, D. B. B., Oliveira, P. T. S. (2019). Initial abstraction ratio and Curve Number estimation usingra in fall and run off data from a tropical watershed. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, V. 24, 1-9. https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920170199.

Krebs, G., Kokkonen, T., Valtanen, M., Koivusalo, H., Setala, H. (2013). A high resolution application of a stormwater management model (SWMM) using

genetic parameter optimization. **Urban water journal**, 10(6), 394-410. http://dx.doi.org/10.1080/1573062x.2012.739631.

Lee, J.G., Nietch, C.T., & Panguluri, S. (2017). SWMM Modeling methods for simulating Green infrastructure at a suburban head water shed: User's Guide. **U.S. Environmental Protection Agency**, Cincinnati, OH 45268.

Levino, N.A; Fontana, M.E; Monte, M.B.S.; Filho, W.A.L. **Modelo de decisão em grupo para diagnóstico de barreiras ao alcance de metas no Programa Brasileiro de Recursos Hídricos: uma análise do estado de Alagoas (2023)**. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, Brasil / Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil

Lopes, R. B.; Souza Filho, E. E. (2016). Indicadores e índices na gestão de recursos hídricos: uma revisão bibliográfica. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 21(2), 393-404.

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

Loukcs, D. P., Beek, E. V. (2005). Water Resources Systems Planning and Management and Applications: an Introduction to Methods, Models and Applications. **United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization – UNESCO**.

Loukcs, D. P., Beek, E. V. (2017). Water Resources Systems Planning and Management and Applications: an Introduction to Methods, Models and Applications II. **United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization – UNESCO.**

Martinez, C.A.E. **Calibração automática de modelo hidrológico com algoritmo baseado no comportamento de formigas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2014).

Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., Daggupati, P. (2015) Hydrologic and water quality models: Performance mean suresand evaluation criteria. **Transactions of the ASABE**. 58 (6), 1763-1785. https://doi.org/10.13031/trans.58.10715.

Moura, M R F de. **Gestão integrada e desafios à segurança dos recursos hídricos: proposta de índice de vulnerabilidade hídrica (IVH) na bacia do rio Capibaribe** / Micaella Raíssa Falcão de Moura – Recife, 2020. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2020.

Moura, G.B.A; Melo, J.S.P; Giongo, P.R.; Medeiros, S.R.R; Silva, A.P.N. Avaliação Climática do Município de Goiana, Pernambuco. **XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**. Disponível em: http://www.sbagro.org/files/biblioteca/2795.pdf. Acesso em 02 jun. 2023.

Munir, B. A., Ahmad, S. R., Hafeez, S. (2020). Integrated Hazard Modeling for Simulating Torrential Stream Response to Flash Flood Events. **International Journal of Geo-Information,** 9(1):1, 2-21. https://doi.org/10.3390/ijgi9010001.

Nash, J. E., Sutcliffe, J. V. (1970). River Flow Fore casting Through Conceptual Models, Part I - A Discussion of Principles. **Journal of Hydrology**, 10 (3), 282-290. https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6.

NSW. New South Wales. (2006). Macro Water Sharing Plans: the approach for unregulated rivers. **Australia: Department of Natural Resources – NSW**. 56p.

Norman, E., Bakker, K.J., Cook, C., Dunn, G., Allen, D., 2010. Water Security: A Primer. **Program on Water Governance**, University of British Columbia.

OECD. Water Security for Better Lives. OECD Studies on water. OECD Publishing, 2013. DOI: 10.1787/9789264202405-em OECD. **Principles on water governance**. 2015. Disponível em: http://www.oecd.org/gov/regional-policy/OECD-Principles-on-Water-Governancebrochure.pdf. Acesso em: março de 2022.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Resolução A/RES/64/292. 2010. Disponível em: https://undocs.org/en/A/RES/64/292. Acesso em: março de 2022.

Pandey, C. L. 2021. Managing urban water security: challenges and prospects in Nepal. **Environment, Development and Sustainability**, ed. 23, pp.241–257.

Peel M. C., McMahon T.A., Finlayson B.L. (2010) Vegetation impacton meanan nua levapo transpiration at a global catchment scale. **Water Resources Research,** 46(9):W09508.

PERNAMBUCO. Lei nº 11.426, de 17 de janeiro de 1997. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, e o Plano Estadual de Recursos Hídricos, institui o Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado de Pernambuco**: Pernambuco, 1997.

PERNAMBUCO. Lei nº 12.984, de 30 de dezembro de 2005. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e o Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado de Pernambuco**: Pernambuco, 2005.

PERNAMBUCO. Lei nº 14.028, de 26 de março de 2010. Cria a Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC, e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado de Pernambuco**: Pernambuco, 2010a.

PERNAMBUCO. Lei Nº 14.090, de 17 de junho de 2010. Dispõe sobre a Política Estadual de Enfrentamento às Mudanças Climáticas de Pernambuco, e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado de Pernambuco**: Pernambuco, 2010b.

PERNAMBUCO. Lei Nº 14.091, de 17 de junho de 2010. Dispõe sobre Política Estadual de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca, e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado de Pernambuco**: Pernambuco, 2010c.

PE3D. Pernambuco Tridimensional (2016). **Mapeamento do Território Pernambucano**. Disponível em: http://www.pe3d.pe.gov.br/. Acesso em: março 2022.

Prudhomme C, Wilby RL, Crooks S, Kay AL, Reynard NS (2010) Scenario-neutral approach to climate change impact studies: application to flood risk. **Journal of Hydrology,** 390:198–209

Quimpo, R. G.; McNally, T.A. (1983). Regionalized flow duration for Philippines. In: **Journal of Water Resources Planning and Management**. Vol. 109, nº 4, p. 320-330. Oct. 1983.

Ramos, P.B.; **Modelo para outorga de uso da água utilizando a metodologia multicritério de apoio à decisão: estudo de caso da Bacia Hidrográfica do rio Cubatão do Su**l / Florianópolis, 2005. Universidade Federal de Santa Catarina.

Reichold, A., Huggenberger, P., & Scheidler, S. (2010). Groundwater resources in urban areas: from understanding to sustainable management and governance. **Environmental Earth Sciences**, 60(5), 1099-1104.

Ribeiro Neto, A; Paz, A.R. da; Silva, E.R da. Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. Impactos e vulnerabilidade do setor de recursos hídricos no Brasil às mudanças climáticas. **Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação**, 2016. 590p. il. ISBN: 978-85-88063-30-3. p.188-240

Ribeiro, P. O. **Calibração automática de modelos em elementos finitos por meio de métodos de otimização e análise modal**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Rodrigues, JR., Coutinho, J., Paiva, A. L. R., Motteran, F. , Oliveira, L. M. M., Silva Filho, J. A., Pessoa, J O. Variância de parâmetros de qualidade da água e análise de agrupamentos na bacia hidrográfica do rio Goiana, Pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.15, n.06 (2022) 3013-3031 https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/download/255113/42904-

Rössler, O., Fischer, A. M., Huebener, H.,Maraun, D., Benestad, R. E., Christodoulides, P.,…Vlachogiannis, D.(2017): Challenges to link climate change data provision and user needs - perspective from the COST-action VALUE. Int **Journal Climatological.**

Rossman, L. A. (2015). Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0. U. S. **Environmental Protection Agency (EPA)**, Cincinnati, OH.

Sarma, P. B. S., Delleur, J. W., Rao, A. R. (1973). Comparison of rainfall-runoff models for urban areas. Journal of Hydrology, 18 (3-4), 329-347. https://doi.org/10.1016/0022-1694(73)90056-5.

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

Silva, A. C. D., Ferreira, E. D. C., Cabral, J. J. D. S. P., & Azevedo, J. R. G. D. (2022). Determination of hydrological stress in a river basin in northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 27, e2.

Silva, E. R. A. C; Galvíncio, J. D. A Metodologia de Escopo Global MWSP Aplicada no Âmbito Local para Análise do Estresse Hidrológico no Médio Trecho da Bacia do Ipojuca- PE: uma Contribuição à Temática da Transposição do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Geografia Física**. 2011, ISSN:1984-2295.

Silva, M. B. M.; Ribeiro, M. M. Alocação e governança da água como mecanismos de resolução de conflitos. **Engenharia Sanitária Ambiental**. 27 (3) • May-Jun 2022 • https://doi.org/10.1590/S1413-415220210072

Silva, B.M.B; Silva, D. D; Moreira, M.C. Influência da sazonalidade das vazões nos critérios de outorga de uso da água: estudo de caso da bacia do rio Paraopeba. **Revista Ambienta e Água.** vol. 10 n. 3, p. 623-634• Set 2015 • https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1587

Scott, C.A., Meza, F.J., Varady, R.G., Tiessen, H., McEvoy, J., Garfin, G.M.; Farfan, L.M; Wilder, M.; Pineda-Pablos, N., 2013. Water security and adaptive management in the arid Americas. **Annals Assoc. Am. Geogr**. 103 (2), 280–289.

Setti, A. A.; Lima, J. E. F. W.; Chaves, A. G. M.; Pereira, I. C. Introdução ao gerenciamento dos recursos hídricos. 2. ed. Brasília: **Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas**, 2001.

Shepherd T.G., Boyd E., Calel R.A., Chapman S.C., Dessai, S., Dima-West I.M., Fowler H.J., James, R., Maraun D., Martius, O., Senior, A.C., Sobel, A.H, Stainforth, D. A, Tett, S.F.B, Trenberth, K.E, Van der Hurk, B.J.J.M., Watkins, N.W, Wilby, R.L., Zenghelis, D.A. (2018) Storylines: an alternative approach to representing uncertainty in physical aspects of climate change. **Climate Chang** 151(3–4):555–571

Soares, A. E. P.; Silva, A. C. Da; Prado, A. R. M. Do; Lafayette, F. B.; Silva, S. R. da. Gestão do Risco em Barragens com Indício de Ruptura Iminente: Lições Aprendidas com o Caso Da Barragem Ipanema I. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 24, n. 92, p. 275–287, 2023. DOI: 10.14393/RCG249263601.

Sorooshian, S.; Gupta, V.K. Model calibration In: Singh, V. J. (editor) Computer models of water shed hydrology. **Water Resourc**. Pub., High lands Ranch. 1130 p., 1995.

Stinghen, C.M; Mannich, M. Panorama das estratégias de gestão de bacias críticas no Brasil. v. 19 n. 2022 (2022): REGA - **Revista de Gestão de Água da América Latina** - ISSN 2359-1919

Swart RJ, de Bruin K, Dhenain S, Dubois G, Groot A, von der Forst E (2017) Developing climate information portal swith users: promises and pitfalls. **Climate Services.** 6:12–22

Teixeira, R. Z; Ribeiro, D. Desafios no Processo de Obtenção da Segurança Hídrica Frente a Aplicação dos Instrumentos de Gestão da Água. **Revista Brasileira de Geografia Física.** v.15, n.05 (2022) 2371-2397. ISSN:1984-2295.

Torres, C. O. (2007). **Projeto Águas do Norte**.

Tucci, C. E. M. **Regionalização de Vazões**. Porto Alegre: UFRGS, 2002. 256 p.

Tucci, C.E.M. Modelos hidrológicos. ABRH, **Editora da UFRGS**. Porto Alegre, 1998.

Tucci, C. E. M. Hidrologia Ciência e Aplicação. 2. ed. Porto Alegre: **Editora da Universidade/ UFRGS**, 2001.

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

UN. United Nations. (2015) General Assembly Resolution A/RES/70/1. Transforming Our World, the 2030 Agenda for Sustainable Development.

UN. Water. (2013). Water Security &the Global Water Agenda- **A UN-Water Analytical Brief.**

UNEP. United Nations Environment Program, 2009. Water Security and Ecosystem Services: The Critical Connection. **UNEP**, Nairobi.

UNESCO. International Hydrological Programme (IHP), Eighth Phase, Water Security: Responses to Local, Regional and Global Challenges. **Strategic Plan IHP-VIII (2014-2021)**. Paris, 2013.

UNESCO. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2013. Free Flow: Reaching Water Security Through Cooperation. **UNESCO and Tudor Rose**, Paris.

Van Noordwijk, M.; Kim, Y.-S.; Leimona, B.; Hairiah, K.; Fisher, L. A. Metric sofwater security, adaptive capacity, and agroforestry in Indonesia. Current **Opinion in Environmental Sustainability**, v. 21, p. 1–8, 2016. DOI:10.1016/j.cosust.2016.10.004.

Vestena, L. R.; Oliveira, E. D.; Cunha, M. C.; Thomaz, E. L. (2012) Vazão ecológica e disponibilidade hídrica na bacia das Pedras, Guarapuava-PR. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 7, n. 3, p. 212-227.

VOGEL, R.M.; FENNESSEY, N.M. Flow-duration curves I: new interpretation and confidence intervals. **Journal of Water Resources Planning and Management**. Vol. 120, nº 4, p. 485-504, 1994.

Vörösmarty, C. J.; Osuna, V. R.; Cak, A. D.; Bhaduri, A.; Bunn, S. E.; Corsi, F.; Uhlenbrook, S. Ecosystem-based water security and the sustainable development goals. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v. 18, n.4, p. 317-333, 2018. doi:10.1016/j.ecohyd.2018.07.004

Wagener, T.; Mcintyre, N. Identification ofrainfall-runoff models for operation alapplications. **Hydrological Sciences Journal**, v. 50, n. 5, p. 735–751, 2005. Disponível em: https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.5.735

Wang, Y., Zhu, S., Yuan, L., Deng, R. (2020). An automatic parameter calibration method for the SWAT model in run off simulation. **River Research and Applications**, 36, 1321-1333. https://doi.org/10.1002/rra.3655

WEF. World Economic Forum, 2011. The Water-Food- Energy-Climate Nexus. **Island Press**, Washington, DC.

World Wildlife Fund (WWF), 2009. Understand ing Water Risks: A Primer on the Consequences of Water Scarcity for Governmentand Business. WWF-UK, Surrey, UK.

WWC. **World Water Council**. A Pact for a watersecurity world – 2013- 2015 Strategy. 2012.

Zeitoun, M., Lankford, B., Krueger, T., Forsyth, T., Carter, R., Hoekstra, A.Y., Taylor, R.,Varish, O., Cleaver, F., Boelens, R., Swatuk, L., Tickner, D., Scott, C.A., Mirumachi,N., Matthews, N., 2016. Reductionist and integrative research approaches to complex water security policy challenges. **Global Environ**. Change 39, 143–154.