

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA HÍDRICA

**Modelagem hidrológica para previsão de vazões afluentes às
usinas hidrelétricas da bacia do Alto Rio Tocantins**

Jordana Ghisleni

29 de agosto de 2025

Itajubá, Minas Gerais

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA HÍDRICA

Jordana Ghisleni

**Modelagem hidrológica para previsão de vazões afluentes às
usinas hidrelétricas da bacia do Alto Rio Tocantins**

Dissertação a ser submetida ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Hídrica como parte dos requisitos para obtenção do
Título de **Mestre em Engenharia Hídrica**.

Área de concentração: Geração Hidroelétrica

Orientador: Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva

29 de agosto de 2025

Itajubá, Minas Gerais

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA HÍDRICA

Jordana Ghisleni

**Modelagem hidrológica para previsão de vazões afluentes às
usinas hidrelétricas da bacia do Alto Rio Tocantins**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 25 de agosto de 2025, conferindo ao autor o título de **Mestre em Engenharia Hídrica**.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva (Orientador)

Prof. Dra. Ana Paula Moni Silva (Docente Interna)

Dr. Leopoldo Uberto Ribeiro Júnior (Convidado – CEFET/MG)

29 de agosto de 2025

Itajubá, Minas Gerais

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu orientador, professor Benedito Cláudio da Silva, pela orientação atenciosa e pelo vasto conhecimento compartilhado, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, contribuindo de forma significativa para o meu aprendizado e crescimento profissional.

Agradeço à minha família pelo amor, apoio incondicional e incentivo constante em todos os momentos. Sem a paciência, compreensão e motivação que recebi de vocês, este trabalho não teria sido possível.

Meus colegas de trabalho merecem reconhecimento especial pelo compartilhamento de experiências, conhecimento e pela colaboração diária, que me permitiram conciliar os estudos com as atividades profissionais. Em especial, agradeço à minha colega e amiga Camila Costa de Oliveira, cujo incentivo foi decisivo para que eu iniciasse o curso e mantivesse a motivação ao longo de toda a jornada.

Aos meus amigos, sou grata pela presença nos momentos de desafios e conquistas, pelas palavras de encorajamento, compreensão e companhia, tornando este percurso mais leve e significativo.

Por fim, agradeço à faculdade e aos professores, pelo ensino de excelência, pelas oportunidades de aprendizado e pelo suporte oferecido durante todo este período.

A todos vocês, meu muito obrigada. Cada contribuição, cada gesto de apoio e incentivo foram fundamentais para que esta dissertação se tornasse realidade.

RESUMO

O Brasil apresenta forte dependência da energia hidrelétrica, tornando a gestão eficiente das usinas essencial para a segurança do sistema elétrico. A operação dessas instalações exige planejamento que considere períodos de alta vazão, capazes de comprometer a integridade das estruturas e a continuidade da geração de energia. Nesse contexto, a bacia do Rio Tocantins assume papel estratégico, pois abriga importantes usinas, como Serra da Mesa, Cana Brava e São Salvador, sendo fundamental o monitoramento e a previsão de vazões, incluindo a vazão incremental entre usinas, para reduzir riscos hidrológicos e otimizar a operação das hidrelétricas. O presente estudo teve como objetivo calibrar o Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH), desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), para simular o comportamento hidrológico do trecho da bacia do Rio Tocantins correspondente às UHEs Cana Brava e São Salvador. A metodologia adotada incluiu o pré-processamento da bacia, utilizando o plugin IPH Hydro Tools no QGIS para discretizar minibacias, mapear a rede de drenagem e definir unidades de resposta hidrológica (URHs). Essas unidades foram estabelecidas com base na cobertura do solo, topografia e características do solo, considerando classes como floresta, agricultura, campo, várzea e corpos d'água. Essa abordagem permitiu que o modelo reproduzisse adequadamente os diferentes comportamentos hidrológicos ao longo da bacia, garantindo que cada unidade respondesse de forma coerente às precipitações e ao fluxo de água. A calibração inicial do modelo foi realizada a partir da UHE Serra da Mesa, localizada a montante, mostrando bom desempenho na reprodução do movimento natural das águas dessa unidade. Entretanto, os resultados para as sub-bacias das UHEs Cana Brava e São Salvador apresentaram limitações devido à influência dos reservatórios a montante. Para contornar essa questão, aplicou-se a substituição das vazões calculadas pelo modelo pelas vazões observadas defluentes dos reservatórios, permitindo representar de forma realista a operação das usinas e a propagação da corrente ao longo da bacia, incluindo a contribuição da vazão incremental entre aproveitamentos. Os resultados obtidos demonstram que o MGB-IPH, devidamente calibrado e ajustado, é uma ferramenta confiável para previsão de vazões e planejamento operacional em grandes bacias. A aplicação do modelo apoia decisões estratégicas para a operação segura e eficiente das usinas hidrelétricas, contribuindo para a mitigação de riscos hidrológicos, reforçando a segurança do sistema elétrico nacional e considerando o impacto das vazões incrementais na operação das UHEs. Além disso, a comparação com estudos anteriores realizados em outras grandes bacias brasileiras evidenciou que o desempenho alcançado no Alto Tocantins é compatível com a literatura, reforçando a consistência do modelo e a importância da calibração criteriosa para garantir previsões confiáveis.

Palavras-chave: Gestão de usinas hidrelétricas, previsão de vazões, calibragem de modelos hidrológicos, MGB-IPH, bacia do Rio Tocantins.

ABSTRACT

Brazil is heavily dependent on hydroelectric power, making efficient plant management essential for the security of the electrical system. Operating these facilities requires planning that considers periods of high flow, which can compromise the integrity of the structures and the continuity of power generation. In this context, the Tocantins River basin plays a strategic role, as it is home to important power plants such as Serra da Mesa, Cana Brava, and São Salvador. Monitoring and forecasting flow, including incremental flow between plants, is essential to reduce hydrological risks and optimize hydroelectric plant operations. This study aimed to calibrate the Large Basin Model (MGB-IPH), developed by the Institute of Hydraulic Research (IPH), to simulate the hydrological behavior of the section of the Tocantins River basin corresponding to the Cana Brava and São Salvador hydroelectric plants. The methodology adopted included basin preprocessing using the IPH Hydro Tools plugin in QGIS to discretize mini-basins, map the drainage network, and define hydrological response units (HRUs). These units were established based on land cover, topography, and soil characteristics, considering classes such as forest, agriculture, field, floodplain, and water bodies. This approach allowed the model to adequately reproduce the different hydrological behaviors throughout the basin, ensuring that each unit responded coherently to rainfall and streamflow. The initial calibration of the model was performed using the Serra da Mesa HPP, located upstream, and demonstrated good performance in reproducing the natural water movement of this unit. However, the results for the Cana Brava and São Salvador HPP sub-basins presented limitations due to the influence of upstream reservoirs. To address this issue, the model's calculated flows were replaced by observed outflows from the reservoirs, allowing for a realistic representation of plant operation and current propagation throughout the basin, including the contribution of incremental flow between developments. The results demonstrate that the MGB-IPH, properly calibrated and adjusted, is a reliable tool for flow forecasting and operational planning in large basins. The model's application supports strategic decisions for the safe and efficient operation of hydroelectric plants, contributing to the mitigation of hydrological risks, strengthening the security of the national electricity system, and considering the impact of incremental flows on hydroelectric power plant operations. Furthermore, comparison with previous studies conducted in other large Brazilian basins showed that the performance achieved in the Alto Tocantins region is consistent with the literature, reinforcing the model's consistency and the importance of careful calibration to ensure reliable forecasts.

Keywords: Hydroelectric plant management, flow forecasting, hydrological model calibration, MGB-IPH, Tocantins River basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição das usinas hidrelétricas no Brasil	17
Figura 2 - Efeito do reservatório no amortecimento de cheia	19
Figura 3 - Curvas-Guia de reservatório de múltiplos usos	20
Figura 4 - Função dos reservatórios na regularização das vazões	22
Figura 5 - Cadeia de modelos desenvolvida pelo CEPEL	23
Figura 6 - Metodologia de análise hidrológica da Bacia do Rio Tocantins	30
Figura 7 - Bacia discretizada em células ligadas entre si por canais de drenagem	33
Figura 8 - Célula do modelo dividida em N blocos de uso, tipo e cobertura do solo.....	34
Figura 9 - Fluxograma da aplicação do modelo MGB-IPH em relação aos dados de entrada.	34
Figura 10 - Resolução do modelo hidrológico frente à resolução das informações utilizadas	36
Figura 11 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins-Araguaia	43
Figura 12 - Usinas da cascata da Bacia do Rio Tocantins.....	45
Figura 13 - Relevo da Bacia do Rio Tocantins.....	46
Figura 14 - Tipos de solo da Bacia do Rio Tocantins	48
Figura 15 - Precipitação mensal da Bacia Hidrográfica da UHE Serra da Mesa	50
Figura 16 – Histórico de vazões naturais da UHE Cana Brava.....	51
Figura 17 - Histórico de vazões naturais da UHE São Salvador	52
Figura 18 - Minibacias geradas através do IPH Hydro Tools	54
Figura 19 - URHs geradas para a área de estudo.....	55
Figura 20 - Estações fluviométricas e pluviométricas por Sub-Bacias	57
Figura 21 - Histórico de vazões observadas - UHE Serra da Mesa.....	61
Figura 22 - Histórico de vazões observadas - UHE Cana Brava.....	61
Figura 23 - Histórico de vazões observadas - UHE São Salvador	62
Figura 24 - Calibração sub-bacia UHE Serra da Mesa sem Qsubst	65
Figura 25 - Calibração sub-bacia UHE Cana Brava sem Qsubst	65
Figura 26 - Calibração sub-bacia UHE São Salvador sem Qsubst.....	65
Figura 27 - Calibração sub-bacia UHE Cana Brava com Qsubst.....	67
Figura 28 - Calibração sub-bacia UHE São Salvador com Qsubst	67
Figura 29 - Vazão incremental sub-bacia UHE Cana Brava.....	69
Figura 30 - Vazão incremental sub-bacia UHE São Salvador.....	69
Figura 31 - Validação dos parâmetros calibrados para a sub-bacia UHE Cana Brava	70
Figura 32 - Validação dos parâmetros calibrados para a sub-bacia UHE São Salvador	71

Figura 33 - Esquema do balanço de água vertical na camada de solo.....	80
Figura 34 - Estrutura de cálculo de uma célula com dois blocos	85
Figura 35 - Discretização de uma bacia em células e a rede de drenagem.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados dos sistemas com uma UHE	21
Tabela 2 - Esquema de subdivisão da bacia hidrográfica adotado no MGB-IPH	32
Tabela 3 - Parâmetros fixos do modelo MGB-IPH	38
Tabela 4 - Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH	40
Tabela 5 - Parâmetros iniciais do solo	40
Tabela 6 - Estações fluviométricas	57
Tabela 7 - Estações pluviométricas	58
Tabela 8 - Estações meteorológicas da região estudada	59
Tabela 9 - Parâmetros hidrológicos por URH e da bacia	62
Tabela 10 - Coeficientes da calibração sem Q_{subst}	66
Tabela 11 - Coeficientes da calibração com Q_{subst}	67
Tabela 12 - Coeficientes da calibração da vazão incremental nas sub-bacias	70
Tabela 13 - Validação dos parâmetros calibrados	71
Tabela 14 - IAF de coberturas vegetais	89
Tabela 15 - Valores de albedo médio diário	90
Tabela 16 - Valores de albedo de algumas coberturas vegetais típicos do Brasil	90
Tabela 17 - Resistência superficial de diversos tipos de vegetação em condições de boa disponibilidade de água no solo	91
Tabela 18 - Altura dos tipos de cobertura vegetal	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AgriProf	Agricultura Profunda
AgriRas	Agricultura Rasteira
ANA	Agência Nacional de Águas
ASI	Área de Solo Exposto / Solo Infiltrante
b	Forma da Relação entre Armazenamento e Saturação
CampProf	Campo Profundo
CampRas	Campo Rasteiro
CAP	Fluxo do Reservatório Subterrâneo para a Camada Superficial
CB	Retardo do Reservatório Subterrâneo
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CI	Calibração da Propagação Superficial
CS	Calibração da Propagação Subsuperficial
FlorProf	Floresta Profunda
FlorRas	Floresta Rasteira
IAF	Índice de Área Foliar
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
Kbas	Vazão Durante a Estiagem
Kint	Quantidade de Água que Escoa Subsuperficialmente
MDE	Modelo Digital de Elevação
MGB	Modelo de Grandes Bacias
MNT	Modelos Numéricos do Terreno
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
QB	Vazão de Base
QGIS	Sistema de Informação Geográfica Quantum
Qsubst	Vazões Observadas Defluentes dos Reservatórios a Montante
R2	Coeficiente de Nash
Rlog	Coeficiente de Nash para os Logaritmos das Vazões
SIG	Sistema de Informações Geográficas

SIN	Sistema Interligado Nacional
UHCB	Usina Hidrelétrica Cana Brava
UHE	Usina Hidrelétrica
UHSA	Usina Hidrelétrica São Salvador
UHSM	Usina Hidrelétrica Serra da Mesa
URH	Unidade de Resposta Hidrológica
Wc	Armazenamento Residual
Wm	Capacidade de Armazenamento do Solo
XL	Forma da Curva de Redução da Drenagem Intermediária
ΔV	Relação entre Volumes Medidos e Calculados

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. Geral	16
2.2. Específicos	16
3. REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1. Caracterização das usinas hidrelétricas no Brasil.....	17
3.2. Regime operacional e controle de cheias de usinas hidrelétricas.....	18
3.3. Modelos de previsão de vazões	24
3.3.1. Modelos determinísticos.....	24
3.3.2. Modelos estocásticos	25
3.3.3. Modelos baseados em inteligência artificial.....	25
3.4. Previsão de vazões	26
3.4.1. Aplicações de modelos de previsão de vazões	27
4. METODOLOGIA	30
4.1. Modelo MGB-IPH	30
4.1.1. Estrutura do modelo	32
4.1.2. Preparação dos dados de entrada	35
4.1.3. Parâmetros do modelo	36
4.1.4. Calibração do modelo	41
4.2. Bacia hidrográfica do rio Tocantins-Araguaia	42
4.2.1. Relevo da bacia.....	46
4.2.2. Tipos de solos	47
4.2.3. Aspectos climáticos	49
4.2.4. Usinas Hidrelétricas do estudo	50
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1. Pré-processamento do MGB-IPH	53
5.1.1. Dados espaciais	53
5.1.2. Unidades de Resposta Hidrológica (URHs)	54
5.1.3. Dados fluviométricos e pluviométricos.....	56
5.1.4. Dados climatológicos	59
5.1.5. Vazões observadas.....	60
5.1.6. Parâmetros e calibração do modelo	62
5.2. Calibração do Modelo	63

5.2.1.	Calibração das sub-bacias sem o Qsubst	63
5.2.2.	Calibração das sub-bacias UHE Cana Brava e UHE São Salvador com o Qsubst 66	
5.2.3.	Cálculo da vazão incremental entre aproveitamentos com suporte do Qsubst...	69
5.2.4.	Validação dos parâmetros calibrados	70
5.3.	Discussão dos Resultados	71
6.	CONCLUSÕES	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
	ANEXO A - METODOLOGIA MGB-IPH	80
	ANEXO B – ARTIGO SUBMETIDO EM REVISTA CIENTÍFICA	95

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade e a variabilidade dos recursos hídricos desempenham um papel central na matriz energética brasileira, fortemente dependente da geração hidrelétrica. A operação eficiente dessas usinas exige um planejamento cuidadoso, que considere tanto os cenários de abundância quanto os de eventos extremos. Em especial, as cheias podem representar riscos significativos à segurança das estruturas e à continuidade da geração de energia, exigindo mecanismos de previsão e resposta rápida por parte dos operadores do sistema. Nesse contexto, as bacias hidrográficas assumem papel estratégico, pois é nelas que ocorrem os principais processos que regulam a disponibilidade e o movimento da água.

Entre as bacias de maior relevância, destaca-se a do Rio Tocantins, uma das maiores do Brasil e responsável por abrigar importantes usinas hidrelétricas que contribuem significativamente para a produção energética nacional. A operação segura e eficiente dessas usinas depende diretamente da capacidade de antecipar variações de vazão, principalmente em períodos de cheias. Para enfrentar esse desafio, a utilização e o ajuste de modelos hidrológicos visando à previsão de vazões têm se consolidado como uma alternativa eficaz e estratégica, pois possibilitam identificar com antecedência situações críticas e adotar medidas preventivas que preservem a integridade das estruturas e a continuidade da geração de energia.

O Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH), desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), é uma ferramenta capaz de simular o comportamento hidrológico de bacias de grande porte, integrando dados climáticos, topográficos e de uso do solo. Contudo, a eficácia das previsões depende fortemente de um ajuste criterioso do modelo, que considere a qualidade e a representatividade de todos os dados de entrada, desde séries históricas de precipitação e vazão até informações atualizadas sobre uso e cobertura do solo. Um ajuste bem executado permite calibrar parâmetros de forma realista, reduzindo incertezas e aumentando a confiabilidade das estimativas.

Diante disso, esta pesquisa propõe o ajuste do MGB-IPH para aplicação na bacia do Rio Tocantins, com foco na previsão da vazão nas usinas hidrelétricas de Cana Brava e São Salvador durante períodos de cheias. O estudo envolve uma análise detalhada das características hidrológicas da bacia, dos padrões de escoamento e da dinâmica dos

reservatórios, com o objetivo de configurar e calibrar o modelo de forma adequada, preparando-o para futuras simulações e aplicações operacionais.

Os resultados obtidos a partir deste estudo têm o potencial de subsidiar estratégias mais seguras e eficientes de operação das usinas hidrelétricas. O ajuste correto do modelo, incorporando todas as variáveis relevantes e refletindo fielmente as condições reais da bacia, é essencial para garantir previsões robustas, reduzir riscos operacionais e manter a geração contínua de energia durante situações críticas, reforçando sua importância para a confiabilidade e segurança do sistema elétrico brasileiro.

2. OBJETIVOS

2.1.Geral

Realizar o ajuste do Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH) na bacia do Rio Tocantins, visando à previsão de vazões nas usinas hidrelétricas de Cana Brava e São Salvador durante períodos de cheias, de modo a subsidiar a operação segura e eficiente dessas usinas.

2.2.Específicos

- Caracterizar as principais variáveis hidrológicas e climáticas da bacia do Rio Tocantins que influenciam os regimes de vazão;
- Organizar, tratar e integrar os dados hidrometeorológicos, topográficos e de uso e cobertura do solo necessários para a configuração do modelo;
- Realizar o ajuste e a calibração do MGB-IPH para o trecho da bacia de interesse;
- Avaliar e consolidar o processo de configuração e ajuste do modelo;
- Comparar os resultados obtidos com evidências de outros estudos desenvolvidos em grandes bacias brasileiras, de modo a verificar a consistência e a aplicabilidade do modelo em diferentes contextos hidrológicos.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Caracterização das usinas hidrelétricas no Brasil

O Brasil possui um parque hidrelétrico robusto, composto por mais de 1.400 usinas em operação distribuídas ao longo de diferentes bacias hidrográficas (ANEEL, 2025). Essas usinas representam a maior parcela da matriz elétrica do país, sendo responsáveis por aproximadamente 60% da energia gerada, garantindo eletricidade contínua e confiável para o Sistema Interligado Nacional (SIN), conforme registrado pelo ONS (2022). A Figura 1 ilustra a distribuição geográfica das principais hidrelétricas em todo o território nacional.



Figura 1 – Distribuição das usinas hidrelétricas no Brasil
Fonte: ONS (2025)

As usinas hidrelétricas podem ser classificadas de acordo com seu porte e capacidade de armazenamento. As UHEs de grande porte, com reservatórios significativos, desempenham papel estratégico no suprimento de energia, permitindo a geração de base, o controle de cheias e a regulação das vazões a jusante. Já as usinas de

pequeno e médio porte, muitas vezes com operação fio d'água, contribuem principalmente com energia complementar e aproveitamento local de recursos hídricos.

Em termos de operação, algumas usinas possuem reservatórios plurianuais, permitindo o armazenamento de grandes volumes de água para regular a geração ao longo do ano, enquanto outras possuem operação limitada, com reservatórios menores e pouca capacidade de regulação (ANA, 2020). A distribuição dessas usinas segue uma lógica de aproveitamento da topografia e hidrologia das bacias, com a instalação em cascata em rios de grande potencial hídrico, como ocorre na bacia do Rio Tocantins.

Além da capacidade instalada, as hidrelétricas desempenham papel central na matriz energética brasileira, fornecendo eletricidade de forma contínua e confiável, complementando a geração de fontes térmicas, eólicas e solares, e garantindo flexibilidade operacional para atender à demanda energética do país (ONS, 2024; EPE, 2023).

Os dados de potência, volume de reservatórios e capacidade de regulação variam significativamente entre os empreendimentos, refletindo a diversidade de projetos e objetivos estratégicos de cada usina, desde o abastecimento regional até a operação coordenada de grandes sistemas. Essa caracterização é fundamental para o planejamento energético, definição de regras de operação e integração ao SIN (ONS, 2024).

3.2.Regime operacional e controle de cheias de usinas hidrelétricas

Em atendimento ao Sistema Interligado Nacional (SIN), se torna fundamental o planejamento e programação da operação das usinas instaladas e operantes no país. Para auxiliar nessa tarefa, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) que centraliza a operação, realiza um plano de operação, para cada instante, determinando a geração para cada unidade geradora de tal forma que a demanda seja atendida a um custo mínimo.

A operação hidráulica de reservatórios de usinas hidrelétricas deve seguir os seguintes princípios fundamentais: (1) garantir a segurança da barragem; (2) não causar eventos mais críticos na área de influência do que aqueles que seriam observados em condições naturais; e (3) mitigar efeitos danosos na área de influência (BUBA *et al.*, 2011).

O ajuste da operação individual para a operação coordenada depende das características da bacia, do projeto de inundação e das cheias históricas. Em um sistema

de reservatórios, geralmente, a regra de operação é desenvolvida a partir de cada empreendimento operado como unidade separada (USACE, 1987).

A variação do nível ou de vazão de um rio depende das características climatológicas e físicas da bacia hidrográfica, caracterizando-a como um fenômeno aleatório, que apresenta, para cada magnitude, um determinado risco de ser igualado ou superado.

De acordo com Mees (2020), o efeito que a variação do amortecimento de um reservatório causa no hidrograma em um curso é o de restringir a vazão a jusante do barramento, e como consequência do ingresso de uma vazão maior que a de saída ocorre o enchimento do volume disponível do reservatório para amortecimento da cheia (volume de espera). Com isto, o pico de vazão é reduzido em detrimento de um aumento do tempo de escoamento do mesmo volume de água que passaria naturalmente pela seção do barramento, conforme Figura 2.

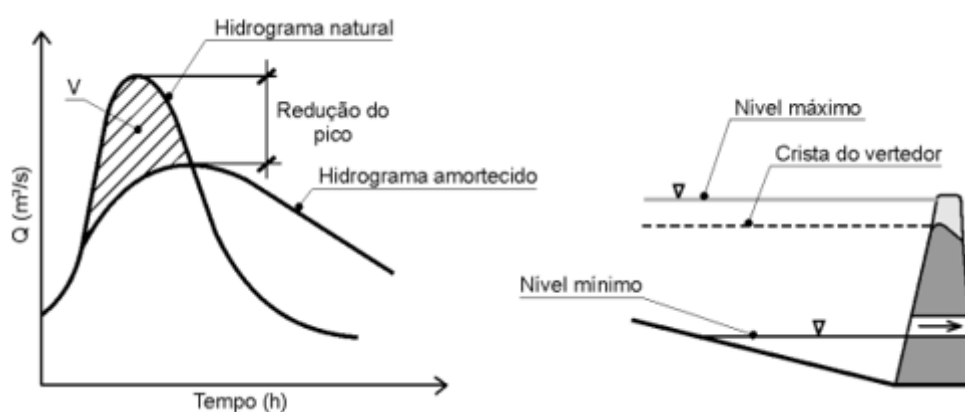


Figura 2 - Efeito do reservatório no amortecimento de cheia
Fonte: Tucci (2009)

Os reservatórios para controle de cheias podem ser operados, ou seja, pode-se controlar o volume de água armazenada por meio de abertura ou fechamento de comportas dos vertedouros.

Em relação às regras de operação dos reservatórios, existem diversas delas e as mais usadas são aquelas que incluem a divisão do volume útil do reservatório em várias “zonas” que possuem políticas de descargas específicas. A distribuição do volume útil do reservatório nessas zonas pode ser constante ao longo do ano, ou pode variar de forma sazonal.

A Figura 3 apresenta um esquema particular de subdivisão em zonas, de um reservatório com dois usos predominantes: a geração de energia e o controle de cheias. Essas regras de operação são chamadas de curvas-guia e definem as vazões efluentes, ao longo do ano, em função do volume do reservatório (BRAVO, 2010).



Figura 3 - Curvas-Guia de reservatório de múltiplos usos
Fonte: Bravo (2010)

Segundo Bravo (2010), se o nível da água do reservatório se encontra acima da “curva-guia para controle de cheias”, são atendidas as demandas de geração de energia em 100% do tempo, podendo existir um excedente de energia que deve ser exportado. Ainda, são necessários vertimentos para levar o armazenamento ao nível definido por essa curva-guia. Dessa forma, é assegurado o chamado volume de espera para amortecer futuras cheias. Caso o nível da água esteja na Zona 1, a demanda de energia é atendida e os vertimentos não são necessários.

Quando se encontrar na Zona 2, a demanda de energia não pode ser atendida, exclusivamente, com geração hidrelétrica e, em consequência, são necessárias fontes complementares de geração de energia. Já na Zona 3, a utilização conjunta de geração hidrelétrica e de geração térmica não é suficiente para o atendimento da demanda, necessitando da importação de energia de outros sistemas.

Finalmente, se o armazenamento estiver na Zona 4, não existe geração hidrelétrica e o atendimento da demanda dependerá da capacidade de geração das usinas térmicas e da disponibilidade de energia para importação desde outros sistemas, podendo ocorrer racionamento de energia.

Referente a regulação ótima do reservatório, isso depende de requisitos de montante e de jusante. As defluências dependem das restrições hidráulicas em determinados pontos. O controle da cheia depende do tempo de propagação causada pelo armazenamento no rio e das vazões incrementais entre os reservatórios e os pontos de controle. A simulação do escoamento e das regras de operação do reservatório facilita a procura da melhor maneira de operar cada reservatório (YEH, 1985).

Para assegurar uma operação controlada e segura, existem diversas restrições operacionais que as usinas hidrelétricas devem cumprir para evitar impactos nas instalações, na sociedade e no meio ambiente. Muitas dessas usinas são equipadas com grandes reservatórios de armazenamento plurianual, conhecidos como reservatórios de regulação plurianual.

As usinas hidrelétricas (UHEs) escolhidas para compor os sistemas de único reservatório foram Furnas, no Rio Grande e Emborcação, no Rio Paranaíba, subsistema Sudeste/Centro-Oeste (SE/CO), Sobradinho, no Rio São Francisco, subsistema Nordeste (NE), Serra da Mesa, no Rio Tocantins, subsistema Norte (NO), e Foz do Areia, no Rio Iguaçu, subsistema Sul (S). Em cada sistema considerou-se a presença de uma única usina termelétrica (UTE) com capacidade instalada igual à da UHE (ZAMBELLI, 2006).

Na Tabela 1, estão apresentados os dados de potência instalada, volume útil dos reservatórios, defluência mínima e engolimento efetivo de UHEs que compõem os sistemas de único reservatório.

Tabela 1 – Dados dos sistemas com uma UHE				
UHE	Potência Instalada (MW)	Volume Mínimo / Máximo (hm ³)	Defluência Mínima / Engolimento Efetivo (m ³ /s)	Volume Útil (hm ³)
Furnas	1.312	5.733 / 22.950	196 / 1.692	17.217
Emborcação	1.192	4.669 / 17.725	100 / 1.048	13.056
Sobradinho	1.050	5.447 / 34.116	1.300 / 4.278	28.669
Serra da Mesa	1.200	11.150 / 54.400	98 / 1.212	43.250
Foz do Areia	1.676	1.974 / 5.779	79 / 1.376	3.805

Fonte: Zambelli (2006)

Essas usinas são consideradas de caráter estratégico para a regularização de vazões dos rios que se encontram e para o SIN. Na Figura 4 está exemplificado a função dos reservatórios no efeito da regularização das vazões.

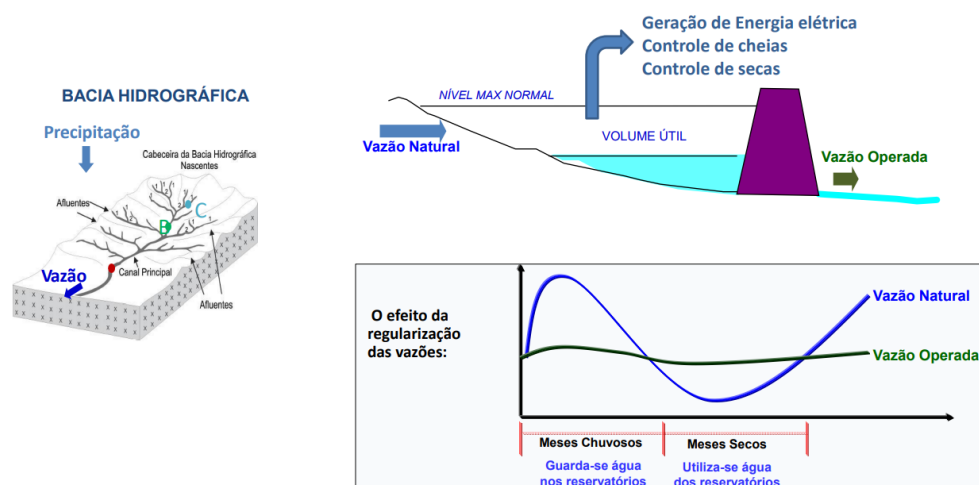


Figura 4 - Função dos reservatórios na regularização das vazões
Fonte: ONS (2022)

A Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa, como exemplo, desempenha um papel crítico na regulação do sistema, impactando toda a cascata de usinas. Em conformidade com a Resolução ANA nº 70, datada de 19 de abril de 2021, foram estabelecidos parâmetros de operação para o reservatório.

Durante o período de operação especial do reservatório de Serra da Mesa, a vazão de saída deve ser mantida constante, independentemente de qualquer alteração nos parâmetros de operação, e a operação das usinas hidrelétricas rio abaixo deve ser conduzida de forma a minimizar quaisquer flutuações resultantes de mudanças nas vazões entre os reservatórios da cascata.

Dessa forma, a função de reservatórios como o de Serra da Mesa, é suavizar as flutuações anuais nas afluições, aumentando os fluxos de água durante períodos secos e armazenando-a durante as estações chuvosas. Isso tem como objetivo tornar a distribuição da água disponível para geração de energia ao longo do ano o mais uniforme possível.

A capacidade de armazenamento dos reservatórios durante a estação chuvosa desempenha um papel essencial na garantia de uma produção de energia estável e eficiente durante todo o ano, contribuindo para o suprimento de eletricidade na região e além.

No âmbito de otimização de toda essa operação, diferentes modelos de otimização e simulação tem sido utilizado para definir as regras de operação de reservatórios. Os modelos hidrológicos simulam o comportamento da bacia hidrográfica levando em

consideração a precipitação, evaporação, escoamento e outros fatores para prever as vazões de entrada ao longo do tempo e auxiliar nas tomadas de decisão e na operação em tempo real, para prever condições futuras e tomar decisões de operação.

O ONS emprega uma série de modelos de otimização energética, como o NEWAVE, DECOMP e DESSEM, no planejamento e programação da operação, conforme ilustrado na Figura 5. Esses modelos, desenvolvidos pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), são essenciais para estabelecer políticas e diretrizes operacionais em diferentes períodos de planejamento (CEPEL, 2023).



Figura 5 - Cadeia de modelos desenvolvida pelo CEPEL
Fonte: ONS (2016)

O objetivo da cadeia de modelos é minimizar o custo total da operação do SIN, levando em conta o custo imediato, custo futuro e custo de não atendimento à carga, ou custo de déficit. Em resumo:

- NEWAVE: Utilizado nos estudos de planejamento da etapa de médio prazo. Percorre os cenários hidrológicos para o horizonte de cinco anos.
- DECOMP: Utilizado no programa mensal da operação. Estabelece metas e diretrizes energéticas de curto prazo.
- DESSEM: Utilizado na programação diária, com intervalos de até meia-hora e horizonte de curtíssimo prazo.

Buscar o máximo aproveitamento da energia hidroelétrica é economicamente vantajoso, evitando custos com combustíveis. No entanto, isso aumenta o risco de déficits futuros devido à incerteza nas chuvas e afluências. Manter reservatórios em níveis

elevados garante confiabilidade, mas implica custos extras com geração térmica e desperdício de água. Portanto, equilibrar essas estratégias é essencial para otimizar a operação hidrelétrica.

3.3. Modelos de previsão de vazões

A previsão hidrológica é uma ferramenta essencial para a gestão de recursos hídricos, planejamento de reservatórios e operação de usinas hidrelétricas. Ela permite estimar vazões e níveis de reservatórios, antecipando eventos críticos como cheias ou períodos de estiagem, o que é especialmente importante em bacias com alta variabilidade sazonal, como as brasileiras. Diversos tipos de modelos têm sido desenvolvidos, cada um com suas características, vantagens e limitações.

3.3.1. Modelos determinísticos

Modelos determinísticos são baseados em equações físicas que descrevem os processos hidrológicos fundamentais, incluindo precipitação, infiltração, escoamento superficial e subsuperficial. Eles permitem simular de forma detalhada o comportamento de uma bacia hidrográfica em diferentes cenários.

- **HEC-HMS (Hydrologic Modeling System):** Desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers, é capaz de simular hidrogramas de escoamento em bacias de diferentes escalas. Ele permite modelar processos de armazenamento, transformação chuva-vazão e transporte de água, sendo amplamente utilizado em estudos de planejamento de drenagem urbana e operação de reservatórios (FEMA, 2015).
- **GSSHA (Gridded Surface/Subsurface Hydrologic Analysis):** Este modelo integra simultaneamente hidrologia superficial e subsuperficial, transporte de sedimentos e processos de erosão. Sua estrutura em grade permite simular detalhadamente o comportamento espacial de bacias complexas, sendo útil para análises ambientais e de impacto de obras hidráulicas (DOWNER & OGDEN, 2006).
- **MGB-IPH (Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas):** Este modelo é determinístico e distribuído, projetado especificamente para grandes bacias brasileiras. Ele divide a bacia em mini-bacias e unidades de resposta hidrológica (URHs), permitindo simular detalhadamente o escoamento superficial, subsuperficial e a propagação da onda de cheia pelos rios.

O MGB utiliza métodos como Muskingum-Cunge ou inercial para o transporte da água e pode reproduzir hidrogramas em múltiplos pontos da bacia, sendo uma ferramenta estratégica para planejamento e operação de sistemas hídricos (PONTES *et al.*, 2015).

3.3.2. Modelos estocásticos

Os modelos estocásticos utilizam séries históricas de dados hidrológicos e técnicas probabilísticas para gerar previsões de vazão, considerando a variabilidade natural do sistema. Eles são úteis quando os dados observacionais são limitados ou quando se deseja avaliar cenários de incerteza.

- **PREVIVAZ (CEPEL):** Este sistema fornece previsões semanais de vazões afluentes aos reservatórios do Sistema Interligado Nacional, sendo uma ferramenta essencial para a operação segura das usinas hidrelétricas. Ele combina análises históricas e modelos de previsão probabilística para gerar cenários confiáveis (CEPEL, 2015).
- **Extended Streamflow Prediction (ESP):** Baseado em dados históricos de precipitação e vazão, o ESP gera múltiplos cenários futuros de fluxo, permitindo planejamento de longo prazo, avaliação de riscos de cheias e estiagens, e suporte à decisão para operadores de reservatórios (GAREN, 1992).

3.3.3. Modelos baseados em inteligência artificial

Modelos de inteligência artificial (IA) têm ganhado destaque nos últimos anos por sua capacidade de capturar relações não lineares complexas entre variáveis hidrológicas e climáticas, mesmo em bacias com comportamento hidrológico irregular ou dados incompletos.

- **Redes Neurais Artificiais (RNAs):** São capazes de aprender padrões a partir de dados históricos e gerar previsões de vazão em curto prazo com boa acurácia.
- **Redes Neurais Recorrentes (RNN) e LSTM:** Modelos avançados que consideram dependências temporais de séries históricas, permitindo prever eventos extremos, como cheias repentinas, com maior confiabilidade (MOSAVI *et al.*, 2018).

A escolha do modelo mais adequado depende do objetivo da previsão, da escala da bacia, da disponibilidade e qualidade dos dados, e das características hidrológicas da

região. Modelos determinísticos como o MGB-IPH são fundamentais para capturar a distribuição espacial e temporal do escoamento em grandes bacias. Ajustes precisos dos parâmetros do modelo são essenciais para garantir a confiabilidade das previsões, especialmente em regiões sujeitas a eventos extremos. A combinação de diferentes abordagens, integrando modelos determinísticos, estocásticos e baseados em inteligência artificial, aumenta a robustez e a precisão das previsões hidrológicas, fornecendo suporte essencial à gestão e operação de recursos hídricos.

3.4. Previsão de vazões

A gestão dos recursos hídricos em usinas hidrelétricas envolve o controle e a otimização da operação dos reservatórios, bem como a garantia da segurança das instalações e a manutenção da produção contínua de energia elétrica. Nesse contexto, a previsão de vazão desempenha um papel fundamental, uma vez que permite antecipar as variações na vazão do rio e adotar medidas preventivas para lidar com diferentes cenários hidrológicos.

A previsão de vazão é uma ferramenta crucial na gestão dos recursos hídricos, especialmente no contexto das usinas hidrelétricas. Ela fornece informações antecipadas sobre a quantidade de água que irá fluir em um determinado ponto de uma bacia hidrográfica, permitindo que os gestores dessas usinas tomem decisões informadas e estratégicas.

A hidrologia é a ciência que estuda o ciclo hidrológico, incluindo os processos de captação, armazenamento e liberação da água. Ela fornece os fundamentos teóricos e metodológicos para entender a disponibilidade e a distribuição dos recursos hídricos em uma bacia hidrográfica, bem como suas interações com o ambiente e os usos humanos (CHAUVIN *et al.*, 2011).

A relação entre chuva e vazão é um fator fundamental na previsão hidrológica, uma vez que a chuva desempenha um papel crucial nos processos hidrológicos. As precipitações pluviométricas são responsáveis pelo abastecimento de água nas bacias hidrográficas e têm um impacto direto sobre o volume de água disponível para a geração de energia nas usinas hidrelétricas. Assim, compreender e modelar a relação entre chuva e vazão é essencial para obter previsões precisas e confiáveis (COLLISCHONN *et al.*, 2011).

No contexto das usinas hidrelétricas, a previsão hidrológica desempenha um papel crucial na gestão eficiente dos reservatórios. Ela permite aos gestores antecipar mudanças nas condições hidrológicas, como cheias e estiagens, e ajustar a operação dos reservatórios de acordo com essas previsões (MOORE, 2010).

A utilização de modelos hidrológicos é uma abordagem comum na previsão de vazão em bacias hidrográficas e na gestão de usinas hidrelétricas. Esses modelos representam matematicamente os processos hidrológicos que ocorrem na bacia, como precipitação, evapotranspiração, infiltração e escoamento. Eles são alimentados com dados observados e informações sobre as características da bacia, como topografia, uso do solo e cobertura vegetal, e são capazes de simular o comportamento hidrológico e prever a vazão em diferentes pontos da bacia (BEVEN, 2012). Ao fornecer informações antecipadas sobre a vazão do rio, esses modelos permitem ajustar a operação dos reservatórios, controlar o fluxo de água e minimizar riscos relacionados a eventos extremos, como cheias e estiagens (VERGARA *et al.*, 2018).

Dessa forma, a previsão de vazão e a aplicação de modelos hidrológicos na gestão dos recursos hídricos de usinas hidrelétricas são fundamentais para garantir uma operação segura, eficiente e sustentável desses empreendimentos. Essas ferramentas permitem antecipar as condições hidrológicas, tomar decisões informadas e otimizar a produção de energia, levando em consideração a disponibilidade dos recursos hídricos e a preservação do meio ambiente.

3.4.1. Aplicações de modelos de previsão de vazões

Diversos trabalhos têm demonstrado a importância da aplicação de modelos de previsão de vazões como ferramenta de suporte à operação de Usinas Hidrelétricas (UHEs), permitindo avaliar a viabilidade técnica e operacional de diferentes cenários hidrológicos. Esses modelos possibilitam antecipar variações na vazão dos rios, subsidiando decisões estratégicas para a operação segura dos empreendimentos, especialmente em eventos críticos como as cheias. Para que essas previsões sejam confiáveis, é fundamental que o modelo seja corretamente ajustado e calibrado, incorporando todas as variáveis relevantes da bacia

O trabalho de Felix e Paz (2016) trouxe uma representação dos processos hidrológicos na bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. O modelo conseguiu reproduzir o comportamento geral do hidrograma

observado diário e mensal, com métricas equivalentes às obtidas em estudos de bacias de rios perenes realizados com o mesmo modelo. Duas dificuldades principais foram a simulação dos maiores eventos de cheia e da intermitência do rio. Os processos hidrológicos intermediários à transformação chuva-vazão (evapotranspiração, armazenamento de água no solo e geração de escoamento) se mostraram coerentes em termos de sazonalidade, magnitude e distribuição espacial na bacia.

Pontes *et al.* (2015) apresentaram uma proposta de uma nova versão do modelo hidrológico MGB-IPH, em que o módulo de propagação de vazões na rede de drenagem, originalmente baseado no método Muskingum-Cunge, é substituído pelo método inercial. Os resultados mostraram que utilizando o método inercial, o modelo MGB-IPH representa melhor os efeitos de atenuação da onda de cheia do que utilizando o método Muskingum-Cunge. Os mapas de inundação calculados pelo modelo MGB-IPH com o método de propagação inercial foram comparados com imagens do sensor MODIS, mostrando que é possível representar, em escala regional, grandes regiões inundáveis como a Ilha do Bananal, mesmo sem dados detalhados de seções transversais e de topografia.

Fan *et al.* (2017) desenvolveram uma avaliação das previsões operacionais de cheias da bacia do alto rio Uruguai. O sistema desenvolvido foi operado todos os dias para fornecer previsões experimentais com especial interesse para a vazão dos reservatórios das hidrelétricas de Barra Grande e Campos Novos, com 10 dias de antecedência. Os resultados das previsões, por análise de métricas visuais e de desempenho, mostraram um bom ajuste com as observações na maioria dos casos, com possibilidade de ocorrência de inundações ser bem prevista com antecedência de 2 a 3 dias. Comparando as localizações, notou-se que a sub-bacia de Campos Novos, por ser mais lenta na transformação chuva-vazão, é mais fácil de prever.

No estudo de Paiva *et al.* (2014), que aplicaram o MGB-IPH na bacia do rio Ji-Paraná (RO), foram obtidos bons valores de eficiência de Nash-Sutcliffe e baixo erro de volume, demonstrando que o modelo foi capaz de representar a sazonalidade e a magnitude das vazões em diferentes trechos do rio. De forma semelhante, no trabalho de Embrapa (2019) sobre a bacia do Alto Teles Pires (MT), a calibração e validação mostraram que tanto os eventos de cheia quanto os períodos de estiagem foram bem reproduzidos, com coeficientes de desempenho considerados satisfatórios e adequada correspondência entre os hidrogramas simulados e observados.

Assim como os trabalhos anteriormente referenciados, o presente estudo visa contribuir para o avanço do conhecimento relacionado ao desempenho de modelos de previsão de vazões, com foco na viabilidade operacional das técnicas aplicadas, na adequação dos dados utilizados e na correta configuração do modelo em bacias com características similares, como é o caso da bacia do rio Tocantins.

4. METODOLOGIA

A metodologia adotada nesta dissertação envolve uma análise abrangente da hidrologia da Bacia do Rio Tocantins. De acordo com a Figura 6 - Metodologia de análise hidrológica da Bacia do Rio Tocantins os principais elementos incluem a utilização do modelo MGB-IPH para o ajuste e configuração de sua estrutura ao trecho da bacia estudado, a seleção e preparação das informações necessárias para a modelagem, a coleta e o processamento de dados hidrometeorológicos, além da análise das características específicas da bacia.



Figura 6 - Metodologia de análise hidrológica da Bacia do Rio Tocantins
Fonte: Própria autora (2025)

Os dados hidrológicos e meteorológicos foram obtidos do sistema Hidroweb da ANA, complementados por estimativas do produto IMERG (NASA/JAXA) para preencher lacunas pluviométricas. Informações climatológicas médias foram obtidas das Normais Climatológicas do INMET, e as séries de vazão das usinas foram extraídas do portal da ANA. Esses dados permitiram a calibração do MGB-IPH, ajustando os parâmetros hidrológicos às características das URHs e da bacia, garantindo uma modelagem consistente para aplicações operacionais e de gestão hídrica.

4.1. Modelo MGB-IPH

O Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH) é uma ferramenta hidrológica amplamente reconhecida, desenvolvida pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), que

desempenha um papel essencial na gestão eficiente dos recursos hídricos e na operação de sistemas de energia hidrelétrica. O MGB-IPH é destacado por sua capacidade de considerar múltiplos processos hidrológicos, incluindo o escoamento superficial, sub-superficial e subterrâneo, proporcionando uma visão abrangente do ciclo hidrológico em uma bacia (COLLISCHONN, 2001). Mais detalhes sobre a modelagem e os parâmetros utilizados estão disponíveis no ANEXO A - METODOLOGIA MGB-IPH.

Uma das características notáveis do MGB-IPH é sua capacidade de incorporar dados climáticos, topográficos, de uso do solo e hidrológicos para simular o comportamento de variáveis hidrológicas em uma bacia. Esses dados são essenciais para alimentar o modelo, tornando-o capaz de prever a vazão dos rios, os níveis de água nos reservatórios, a evapotranspiração e outros aspectos cruciais para a gestão de recursos hídricos (SILVA *et al.*, 2018).

Seguindo alguns critérios, grandes bacias hidrográficas se enquadram através de:

- Regiões geralmente maiores do que 1000 km²;
- Regiões onde os processos de propagação fluvial não podem ser negligenciados, ou seja, onde o tempo de viagem da água na rede de drenagem (tempo de concentração) é elevado, normalmente superior a 10 a 24 horas, de modo que os processos de translação e atenuação das ondas de cheia sejam relevantes para a compreensão das dinâmicas da bacia;
- Regiões onde a diferença entre os divisores de água superficial e subterrânea pode ser desprezada;
- Regiões onde a chuva e outras características como tipo e uso de solo não podem ser consideradas homogêneas em toda a área, e por isto os métodos clássicos de hidrologia não são adequados;
- Regiões onde a caracterização do terreno é difícil de ser realizada com medições puramente *in-situ*, sendo necessário o apoio de técnicas de SIG e sensoriamento remoto.

A calibração do modelo é uma etapa crucial para aprimorar a precisão das previsões. Através da calibração, os parâmetros do MGB-IPH são ajustados para minimizar as diferenças entre as previsões do modelo e os dados observados, tornando-o mais confiável para a tomada de decisões na gestão de recursos hídricos. Durante a calibração, os parâmetros são ajustados continuamente, com acompanhamento por meio

da comparação visual entre os hidrogramas simulados e observados, assegurando que o modelo se adeque às particularidades da bacia estudada.

4.1.1. Estrutura do modelo

No MGB-IPH, atualmente, é empregada a técnica de discretização da bacia em unidades irregulares. Essas unidades são delimitadas com base em informações topográficas obtidas através de um Modelo Digital de Elevação (MDE) e são chamadas de minibacias. O procedimento de dividir a área em porções menores é denominado discretização da bacia hidrográfica, representando uma fase essencial na implementação do modelo hidrológico distribuído. Além disso, essa discretização pode ser subdividida em sub-bacias, que representam macro áreas de drenagem abrangendo várias minibacias (FAN, 2013).

A Tabela 2 a seguir oferece um resumo do método de subdivisão de bacia hidrográfica adotado no MGB-IPH.

Tabela 2 - Esquema de subdivisão da bacia hidrográfica adotado no MGB-IPH	
Unidade	Descrição
Bacia Hidrográfica	Região hidrográfica de estudo simulada pelo modelo.
Sub-bacia Hidrográfica	Subdivisão da bacia hidrográfica de estudo em grandes áreas de drenagem.
Minibacia Hidrográfica	Subdivisão das sub-bacias hidrográficas em pequenas regiões. São formadas pela área de drenagem de cada trecho de rio.
Trecho de Rio	Feição que representa a hidrografia compreendida entre duas confluências ou entre uma confluência e uma nascente.

Fonte: Fan (2013)

As minibacias também passam por uma subdivisão em Unidades de Resposta Hidrológica (URH), que representam áreas com comportamento hidrológico semelhante. Acredita-se que esse comportamento das URHs possa ser atribuído a características físicas relacionadas ao solo e à cobertura vegetal (FAN, 2013).

Dessa maneira, as URHs são frequentemente delimitadas utilizando uma sobreposição de dois mapas distintos da mesma região: 1) um mapa dos tipos de solo; 2) um mapa de uso do solo. Adicionalmente, outras informações, como a topografia local, também podem ser levadas em consideração.

A estrutura do modelo mencionado no desenvolvimento deste trabalho é inspirada pela configuração do modelo LARSIM, que foi introduzido por Bremicker (1998), mas

com algumas modificações adaptativas. O componente original de balanço de água no solo do modelo LARSIM foi simplificado, enquanto o módulo de evapotranspiração foi desenvolvido com base nas obras de Shuttleworth (1993) e Wigmosta *et al.* (1994). Além disso, a metodologia Muskingum-Cunge, conforme descrita por Tucci (1998), foi empregada no módulo responsável pelo escoamento na rede de drenagem.

O modelo é composto dos seguintes algoritmos:

- a) balanço de água no solo;
- b) escoamentos: superficial, sub-superficial e subterrâneo na célula;
- c) evapotranspiração;
- d) escoamento na rede de drenagem.

A bacia hidrográfica é subdividida em células quadradas ligadas entre si através de canais de drenagem, conforme mostrada na Figura 7. Recomenda-se um tamanho aproximado de 10 x 10 km para as células.

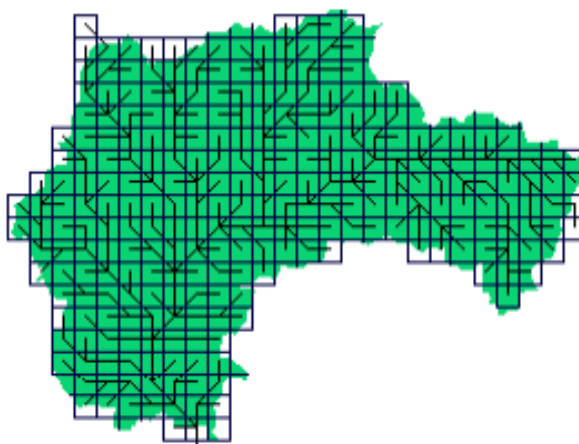


Figura 7 - Bacia discretizada em células ligadas entre si por canais de drenagem

Fonte: Collischonn (2001)

Dentro de cada célula, estão presentes blocos representando diferentes usos do solo (Figura 8), sem levar em consideração a localização específica dentro da célula.

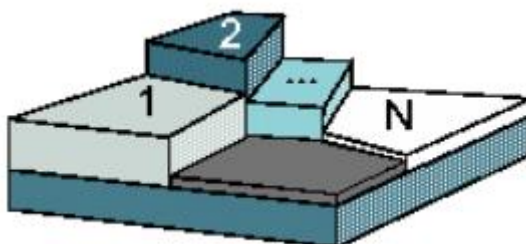


Figura 8 - Célula do modelo dividida em N blocos de uso, tipo e cobertura do solo

Fonte: Adaptado de Liang *et al* (1994)

O número de blocos de uso é selecionado com base na quantidade de grupos resultantes da interseção das características de uso do solo, cobertura vegetal e tipo de solo. Cada bloco é definido por um conjunto de parâmetros, incluindo o armazenamento máximo no solo e o índice de área foliar (IAF) da vegetação.

Os dois primeiros módulos ou algoritmos do modelo (balanço hídrico no solo e evapotranspiração) operam em cada bloco dentro de cada célula e o terceiro módulo (escoamento na célula) trata do fluxo horizontal interno na célula, direcionando-o até a rede de drenagem, enquanto o quarto módulo diz respeito ao fluxo horizontal ao longo da referida rede, conforme está descrito no **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

As variáveis meteorológicas (precipitação, temperatura, umidade relativa, insolação, velocidade do vento e pressão atmosférica) em uma célula são obtidas por meio da interpolação dos dados dos postos mais próximos. Até o momento, as funções interpoladoras utilizadas incluem: 1) Thiessen (vizinho mais próximo) e 2) o inverso do quadrado da distância (COLLISCHONN; TUCCI, 2001).

A preparação dos dados de entrada, os processos e resultados do modelo são resumidos na Figura 9 a seguir.

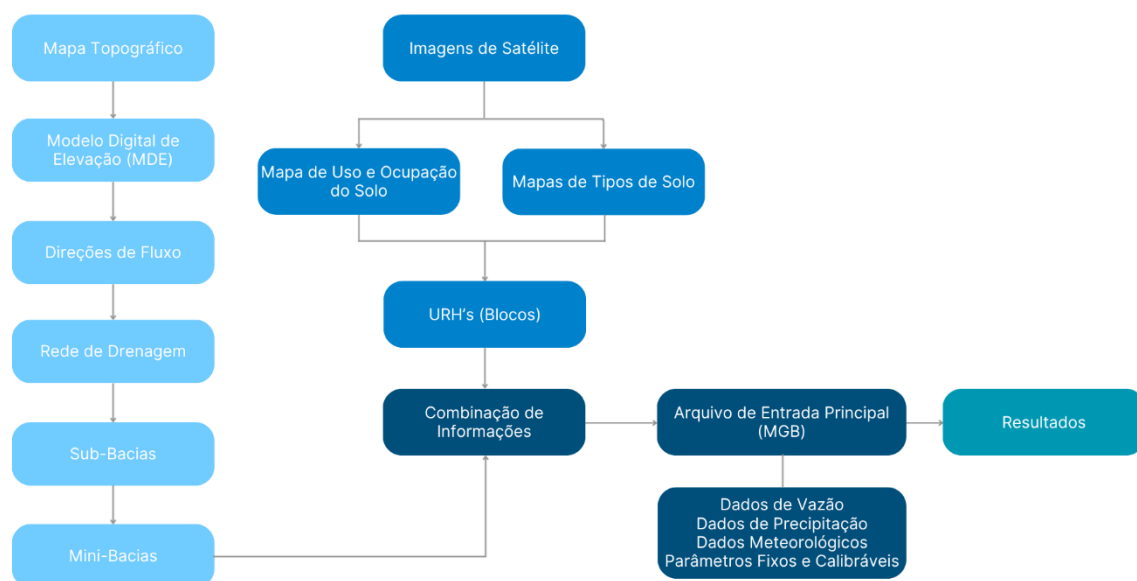


Figura 9 - Fluxograma da aplicação do modelo MGB-IPH em relação aos dados de entrada

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2016)

A metodologia para geração das previsões de precipitações consiste em alimentar o modelo hidrológico MGB-IPH com um conjunto de previsões meteorológicas oriundas de saídas de diferentes modelos de previsão numérica, com diferentes condições iniciais e parametrizações.

4.1.2. Preparação dos dados de entrada

Modelos distribuídos lidam com uma grande quantidade de dados, o que pode complicar seu tratamento. As informações de entrada, oriundas de fontes como imagens de satélite e modelos digitais de terreno, são variadas. O uso de um SIG (Sistema de Informações Geográficas) é praticamente necessário para processar esses dados, mesmo que a simulação não ocorra diretamente dentro desse sistema (BURROUGH, 1986).

Boa parte do trabalho de preparação de dados é o processamento de imagens de sensoriamento remoto e de arquivos georreferenciados, porém nem todas as funções necessárias para a execução deste processamento estão disponíveis em programas comerciais de SIG.

Para o tratamento e classificação de imagens e para operações simples com planos de informação, é utilizado o programa IDRISI (EASTMAN, 1995) para o tratamento e classificação de imagens e para operações simples com planos de informação. Para outras etapas do processamento de dados georreferenciados foram desenvolvidos programas específicos ou aperfeiçoadas rotinas já utilizadas pelos autores (COLLISCHONN *et al.*, 1999), não disponíveis na versão do IDRISI utilizada.

Os dados utilizados pelo modelo, como imagens de sensoriamento remoto classificadas e modelos numéricos do terreno (MNT), estão disponíveis, normalmente, com uma resolução espacial superior àquela utilizada no modelo (Figura 10). Por exemplo, enquanto o modelo utiliza células de 10 x 10 km, aproximadamente, as imagens LANDSAT TM estão disponíveis em resolução de 30 x 30 m, e o MNT disponibilizado pela Agência Atmosférica e Oceânica dos Estados Unidos (NOAA), para o mundo inteiro, tem células de 1 x 1 km. Considerando estas resoluções, dentro de uma célula do modelo existem cerca de 100.000 informações sobre o uso do solo e 100 informações sobre a altitude do terreno.

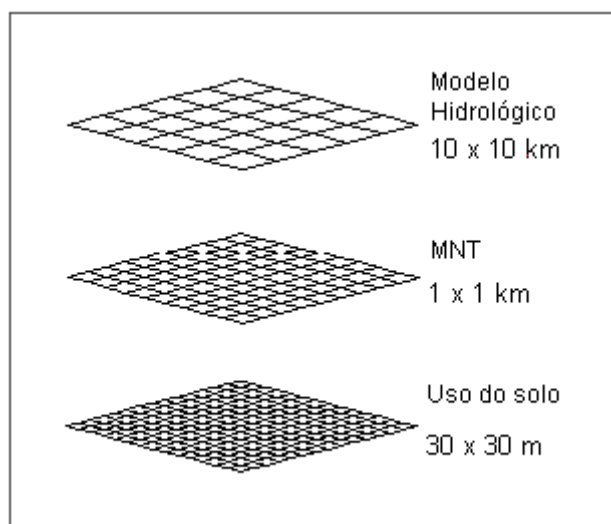


Figura 10 - Resolução do modelo hidrológico frente à resolução das informações utilizadas

Fonte: Collischonn (2001)

A variabilidade topográfica, interna a uma célula, é informada ao modelo através dos valores de altitude máxima e mínima existentes no MNT na área da célula. Desta forma, a informação disponível em resolução maior é levada em conta, não sendo desperdiçada, e a resolução do modelo hidrológico distribuído é mantida em valores adequados para a simulação de grandes bacias, mesmo em microcomputadores.

4.1.3. Parâmetros do modelo

Os parâmetros utilizados em modelos hidrológicos podem ser divididos em duas categorias principais: parâmetros fixos e parâmetros calibráveis. Essa distinção é fundamental para a construção de modelos confiáveis, pois os primeiros refletem as características físicas da bacia hidrográfica, enquanto os segundos permitem ajustar o modelo às especificidades dos dados hidrológicos observados, aprimorando a precisão das previsões.

4.1.3.1. Parâmetros fixos

Os parâmetros fixos correspondem às características físicas, ambientais e geomorfológicas da bacia que permanecem constantes durante a simulação, como vegetação, solo e topografia. A

Tabela 3 - Parâmetros fixos do modelo MGB-IPH apresenta alguns dos principais parâmetros fixos utilizados no modelo MGB-IPH, com suas descrições e funções.

Tabela 3 - Parâmetros fixos do modelo MGB-IPH

Parâmetro Fixo	Descrição
Índice de Área Foliar (IAF)	O IAF representa a relação entre a área total das folhas das plantas e a área de uma parcela de solo. Trata-se de um parâmetro adimensional (m^2/m^2), que pode ser obtido por meio de medições diretas ou estimativas baseadas em dados disponíveis na literatura.
Albedo	O albedo corresponde à fração da radiação solar refletida pela superfície do solo, levando em consideração a cobertura vegetal presente.
Resistência Superficial	A resistência superficial caracteriza a dificuldade de transferência da umidade do solo, passando pelas plantas até a atmosfera. Essa resistência varia conforme o tipo de vegetação e é influenciada por fatores ambientais, como a umidade do solo, a temperatura do ar e a radiação solar incidente.
Altura do Dossel	A altura média da vegetação é utilizada pelo modelo hidrológico para estimar a resistência aerodinâmica, um fator que regula a evapotranspiração. Resistências aerodinâmicas maiores resultam em fluxos menores de evapotranspiração. Em áreas florestais, essa resistência tende a ser menor devido à maior altura da vegetação, que aumenta a turbulência do vento.

Fonte: Adaptado de FAN (2011)

4.1.3.2. Parâmetros calibráveis

Já os parâmetros calibráveis são ajustados durante a calibração do modelo para adequar a simulação às observações reais, envolvendo processos dinâmicos como escoamento superficial, infiltração e armazenamento. A

Tabela 4 sintetiza os principais parâmetros calibráveis e suas funções no modelo.

Tabela 4 - Parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH

Parâmetro Calibrável	Descrição
Capacidade de Armazenamento do Solo (Wm)	Representa a capacidade máxima de armazenamento de água no solo.
Forma da relação entre armazenamento e saturação (b)	Define a forma da curva que relaciona o armazenamento de água no solo com o grau de saturação.
Vazão durante a estiagem (Kbas)	Controla o fluxo de água que escoar subterraneamente durante períodos de seca; valores maiores indicam maior escoamento subsuperficial.
Quantidade de água que escoar subsuperficialmente (Kint)	Regula a quantidade de água que se desloca da camada superficial para a subsuperficial.
Forma da curva de redução da drenagem intermediária (XL)	Ajusta a forma da curva que representa a diminuição do escoamento intermediário ou subsuperficial no solo.
Fluxo do reservatório subterrâneo para a camada superficial (CAP)	Controla o retorno da água do reservatório subterrâneo para a camada superficial do solo.
Armazenamento Residual (Wc)	Limita o volume de água que permanece armazenado, tanto na camada superficial quanto no reservatório subterrâneo.
Calibração da propagação superficial (CI)	Parâmetro utilizado para ajustar a propagação do fluxo superficial nas minibacias.
Calibração da propagação subsuperficial (CS)	Parâmetro que ajusta a propagação do fluxo subsuperficial nas minibacias.
Retardo do reservatório subterrâneo (CB)	Representa o atraso no escoamento da água armazenada no reservatório subterrâneo.
Vazão de Base (QB)	Parâmetro empírico que determina o fluxo base constante da minibacia, associado ao escoamento de água subterrânea durante períodos sem precipitação.

Fonte: Adaptado de FAN (2011)

Os valores iniciais desses parâmetros, utilizados como ponto de partida para a calibração, estão detalhados na Tabela 5 que apresenta os parâmetros por URH e os valores gerais da bacia, como declividade média do canal (CS), capacidade de infiltração inicial (CI) e máxima (CB).

Tabela 5 - Parâmetros iniciais do solo

Use	Wm	B	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	300.0	0.70	1.25	10.00	0.60	0.00	0.10
FlorProf	600.0	0.40	2.50	20.00	0.60	0.00	0.10
AgriRas	300.0	1.00	1.25	10.00	0.60	0.00	0.10
AgriProf	600.0	0.70	2.50	20.00	0.60	0.00	0.10
CampRas	300.0	0.80	1.25	10.00	0.60	0.00	0.10
CampProf	600.0	0.50	2.50	20.00	0.60	0.00	0.10
Varzea	200.0	1.10	0.50	5.00	0.60	0.00	0.10
ASI	100.0	1.50	0.10	4.00	0.60	0.00	0.10
Agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CS	20						
CI	100						
CB	2000						

Fonte: Adaptado de ALVES *et al.* (2020)

Esses valores iniciais servem como ponto de partida para o processo de calibração do modelo, permitindo ajustes que refletem as características específicas da bacia em estudo.

4.1.4. Calibração do modelo

A avaliação da calibração do modelo consiste em comparar as vazões simuladas com as observadas, ajustando os parâmetros hidrológicos para que o comportamento hidrológico da bacia seja adequadamente representado. Para quantificar o grau de ajuste e guiar o processo de calibração, são utilizadas três funções objetivo, que serão detalhadas a seguir.

4.1.4.1. Coeficiente de Nash (R2)

Possui valor máximo de 1, que corresponde a um ajuste perfeito entre vazões calculadas e observadas. Sendo que, em consequência da alta influência de erros nas vazões máximas, se R2 é próximo de 1, o modelo está obtendo um bom ajuste para cheias. Pode ser obtido pela Equação (1) a seguir:

$$R2 = 1 - \frac{\sum(Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t))^2}{\sum(Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (1)$$

onde,

$Q_{obs}(t)$: a vazão observada no tempo t;

$\overline{Q_{obs}}$: a vazão observada média no tempo t;

$Q_{cal}(t)$: a vazão calculada no tempo t.

Segundo COLLISCHONN (2001), o desempenho de um modelo é considerado adequado e bom se o valor de R2 supera 0,75, e é considerada aceitável se o valor de R2 ficar entre 0,36 e 0,75.

4.1.4.2. Coeficiente de Nash para os logaritmos das vazões (Rlog)

Também possui valor máximo de 1 e tem uma influência grande de erros nas vazões máximas, mas é mais fortemente influenciado pelas vazões mínimas do que R2. Pode ser calculado pela Equação (2):

$$R_{log} = 1 - \frac{\sum(\ln(Q_{obs}(t)) - \ln(Q_{cal}(t)))^2}{\sum(\ln(Q_{obs}(t)) - \ln(Q_{obs}(t)))^2} \quad (2)$$

Normalmente Rlog mais próximo da unidade significa que o modelo está simulando adequadamente os períodos de recessão do hidrograma e as estiagens.

4.1.4.3. Relação entre volumes medidos e calculados (ΔV)

Expressa a diferença relativa entre a soma de todas as vazões, calculadas a observadas, sem considerar sua sequência temporal, como mostra a Equação (3):

$$\Delta V = \frac{\sum(Q_{cal}(t)) - \sum(Q_{obs}(t))}{\sum(Q_{obs}(t))} \quad (3)$$

O erro no volume (ΔV) não tem valor máximo nem mínimo determinado e não é influenciado por períodos de cheias ou de estiagens, apenas expressa a diferença relativa entre a soma de todas as vazões, calculadas e observadas, seu resultado expressa se as perdas de água por evapotranspiração estão sendo calculadas (COLLISCHONN, 2001; RIBEIRO NETO, 2006).

4.2. Bacia hidrográfica do rio Tocantins-Araguaia

A Bacia do Rio Tocantins-Araguaia está localizada na região centro-norte do Brasil e se estende pelos estados de Tocantins, Goiás, Mato Grosso, Pará, Maranhão e pelo Distrito Federal, conforme ilustrado na Figura 11. É formada principalmente pelos rios Tocantins e Araguaia, que, junto a seus diversos afluentes, compõem uma das maiores e mais relevantes bacias hidrográficas do país.

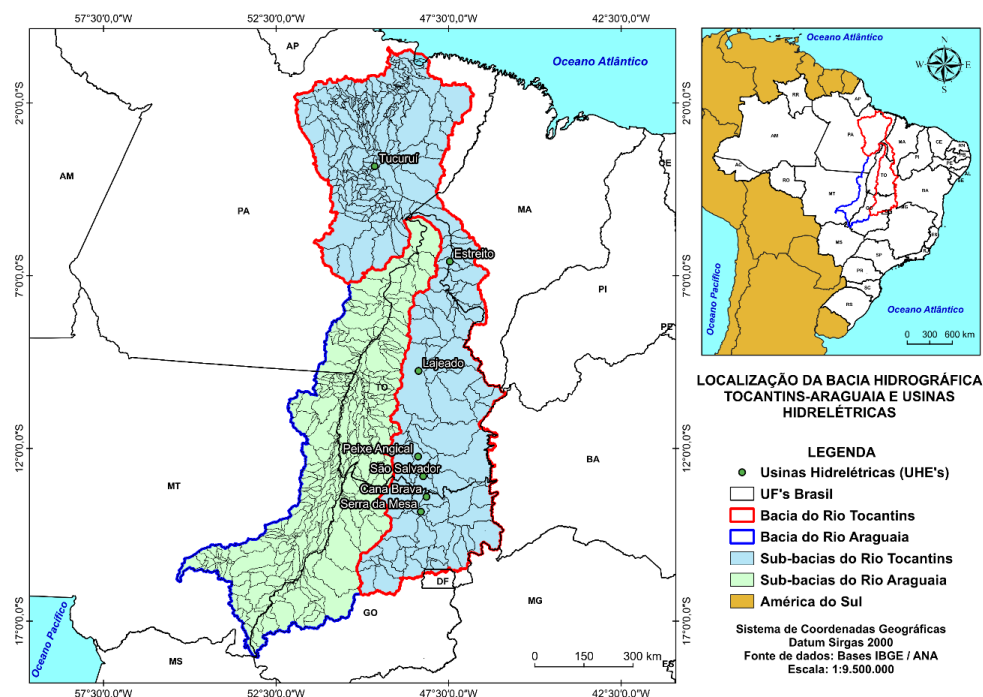


Figura 11 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins-Araguaia
Fonte: Própria autora (2023)

Com uma área de drenagem aproximada de 770.000 km², a bacia desempenha papel estratégico na hidrologia nacional. O rio Tocantins nasce em Goiás e percorre cerca de 1.900 km até encontrar o rio Araguaia, enquanto o rio Araguaia percorre aproximadamente 2.600 km até sua foz no Oceano Atlântico. Ambos apresentam grande volume de água e contribuem significativamente para o sistema fluvial da região.

De acordo com Machado *et al.* (2016), a bacia do Tocantins-Araguaia é responsável por cerca de 9% da disponibilidade de água doce do Brasil. Seu regime hidrológico é complexo, influenciado por chuvas tropicais, variações pluviométricas irregulares e padrões de escoamento típicos da região amazônica. Essa complexidade reforça a necessidade de estudos detalhados e do uso de ferramentas precisas para a gestão eficiente dos recursos hídricos.

No contexto da geração de energia elétrica, a bacia do Rio Tocantins desempenha um papel crucial para o sistema energético brasileiro. Graças à sua capacidade de armazenamento e ao potencial hidrelétrico disponível, ela contribui de forma significativa para o suprimento de eletricidade do país, fornecendo energia tanto de base quanto complementar (CARDOSO *et al.*, 2017). Ao longo de seu percurso, estão instaladas sete usinas hidrelétricas de grande porte, organizadas em cascata, da montante para a jusante:

1. UHE Serra da Mesa (FURNAS) – localizada na parte mais elevada da bacia, com função principal de regularização de vazões;
2. UHE Cana Brava (ENGIE) – aproveita o fluxo regulado pela Serra da Mesa;
3. UHE São Salvador (ENGIE) – situada a jusante de Cana Brava, com menor capacidade de regularização;
4. UHE Peixe Angical (EDP) – controla parte do escoamento do Tocantins;
5. UHE Lajeado (EDP) – contribui para geração local e manutenção do fluxo;
6. UHE Estreito (ENGIE) – aproveita o potencial hídrico médio do rio;
7. UHE Tucuruí (ELETRONORTE) – localizada próximo à foz do rio, possui grande capacidade instalada e é responsável pela regulação final do fluxo antes do deságue no Oceano Atlântico.

Conforme a Figura 12 - Usinas da cascata da Bacia do Rio Tocantins



Figura 12, apenas as UHEs Serra da Mesa, Peixe Angical e Tucuruí possuem capacidade de regularização das vazões. Dentre elas, destaca-se a UHE Serra da Mesa, que detém o maior reservatório do país, com 54,4 bilhões de m³, enquanto a UHE Tucuruí possui a segunda maior capacidade instalada totalmente nacional, com 8.365 MW (ANA, 2023). A presença dessas usinas evidencia a importância estratégica da bacia do Tocantins-Araguaia para a segurança hídrica e energética do Brasil, reforçando a necessidade de planejamento e operação eficiente de seus recursos.



Figura 12 - Usinas da cascata da Bacia do Rio Tocantins
Fonte: ANA (2023)

4.2.1. Relevo da bacia

A bacia do Rio Tocantins é marcada por um relevo diversificado que desempenha um papel essencial na hidrologia e na geomorfologia da região, de acordo com a Figura 13.

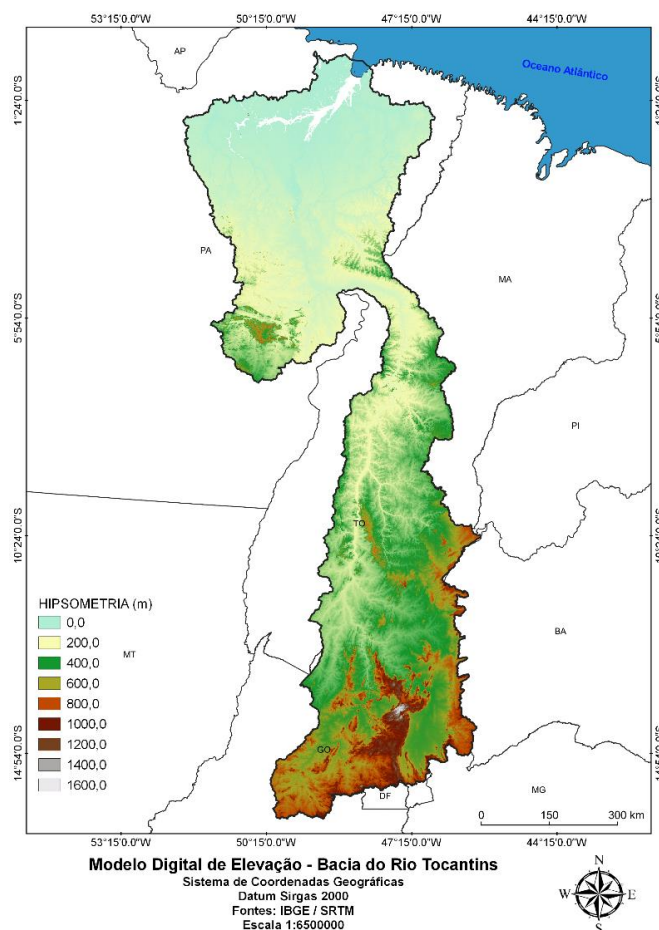


Figura 13 - Relevo da Bacia do Rio Tocantins
 Fonte: Própria autora (2023)

A presença de formações montanhosas e planaltos, como a Serra Geral e a Chapada das Mangabeiras, influencia diretamente a formação dos cursos d'água e a topografia da bacia (SOARES, 2009). Essas elevações contribuem para a retenção de água durante períodos chuvosos e têm impacto significativo na regulação dos fluxos fluviais, influenciando o ciclo hidrológico da região (JUNK *et al.*, 2011).

Em contrapartida, as áreas de baixadas, como a Planície do Tocantins, atuam como regiões de armazenamento temporário, regulando o regime de cheias e vazantes ao longo do ano (MIRANDA, 2006). A interação entre os diferentes tipos de relevo cria uma

rede complexa de drenagem, influenciando a disponibilidade de água, a dinâmica sedimentar e a biodiversidade local.

A Bacia Hidrográfica que abriga as Usinas Hidrelétricas Serra da Mesa, Cana Brava e São Salvador está localizada na região central do Brasil, no Estado de Goiás. A topografia da região é predominantemente composta por planaltos e chapadas, típicos do Planalto Central Brasileiro. As altitudes médias nos trechos próximos às UHEs Serra da Mesa e Cana Brava variam entre 400 e 600 metros, com pontos máximos que podem alcançar cerca de 700 metros. Já a área próxima à UHE São Salvador apresenta altitudes mais baixas, entre 300 e 450 metros, refletindo o relevo mais suave da região.

O relevo nas proximidades da UHE Serra da Mesa e Cana Brava é caracterizado por morros e serras, enquanto na área próxima à UHE São Salvador predominam planícies, com algumas colinas e pequenas elevações ainda presentes. As declividades médias variam de 5 a 12% nos trechos montanhosos, favorecendo escoamento mais rápido, enquanto nos trechos de planície a declividade é inferior a 3%, contribuindo para maior acúmulo de água e formação de áreas de inundação temporária.

Essa heterogeneidade do relevo é determinante para a hidrologia da bacia, pois influencia diretamente a formação dos escoamentos, a subdivisão em mini-bacias e a distribuição espacial das Unidades de Resposta Hidrológica (URHs). No contexto do ajuste do modelo MGB-IPH, essas informações permitem calibrar parâmetros como o tempo de concentração e a velocidade de escoamento superficial, garantindo que o modelo represente de forma fiel a resposta hidrológica de cada trecho da bacia e esteja preparado para futuras simulações de eventos críticos.

4.2.2. Tipos de solos

A bacia do Rio Tocantins abriga uma diversidade de tipos de solo, resultado de sua extensa área geográfica e das diferentes condições climáticas e geomorfológicas presentes na região, conforme identificada na Figura 14.

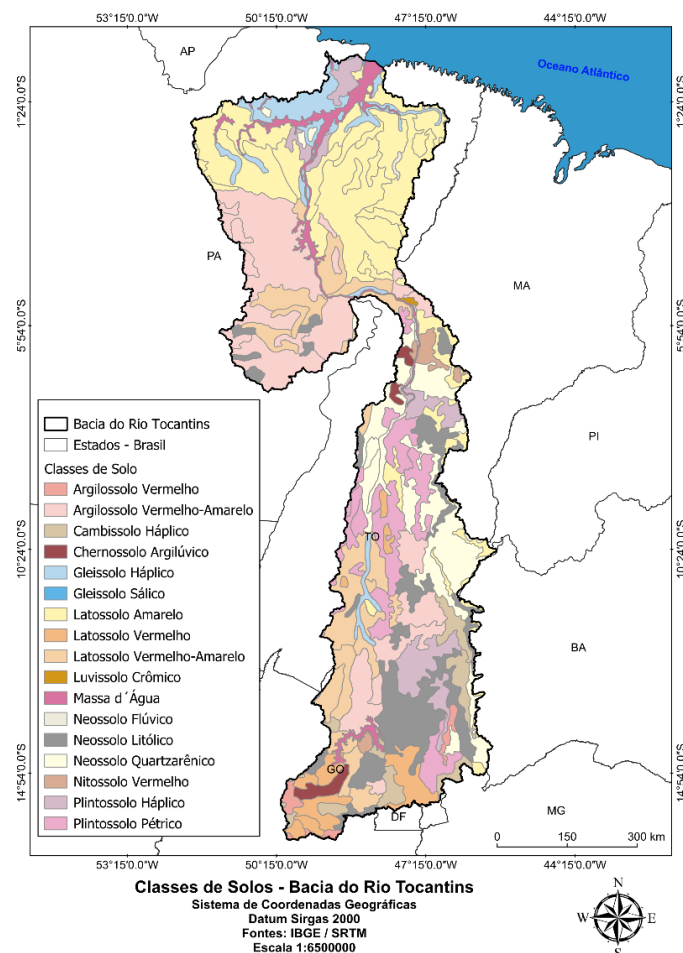


Figura 14 - Tipos de solo da Bacia do Rio Tocantins
 Fonte: Própria autora (2023)

Nas áreas de chapadas e planaltos, é comum encontrar solos do tipo Latossolo, caracterizados por sua profundidade e alto teor de óxidos de ferro e alumínio. Esse tipo de solo, com sua capacidade de armazenar nutrientes, é relevante para a agricultura na região (SANTOS *et al.*, 2017).

Nas baixadas e áreas próximas aos rios, devido ao acúmulo de sedimentos aluviais ao longo do tempo, os solos são frequentemente do tipo Gleissolo, com elevada fertilidade, mas também susceptíveis à inundação periódica (CUNHA, 2018).

O Latossolo é um solo típico de regiões tropicais e subtropicais, conhecido por sua coloração avermelhada ou amarelada, dependendo dos teores de ferro e alumínio presentes. É um solo bem drenado, profundo e geralmente fértil, o que o torna adequado para a agricultura.

A construção dos reservatórios das usinas hidrelétricas alterou parte das condições originais do solo nas áreas inundadas, transformando-as em solos aluviais, que podem

apresentar propriedades diferentes das áreas circundantes. Além disso, a vegetação natural das margens dos reservatórios exerce influência significativa sobre a qualidade e estabilidade do solo nessas regiões.

Especificamente, a bacia das usinas hidrelétricas Serra da Mesa, Cana Brava e São Salvador é predominantemente caracterizada por Latossolos, com variações locais observadas principalmente nas proximidades dos reservatórios e em áreas sujeitas a processos de deposição aluvial. Essa heterogeneidade do solo é um fator importante a ser considerado no ajuste do modelo hidrológico, uma vez que influencia diretamente a infiltração, o escoamento superficial e outros processos hidrológicos simulados pelo MGB-IPH.

4.2.3. Aspectos climáticos

A Bacia do Rio Tocantins, localizada na região norte do Brasil, apresenta uma variabilidade climática significativa, resultado de sua extensa área territorial e da diversidade de relevo, que inclui planaltos, serras e planícies. O clima predominante na região é o equatorial úmido, caracterizado por temperaturas elevadas ao longo do ano, alta umidade relativa do ar e intensa pluviosidade, fatores que influenciam diretamente os processos hidrológicos e a disponibilidade de água na bacia (MARENGO, 2006).

Na bacia, a precipitação apresenta clara sazonalidade: a estação chuvosa ocorre geralmente entre novembro e abril, enquanto a estação seca se estende de maio a outubro (MARENGO, 2006). Essa variabilidade temporal impacta o escoamento superficial, o armazenamento em solos e reservatórios, bem como a recarga de aquíferos, determinando os regimes de cheias e vazantes dos rios (RODRIGUES *et al.*, 2013). Fatores locais, como relevo, cobertura vegetal e tipo de solo, modulam a resposta hidrológica da bacia, criando padrões complexos de escoamento que devem ser considerados em estudos hidrológicos e na operação das usinas hidrelétricas.

Os dados de precipitação acumulada na bacia fornecem informações essenciais para a análise hidrológica e o planejamento da gestão dos recursos hídricos e permitem identificar padrões de intensidade e frequência das chuvas, fornecendo informações essenciais para a análise hidrológica e para o planejamento da gestão dos recursos hídricos na região.

Entre outubro de 2021 e março de 2022, durante os meses chuvosos, foram registrados 1441 mm de precipitação na bacia de captação da UHE Serra da Mesa,

correspondendo a 111% da média deste período e 103% da média histórica da estação chuvosa (1983–2021). Em março de 2022, a precipitação foi de 93 mm, equivalente a 44% da média histórica para o mês (Figura 15).

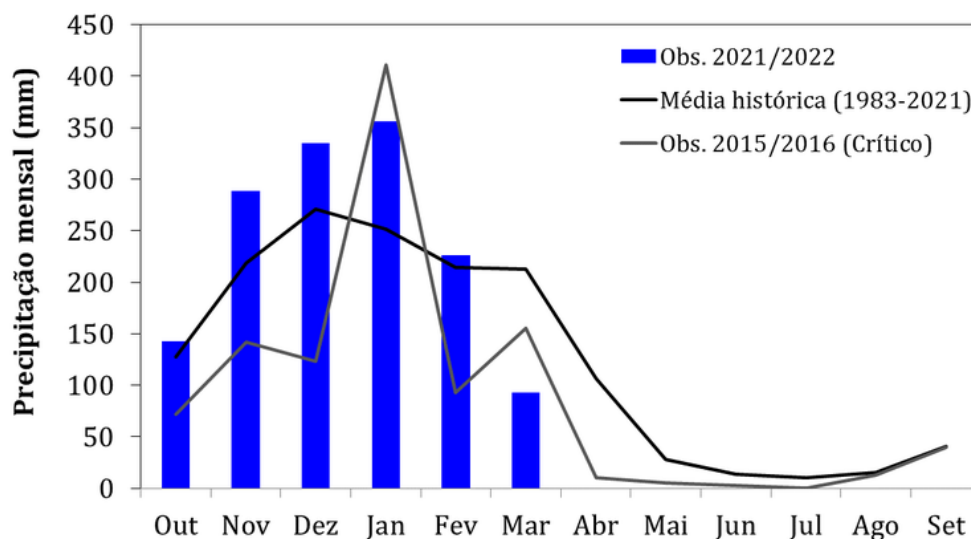


Figura 15 - Precipitação mensal da Bacia Hidrográfica da UHE Serra da Mesa
Fonte: CEMADEN (2022)

Compreender o regime climático da Bacia do Rio Tocantins é crucial para o ajuste do modelo hidrológico MGB-IPH. A incorporação correta de dados hidrometeorológicos representativos da região permite calibrar o modelo de forma a refletir com precisão o comportamento hidrológico da bacia. Um ajuste adequado é essencial para futuras simulações, como a previsão de eventos de cheias, e contribui para decisões estratégicas na operação das usinas hidrelétricas. Além disso, a modelagem auxilia na gestão integrada dos recursos hídricos, promovendo segurança operacional e eficiência energética em um sistema fluvial complexo.

4.2.4. Usinas Hidrelétricas do estudo

O foco deste trabalho é o ajuste do Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH) para as Usinas Hidrelétricas Cana Brava e São Salvador, localizadas na cascata da bacia do Rio Tocantins. O regime de operação de ambas as usinas é caracterizado como fio d'água, o que significa que elas não desempenham um papel na regularização da cascata e utilizam apenas a vazão natural do rio para a geração de eletricidade, minimizando o armazenamento de água.

4.2.4.1. Usinas Hidrelétrica Cana Brava

A Usina Hidrelétrica Cana Brava, localizada no município de Cavalcante (GO), sobre o rio Tocantins, iniciou sua operação comercial em 2002 e atualmente está sob concessão da ENGIE Brasil Energia até o ano de 2033. Com um reservatório de 139 km² e três unidades geradoras equipadas com turbinas do tipo Francis, a usina possui uma capacidade instalada de 450 MW (ENGIE, 2023).

Com o objetivo de analisar o comportamento hidrológico da bacia no período de maior concentração de chuvas, a Figura 16 apresenta as vazões naturais registradas no entorno da UHE Cana Brava. O intervalo sazonal entre os meses de novembro e abril representa a fase do ano com maior contribuição de escoamento superficial para os corpos hídricos, sendo de extrema importância para a gestão do reservatório, o planejamento energético e a modelagem hidrológica.

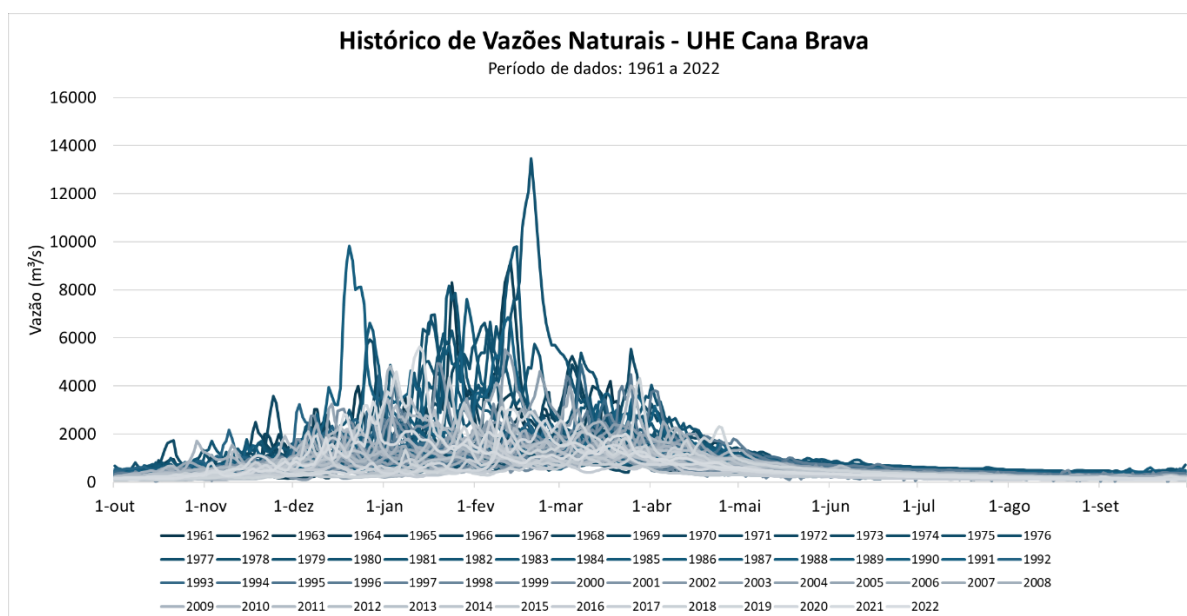


Figura 16 – Histórico de vazões naturais da UHE Cana Brava
Fonte: Própria autora (2025)

A visualização das vazões naturais ao longo desse período permite avaliar a consistência dos dados observados, bem como identificar o padrão de variação sazonal característico da região. Além disso, essa análise é fundamental para compreender o regime hidrológico local, orientar a calibração do modelo hidrológico e apoiar decisões relacionadas ao uso e à conservação dos recursos hídricos.

4.2.4.2. Usinas Hidrelétrica São Salvador

A Usina Hidrelétrica São Salvador está localizada no rio Tocantins, município de Paranã (TO). Com um reservatório a fio d'água de 104 km², entrou em operação em 2009

e está sob concessão da ENGIE Brasil Energia até 2037. A capacidade instalada da Usina é de 243,2 MW, contando com duas unidades geradoras com turbinas verticais do tipo Kaplan de 121,6 MW cada (ENGIE, 2023).

De forma complementar, o mesmo procedimento foi adotado para a Usina Hidrelétrica São Salvador, localizada a jusante da UHE Cana Brava, também sobre o rio Tocantins. Essa análise busca garantir a uniformidade na avaliação da base de dados observacionais utilizadas no estudo, bem como compreender a coerência do comportamento hidrológico entre os diferentes trechos da bacia.

A Figura 17 apresenta as vazões naturais registradas em todo o período, com o mesmo objetivo de avaliação da consistência e da variação sazonal dos dados hidrológicos na região de influência da usina.

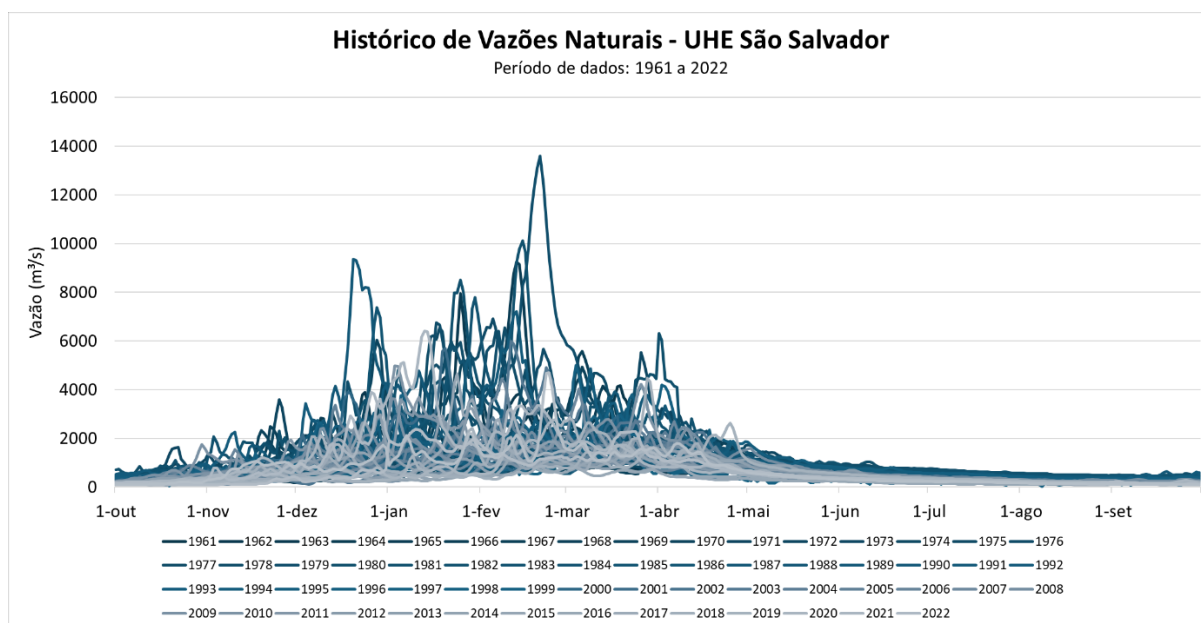


Figura 17 - Histórico de vazões naturais da UHE São Salvador
Fonte: Própria autora (2025)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Pré-processamento do MGB-IPH

Inicialmente, o pré-processamento é realizado a fim de iniciar a modelagem. A partir da discretização da bacia, foi possível extrair atributos como rede de drenagem, bacias e mini bacias hidrográficas.

O pré-processamento dos dados iniciais gerou um arquivo base para a simulação. Este arquivo contém informações topológicas do modelo, fornecendo para cada minibacia, informações como área de drenagem, comprimento e declividade do trecho, e fração de classes de resposta hidrológica.

5.1.1. Dados espaciais

Para a discretização das mini-bacias do estudo, foi utilizado o plugin IPH Hydro Tools, acoplado ao software de geoprocessamento QGIS. O plugin emprega o Modelo Digital de Elevação (MDE) da região como base para gerar os arquivos necessários no pré-processamento do MGB-IPH, permitindo estruturar corretamente a rede de drenagem e a subdivisão das bacias em unidades menores, chamadas mini-bacias, que são essenciais para a representação detalhada dos processos hidrológicos.

O processo inicia com o preenchimento das depressões espúrias identificadas no MDE. Essas depressões representam áreas em que o valor da altitude de uma ou mais células é inferior ao das células circundantes, o que poderia gerar interrupções artificiais no fluxo de água durante a modelagem. A correção dessas depressões é fundamental para garantir que o modelo simule corretamente o escoamento superficial dentro da bacia.

Em seguida, o plugin calcula a direção do fluxo de água para cada célula do MDE, gerando um arquivo que registra as direções de fluxo e permite a construção da rede de drenagem modelada. Esse passo é crucial para definir como a água se desloca dentro das mini-bacias e para determinar a interligação entre elas, assegurando que o modelo reflita adequadamente a topografia e a hidrologia da região.

As mini-bacias geradas para a área de estudo estão representadas na Figura 18, permitindo visualizar a divisão espacial adotada para o ajuste do MGB-IPH. A escolha de um número adequado de mini-bacias e o detalhamento de cada unidade hidrológica são determinantes para a precisão do modelo, pois influenciam diretamente a distribuição

espacial das variáveis hidrológicas e a resposta do modelo a diferentes condições de entrada. As mini-bacias geradas para a área de estudo está representada na Figura 18 - Minibacias geradas através do IPH Hydro Tools

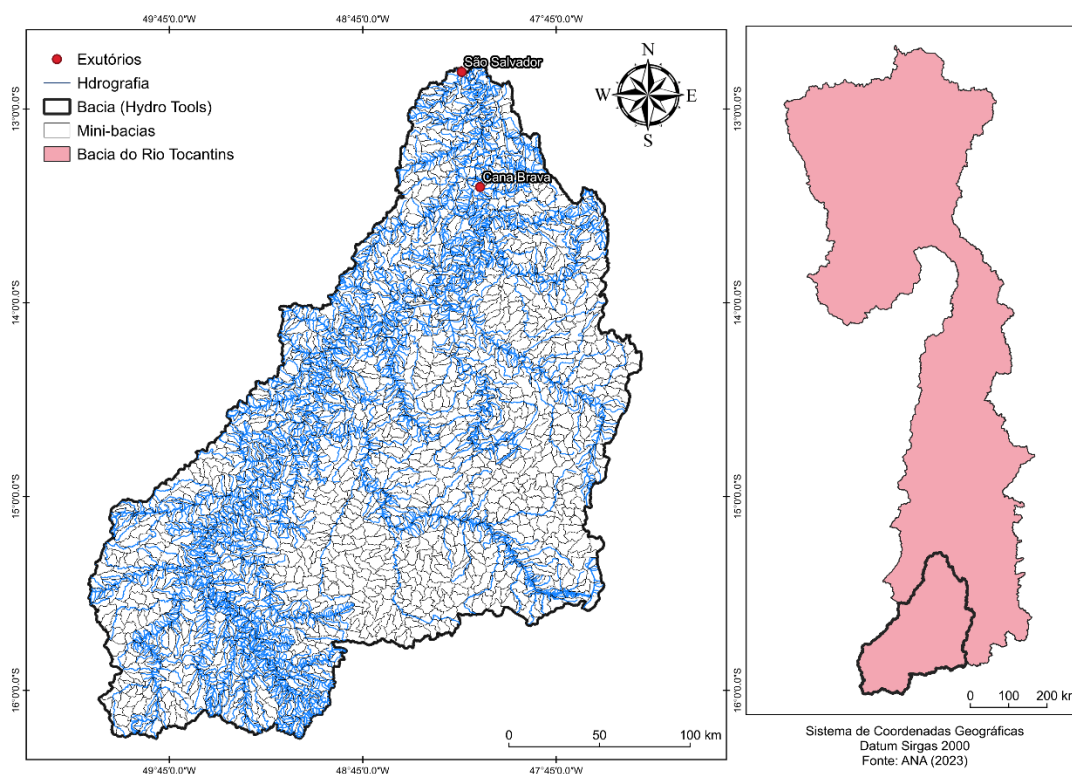


Figura 18 - Minibacias geradas através do IPH Hydro Tools
Fonte: Própria autora (2023)

Os pontos exutórios utilizados neste trabalho foram selecionados a montante das Usinas Hidrelétricas Cana Brava e São Salvador, garantindo que o modelo representasse corretamente o escoamento até os principais pontos de interesse operacional. Essa escolha permite que o ajuste do modelo seja direcionado às áreas de maior relevância para futuras análises e simulações, assegurando que o MGB-IPH esteja preparado para aplicações práticas na gestão das usinas.

5.1.2. Unidades de Resposta Hidrológica (URHs)

Para o modelo hidrológico é necessário espacializar as Unidades de Resposta Hidrológicas (URHs), que correspondem a áreas que teoricamente apresentam comportamento hidrológico homogêneo. Essas unidades influenciam diretamente os processos hidrológicos simulados pelo modelo, uma vez que cada URH responde de maneira similar às precipitações e ao escoamento, permitindo que o MGB-IPH represente de forma detalhada a dinâmica hídrica de diferentes partes da bacia.

O mapeamento de URHs geralmente envolve a combinação de informações sobre tipo e uso do solo, podendo ainda integrar outros dados relevantes, como geologia, topografia, declividade e características do solo. Essa integração permite que cada URH reflita de maneira mais precisa a capacidade de infiltração, armazenamento e escoamento da água na região, fatores essenciais para o ajuste correto do modelo.

As URHs utilizadas neste trabalho, representadas na Figura 19, foram extraídas diretamente do mapa de URHs da América do Sul, disponibilizado pelo portal de Hidrologia de Grande Escala (HGE) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (FAN *et al.*, 2015). O uso de um mapa já consolidado e padronizado garante consistência e compatibilidade com outras bases de dados utilizadas no MGB-IPH, facilitando o processo de configuração e ajuste do modelo.

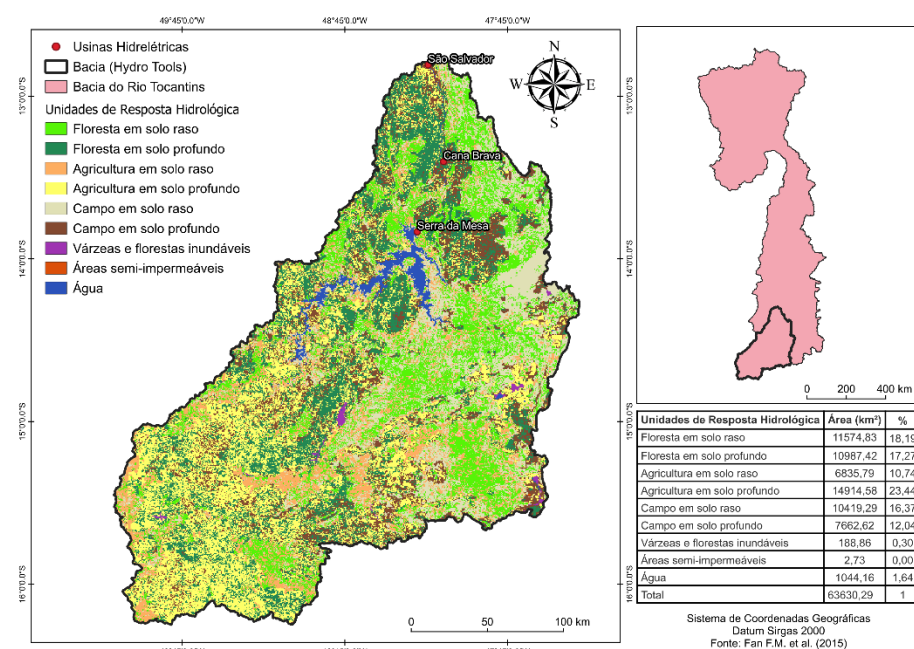


Figura 19 - URHs geradas para a área de estudo
Fonte: Própria autora (2023)

A análise das URHs indica que a maior porcentagem (18,19%) corresponde a floresta em solo raso, com uma área total de aproximadamente 11.575 km². Essa informação é relevante para o ajuste do modelo, pois diferentes tipos de cobertura influenciam a evapotranspiração, a infiltração e o escoamento superficial, impactando diretamente a resposta hidrológica de cada unidade. Além disso, a correta classificação das URHs permite ao modelo refletir melhor as heterogeneidades espaciais da bacia, sendo fundamental para que o ajuste seja robusto e represente de forma fiel a realidade hidrológica da região.

O detalhamento das URHs também fornece subsídios para a futura integração do modelo com outros dados hidrológicos e meteorológicos, garantindo que o MGB-IPH esteja devidamente ajustado para análises posteriores, como simulações de eventos extremos ou estudos de planejamento hidrológico e operacional das usinas da bacia.

5.1.3. Dados fluviométricos e pluviométricos

Para o ajuste do modelo hidrológico MGB-IPH foi necessário obter levantamentos de chuva e de vazão que representem adequadamente os dados de entrada do modelo. A coleta desses dados envolve a obtenção de séries temporais completas e atualizadas de variáveis hidrológicas, como níveis de água, vazões e precipitação, que são fundamentais para caracterizar a dinâmica hidrológica da bacia.

O levantamento dos dados das estações hidrológicas existentes é essencial para assegurar que as informações utilizadas na modelagem sejam confiáveis, consistentes e representativas da realidade. Esse processo inclui a verificação da integridade das séries temporais, identificação de lacunas e inconsistências nos registros, além da padronização e formatação dos dados para compatibilidade com os requisitos do MGB-IPH. Garantir a qualidade desses dados é um passo crucial para que o ajuste do modelo seja robusto e que futuras simulações possam refletir com maior fidelidade os processos hidrológicos da bacia.

Foram levantadas 16 estações fluviométricas (Tabela 6) e 12 estações pluviométricas (Tabela 7) disponíveis no sistema Hidroweb, mantido pela Agência Nacional de Águas (ANA), distribuídas estrategicamente ao longo das sub-bacias (Figura 20). A localização dessas estações permite capturar a variabilidade espacial da precipitação e do escoamento dentro da bacia, garantindo que o modelo seja ajustado considerando as diferentes respostas hidrológicas observadas em cada região.

Além disso, os dados fluviométricos e pluviométricos permitem o cálculo de estatísticas básicas, como médias, máximos, mínimos e séries acumuladas, que servem como referência para o ajuste de parâmetros do MGB-IPH, como infiltração, tempo de concentração e escoamento superficial. A correta integração desses dados ao modelo possibilita que o MGB-IPH represente com precisão a resposta hidrológica das mini-bacias, criando uma base sólida para estudos futuros sobre eventos de cheia e planejamento operacional das usinas hidrelétricas.

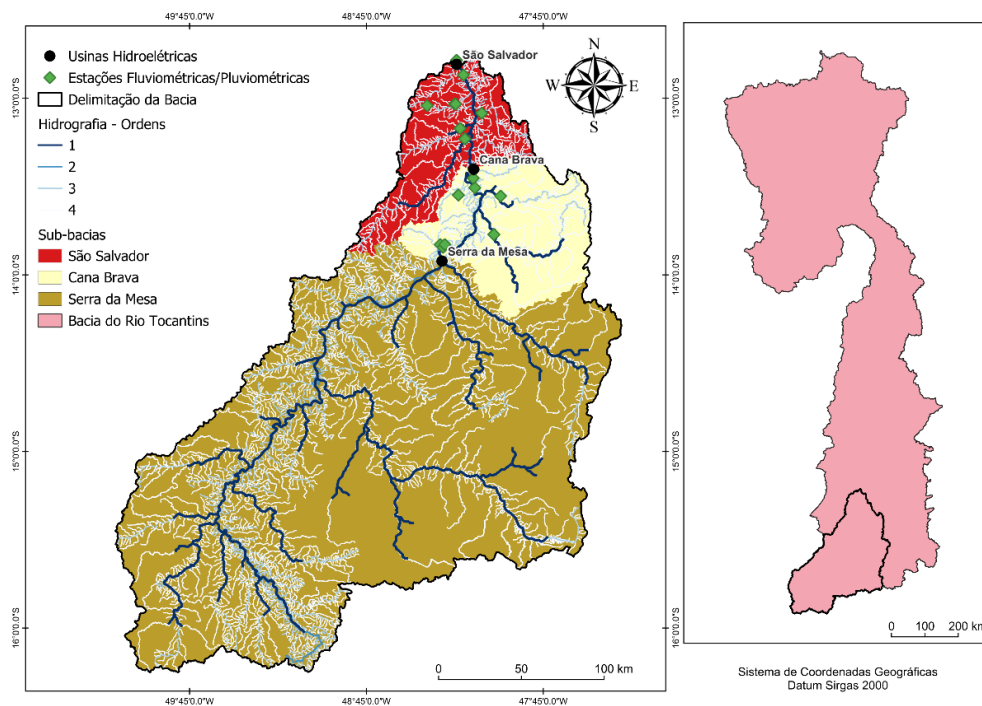


Figura 20 - Estações fluviométricas e pluviométricas por Sub-Bacias
Fonte: Própria autora (2023)

Tabela 6 - Estações fluviométricas

Código	Nome	Estado	Município	Latitude (S)	Longitude (W)
20919000	UHE SERRA DA MESA RESERVATÓRIO	GO	MINAÇU	-13.8444	-48.3164
20920080	UHE SERRA DA MESA BARRAMENTO	GO	MINAÇU	-13.8286	-48.3067
20980000	UHE CANA BRAVA RIO PRETO	GO	MINAÇU	-13.7719	-48.0289
21030000	UHE CANA BRAVA RIO BONITO	GO	MINAÇU	-13.5483	-48.2300
21040000	UHE CANA BRAVA RIO SÃO FELIX	GO	CAVALCANTE	-13.5539	-47.9908
21050025	UHE CANA BRAVA RESERVATÓRIO 2	GO	MINAÇU	-13.5069	-48.1367
21050028	UHE CANA BRAVA RESERVATÓRIO 1	GO	MINAÇU	-13.4531	-48.1456
21050080	UHE CANA BRAVA BARRAMENTO	GO	MINAÇU	-13.4031	-48.1439
21050200	UHE SÃO SALVADOR RIO CANA BRAVA	GO	MINAÇU	-13.2300	-48.1928
21060000	UHE SÃO SALVADOR RESERVATÓRIO	TO	PARANÃ	-12.8678	-48.2011
21062000	PALMEIRÓPOLIS	TO	PALMEIRÓPOLIS	-13.0331	-48.2519
21080000	UHE SÃO SALVADOR BARRAMENTO	TO	PARANÃ	-12.8086	-48.2386
21150100	UHE SÃO SALVADOR RIO MUCAMBÃO	TO	PALMEIRÓPOLIS	-13.1706	-48.2200
21160100	UHE SÃO SALVADOR RIO CUSTÓDIO	TO	PARANÃ	-13.0847	-48.0981
21163100	UHE SÃO SALVADOR RIBEIRÃO MUCAMBINHO	TO	PALMEIRÓPOLIS	-13.0328	-48.2456
22042315	UHE PEIXE ANGICAL FAZENDA BARREIRO	TO	SÃO SALVADOR DO TOCANTINS	-12.7850	-48.2403

Fonte: Própria autora (2023)

Tabela 7 - Estações pluviométricas

Código	Nome	Estado	Município	Latitude (S)	Longitude (W)
1248003	PALMEIRÓPOLIS	TO	PALMEIRÓPOLIS	-13.0419	-48.4069
1248009	UHE PEIXE ANGICAL FAZENDA BARREIRO	TO	SÃO SALVADOR DO TOCANTINS	-12.7850	-48.2403
1248012	UHE SÃO SALVADOR BARRAMENTO	TO	PARANÃ	-12.8086	-48.2386
1347003	UHE CANA BRAVA RIO SÃO FELIX	GO	CAVALCANTE	-13.5539	-47.9911
1348004	UHE SERRA DA MESA BARRAMENTO	GO	MINAÇU	-13.8283	-48.3322
1348006	UHE CANA BRAVA BARRAMENTO	GO	MINAÇU	-13.4031	-48.1439
1348007	UHE CANA BRAVA RIO PRETO	GO	MINAÇU	-13.7717	-48.0294
1348009	UHE CANA BRAVA RIO BONITO	GO	MINAÇU	-13.5481	-48.2300
1348010	UHE SÃO SALVADOR RIBEIRÃO MUCAMBINHO	TO	PALMEIRÓPOLIS	-13.0328	-48.2453
1348011	UHE SÃO SALVADOR RIO CUSTÓDIO	TO	PARANÃ	-13.0847	-48.0983
1348012	UHE SÃO SALVADOR RIO MUCAMBÃO	TO	PALMEIRÓPOLIS	-13.1706	-48.2200
1348013	UHE SÃO SALVADOR RIO CANA BRAVA	GO	MINAÇU	-13.2297	-48.1931

Fonte: Própria autora (2023)

As estações estão distribuídas nos trechos de cada sub-bacia pertencente à área incremental das UHEs Cana Brava e São Salvador, e os dados de chuva foram levantados incluindo também estações localizadas fora da bacia, com o objetivo de ampliar a representatividade espacial. A validação dos dados observados e estimados se torna essencial para identificar eventuais inconsistências, lacunas ou desvios que possam comprometer a qualidade da modelagem hidrológica.

No entanto, a bacia do rio Tocantins ainda apresenta regiões com baixa densidade de estações pluviométricas, o que impõe limitações à representação espacial da precipitação e, por consequência, à acurácia dos modelos de previsão de vazões. Para contornar esse desafio, foram utilizados os dados do produto IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM), fornecido pela missão GPM (Global Precipitation Measurement), desenvolvido pela NASA e pela JAXA.

Os dados IMERG oferecem estimativas de precipitação com alta resolução espacial ($\sim 0,1^\circ$) e temporal (30 minutos a diária), permitindo suprir as deficiências das medições convencionais em áreas com cobertura pluviométrica insuficiente (HUFFMAN *et al.*, 2019). Dessa forma, tornam-se uma alternativa eficiente para o preenchimento de lacunas, verificação da consistência dos dados observados e apoio à modelagem hidrológica em grandes bacias brasileiras.

Além da representatividade espacial, os dados IMERG apresentam bom desempenho estatístico em diferentes estudos de validação, inclusive na região Norte e Centro-Oeste do Brasil, com baixos valores de viés e erro quadrático médio (NASCIMENTO *et al.*, 2023). Assim, sua aplicação contribui significativamente para a melhoria dos resultados hidrológicos, especialmente quando associados a modelos distribuídos como o MGB-IPH, que exigem entrada espacialmente detalhada de precipitação.

5.1.4. Dados climatológicos

Para a modelagem climatológica desenvolvida neste trabalho, foram utilizados dados provenientes das Normais Climatológicas do Brasil, referentes ao período de 1961 a 2010, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Essas normais consistem em médias mensais calculadas ao longo de cinco décadas, oferecendo uma base sólida e representativa das condições climáticas médias para diferentes regiões do país. Por serem elaboradas a partir de um grande conjunto de observações históricas, as normais climatológicas são consideradas referências confiáveis para estudos hidrológicos, ambientais e agrícolas.

Os dados de temperatura (°C), umidade relativa do ar (%), insolação (horas/dia), velocidade do vento (m/s) e pressão atmosférica (kPa) foram extraídos das estações meteorológicas apresentadas na Tabela 8 - Estações meteorológicas da região estudada, localizadas em diferentes pontos estratégicos da região estudada e abrangendo o território da bacia hidrográfica. As estações foram selecionadas com base em sua relevância e na disponibilidade de séries históricas completas e consistentes. Essas informações são essenciais para representar adequadamente as variações regionais e sazonais nos processos hidrológicos simulados.

Tabela 8 - Estações meteorológicas da região estudada

Código	Nome	Estado	Latitude (S)	Longitude (W)
83379	FORMOSA	GO	-15.22	-47.34
83228	PEIXE	TO	-12.02	-48.54
83332	POSSE	GO	-14.09	-46.37
93235	TAQUATINGA	TO	-12.40	-46.44

Fonte: Própria autora (2025)

A precisão na representação das condições climáticas possibilita simulações mais confiáveis do comportamento hidrológico da bacia, influenciando diretamente na

estimativa de vazões e no suporte a tomadas de decisão relacionadas ao uso sustentável dos recursos hídricos.

Além disso, as normais climatológicas garantem que as variabilidades sazonais e regionais do clima sejam adequadamente consideradas, possibilitando que o modelo responda adequadamente a diferentes condições ambientais ao longo do ano. Isso é particularmente importante em bacias hidrográficas extensas, como a do rio Tocantins, onde as condições climáticas podem variar significativamente em função da diversidade territorial.

5.1.5. Vazões observadas

As séries históricas de vazões observadas utilizadas neste estudo, correspondentes às Usinas Hidrelétricas Serra da Mesa, Cana Brava e São Salvador, foram obtidas por meio da plataforma da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), na seção “Dados de Operação dos Reservatórios do Sistema Interligado Nacional (SIN)”.

Foram consideradas, sempre que disponíveis, tanto as vazões afluentes quanto as defluentes observadas, a fim de ampliar a base de comparação com os resultados da modelagem. Para garantir a confiabilidade dos dados utilizados, foi realizada uma análise preliminar das séries históricas com o objetivo de identificar eventuais falhas, descontinuidades ou valores atípicos.

A Figura 21, Figura 22 e Figura 23 ilustram a variação temporal das vazões observadas ao longo dos respectivos períodos de operação das usinas, permitindo uma avaliação inicial da consistência e continuidade das séries.

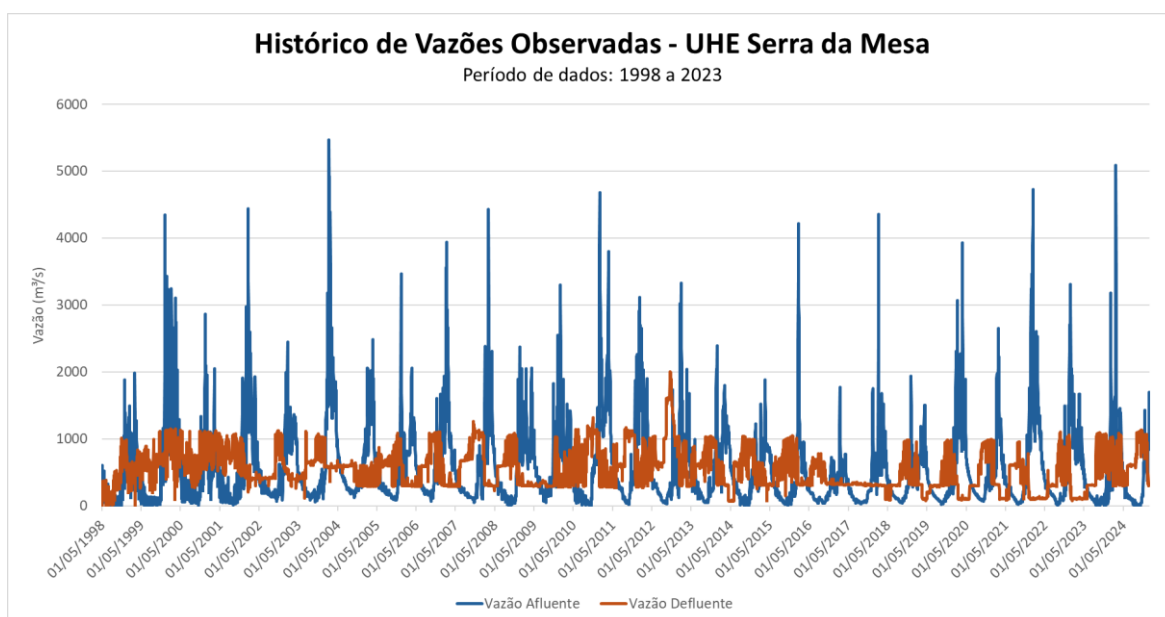


Figura 21 - Histórico de vazões observadas - UHE Serra da Mesa
Fonte: Própria autora (2025)

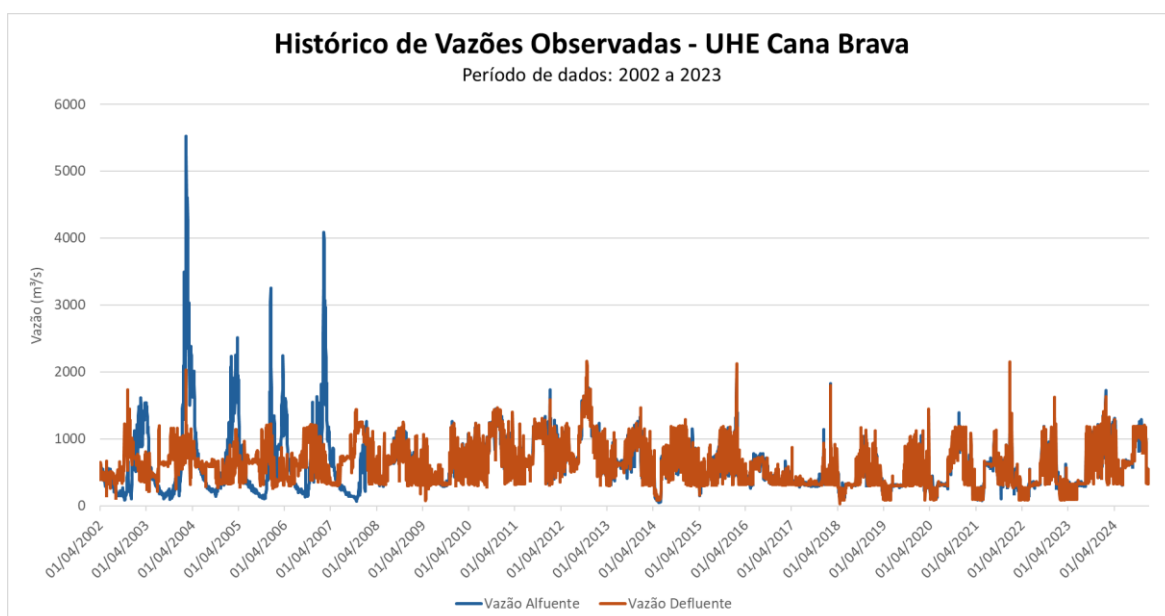


Figura 22 - Histórico de vazões observadas - UHE Cana Brava
Fonte: Própria autora (2025)

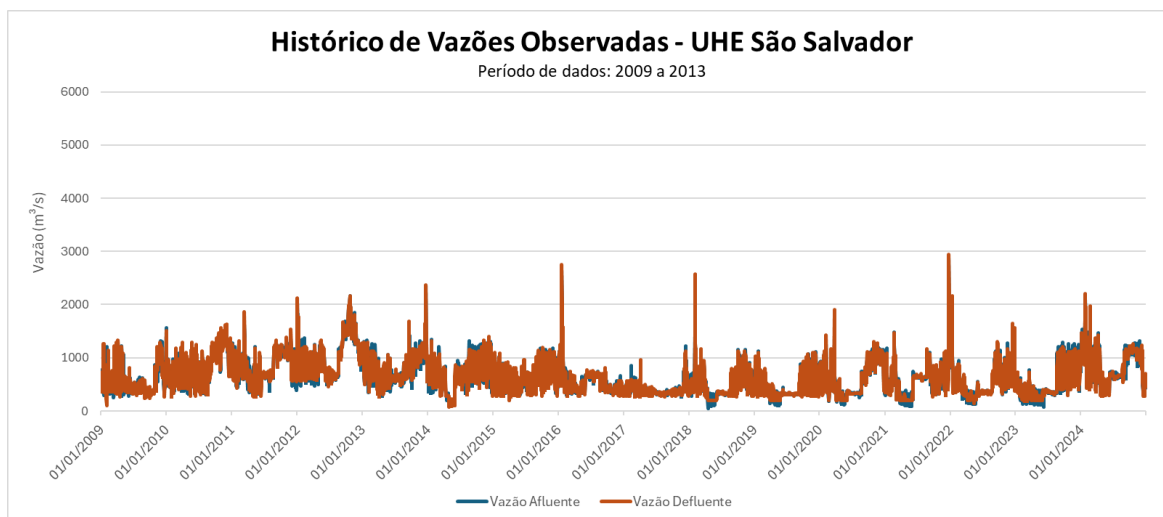


Figura 23 - Histórico de vazões observadas - UHE São Salvador
Fonte: Própria autora (2025)

A utilização dessas séries foi fundamental para subsidiar as etapas de análise, calibração e validação do modelo hidrológico, permitindo a comparação direta entre as vazões simuladas e os registros reais das usinas em estudo.

5.1.6. Parâmetros e calibração do modelo

Para cada Unidades de Resposta Hidrológica (URH) que a bacia foi subdividida, foram atribuídos valores específicos de parâmetros hidrológicos, como capacidade máxima de armazenamento de água no solo (W_m), parâmetro de distribuição do armazenamento (b), constantes de recessão do escoamento de base (K_{bas}) e intermediário (K_{int}), fração do escoamento superficial (XL), capacidade de armazenamento em depressões (CAP) e conteúdo inicial de água no solo (W_c).

As URHs definidas na bacia incluem floresta rasa e profunda, agricultura rasa e profunda, campo, várzea, áreas de solo inconsolidado (ASI) e corpos d'água. Parâmetros adicionais que caracterizam a bacia como um todo foram também especificados, incluindo declividade média do canal (CS), capacidade de infiltração inicial (CI) e máxima (CB), além da vazão de base específica (QB).

Os valores de todos os parâmetros hidrológicos, tanto por URH quanto para a bacia como um todo, estão apresentados conforme Tabela 9, servindo como base para o processo de calibração e verificação do modelo.

Tabela 9 - Parâmetros hidrológicos por URH e da bacia

Use	W_m	B	K_{bas}	K_{int}	XL	CAP	W_c
-----	-------	-----	-----------	-----------	------	-------	-------

FlorRas	324.0	0.69	3.66	15.16	0.60	0.00	0.10
FlorProf	648.0	0.40	7.32	30.32	0.60	0.00	0.10
AgriRas	324.0	0.99	3.66	15.16	0.60	0.00	0.10
AgriProf	648.0	0.69	7.32	30.32	0.60	0.00	0.10
CampRas	324.0	0.79	3.66	15.16	0.60	0.00	0.10
CampProf	648.0	0.50	2.48	19.84	0.60	0.00	0.10
Varzea	432.0	0.55	0.99	4.96	0.60	0.00	0.10
ASI	432.0	0.55	0.99	4.96	0.60	0.00	0.10
Agua	432.0	0.55	0.99	4.96	0.00	0.00	0.00
CS	22.49						
CI	297.60						
CB	1006.00						

Fonte: Própria autora (2025)

A parametrização apresentada estabelece o ponto de partida para a calibração do modelo, permitindo direcionar o ajuste para os parâmetros mais influentes na resposta hidrológica da bacia.

5.2. Calibração do Modelo

A calibração do modelo hidrológico foi conduzida inicialmente considerando a UHE Serra da Mesa (UHSM), unidade situada a montante da bacia, e posteriormente estendida às sub-bacias das UHEs Cana Brava (UHCB) e São Salvador (UHSA). O processo teve como objetivo avaliar a capacidade do modelo em reproduzir tanto o escoamento natural da UHSM quanto o efeito dos reservatórios a montante sobre as unidades a jusante.

Para isso, foram realizadas simulações sem considerar o Q_{subst} , que são as vazões observadas defluentes dos reservatórios a montante, permitindo analisar o comportamento do modelo apenas com as vazões simuladas, sem substituições. Em seguida, foram feitas simulações com o Q_{subst} , procedimento no qual as vazões calculadas pelo modelo em pontos a jusante dos barramentos são substituídas pelas vazões defluentes observadas dos reservatórios. Essa substituição possibilita representar, de forma mais realista, os efeitos da operação dos reservatórios e o amortecimento do escoamento ao longo do rio.

5.2.1. Calibração das sub-bacias sem o Q_{subst}

A calibração inicial do modelo foi conduzida com base nos dados da UHE Serra da Mesa (UHSM), unidade hidrológica situada a montante, considerando o período de 2001 a 2015. Os primeiros ajustes consideraram exclusivamente as vazões afluentes da UHSM, sem aplicação de correções, permitindo verificar a habilidade do modelo em reproduzir o escoamento natural da unidade. Os resultados dessa etapa estão apresentados na Figura 24, destacando a boa concordância entre as vazões calculadas e observadas.

Na rodada realizada sem o Qsubst, as vazões foram calculadas apenas a partir das equações do modelo, sem substituição pelas vazões defluentes observadas nos pontos a jusante dos barramentos. Os resultados se mantiveram satisfatórios para a UHSM, mas apresentaram desempenho ruim para a UHE Cana Brava (UHCB) e a UHE São Salvador (UHSA), devido à influência do reservatório de Serra da Mesa, que não é representada pelo modelo nessa configuração.

Além disso, verificou-se a existência de inconsistências nos dados da UHCB e UHSA entre os anos de 2001 e 2007, abrangendo principalmente as vazões afluentes e os registros disponibilizados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Essas inconsistências referem-se a falhas, lacunas e valores anômalos nas séries históricas, que comprometem a confiabilidade das informações para fins de modelagem. Dessa forma, a calibração foi realizada para o período de 2008 a 2015, quando os dados apresentaram maior consistência e completude.

A Figura 25 apresenta a comparação entre as vazões observadas e calculadas para a UHCB, enquanto a Figura 26 mostra a comparação para a UHSA, evidenciando as limitações do modelo em representar adequadamente os efeitos dos reservatórios a montante.

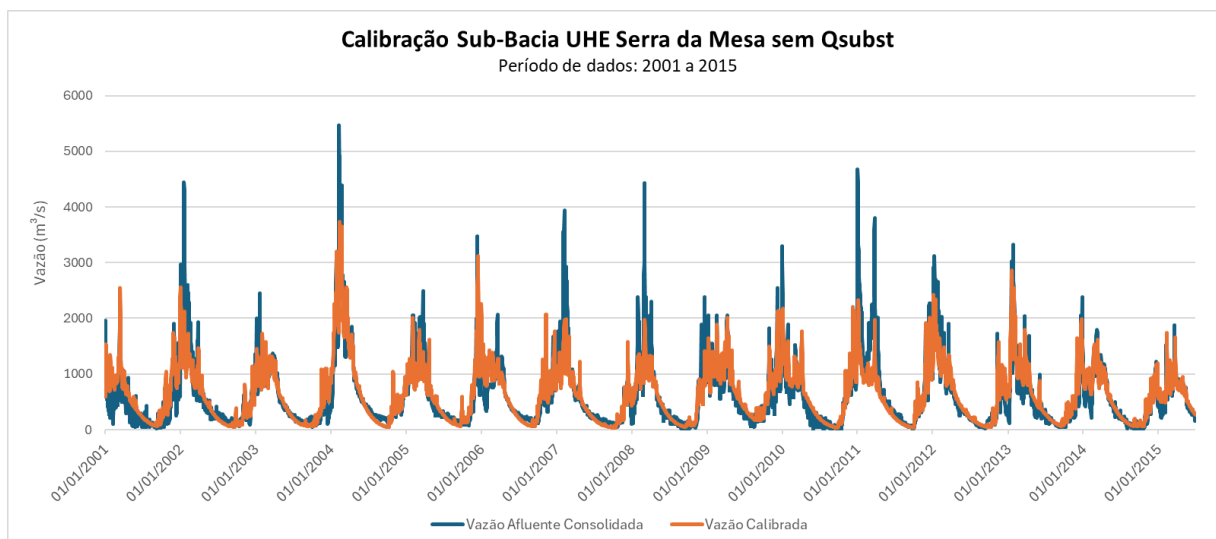


Figura 24 - Calibração sub-bacia UHE Serra da Mesa sem Qsubst
Fonte: Própria autora (2025)

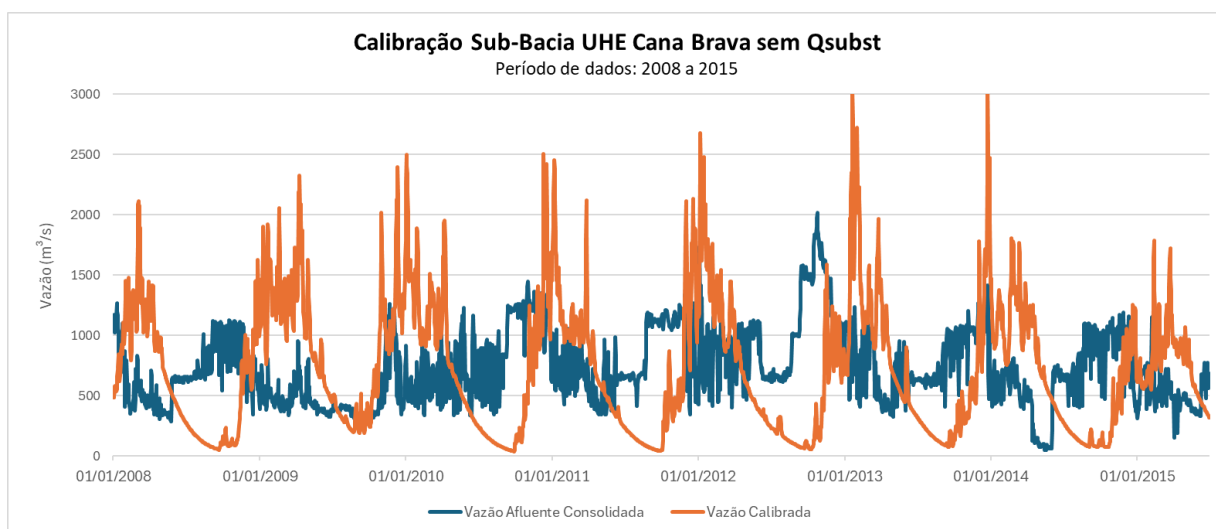


Figura 25 - Calibração sub-bacia UHE Cana Brava sem Qsubst
Fonte: Própria autora (2025)

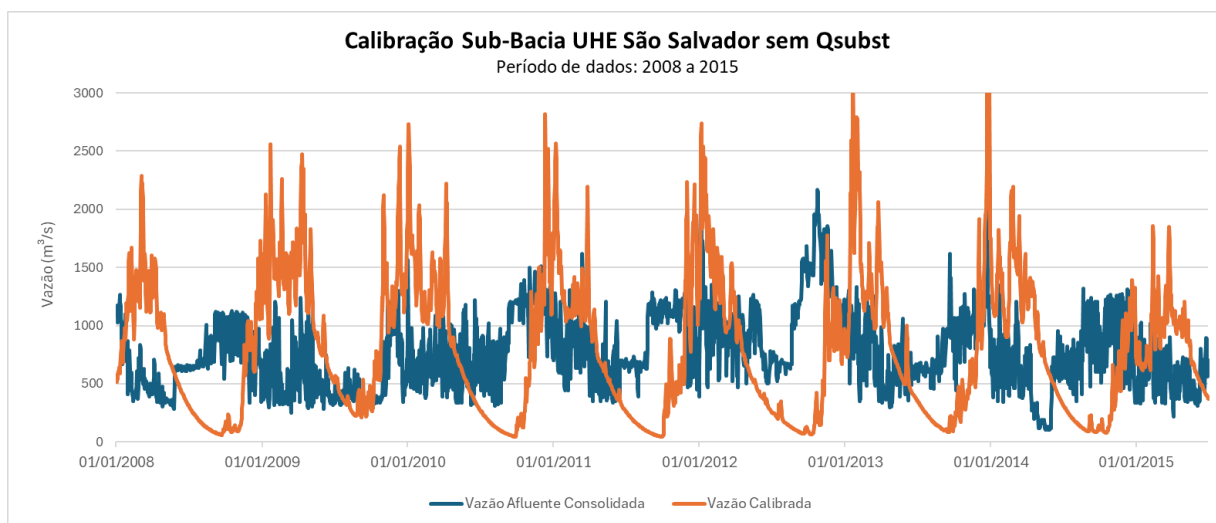


Figura 26 - Calibração sub-bacia UHE São Salvador sem Qsubst
Fonte: Própria autora (2025)

Para quantificar o desempenho do modelo durante a calibração das sub-bacias, foram calculados os principais indicadores de ajuste, incluindo o Coeficiente de Nash (Nash), o Coeficiente de Nash em escala logarítmica (Nash-log) e o erro relativo de volume (ΔV). Esses coeficientes permitem avaliar a concordância entre as vazões observadas e calculadas, tanto em condições de escoamentos normais quanto em cheias, servindo como referência para a análise de acerto do modelo. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Coeficientes da calibração sem Q_{subst}

Sub-Bacia	Nash	Nash-log	ΔV
UHSM	0.763	0.786	-0.674
UHCB	-0.192	-0.449	1.256
UHSA	-0.259	-0.405	7.817

Fonte: Própria autora (2025)

Os resultados obtidos indicam que o modelo apresentou bom desempenho na sub-bacia da UHE Serra da Mesa, com coeficientes de Nash e Nash-log superiores a 0,75 e um erro de volume praticamente nulo. Esses valores demonstram que o modelo foi capaz de reproduzir adequadamente tanto os escoamentos médios quanto os de menor magnitude, além de manter o balanço hídrico consistente. Dessa forma, a calibração realizada para a UHE Serra da Mesa pode ser considerada satisfatória e fornece uma base confiável para a aplicação dos parâmetros nas unidades hidrológicas a jusante.

Por outro lado, para as sub-bacias das UHEs Cana Brava e São Salvador, os indicadores de desempenho apresentaram valores negativos de Nash e Nash-log, bem como erros de volume significativamente elevados. Esses resultados evidenciam a limitação do modelo em representar o comportamento hidrológico nessas unidades, consequência direta da forte influência exercida pelos reservatórios a montante.

A ausência da representação explícita da operação desses reservatórios na estrutura do modelo hidrológico explica o baixo desempenho obtido, reforçando a necessidade de estratégias de correção, como a aplicação do Q_{subst} , procedimento em que as vazões calculadas pelo modelo em pontos a jusante dos barramentos são substituídas pelas vazões defluentes observadas, permitindo representar de forma mais realista os efeitos da operação dos reservatórios.

5.2.2. Calibração das sub-bacias UHE Cana Brava e UHE São Salvador com o Q_{subst}

Na sequência, foram avaliadas as sub-bacias da UHE Cana Brava e da UHE São Salvador, utilizando os mesmos parâmetros ajustados para a UHE Serra da Mesa, considerando o Q_{subst} .

Os gráficos comparativos estão apresentados na Figura 27 e na Figura 28, mostrando a boa concordância entre as vazões observadas e calibradas para ambas as unidades.

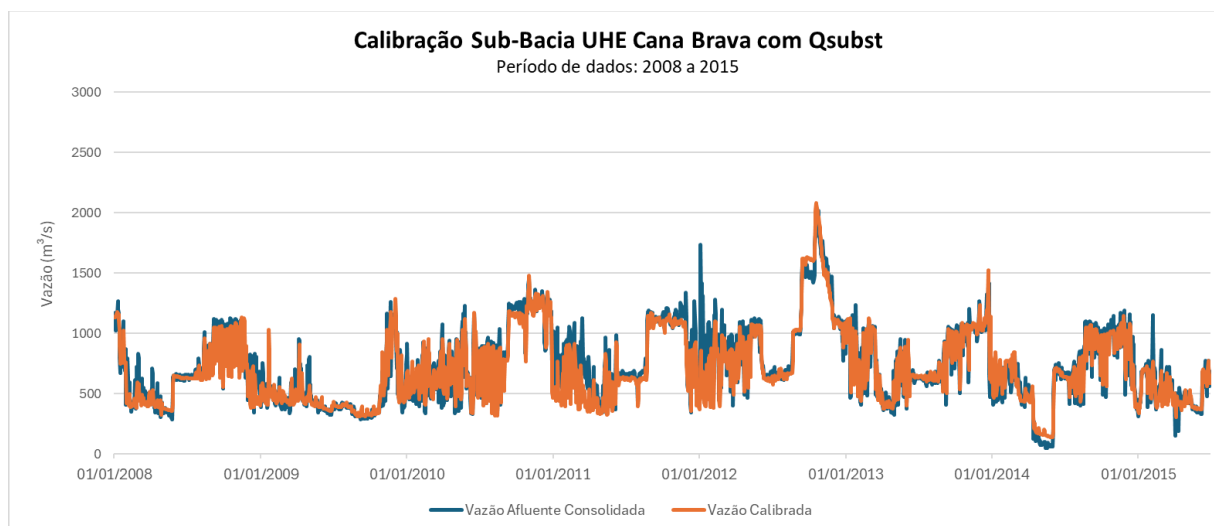


Figura 27 - Calibração sub-bacia UHE Cana Brava com Q_{subst}
Fonte: Própria autora (2025)

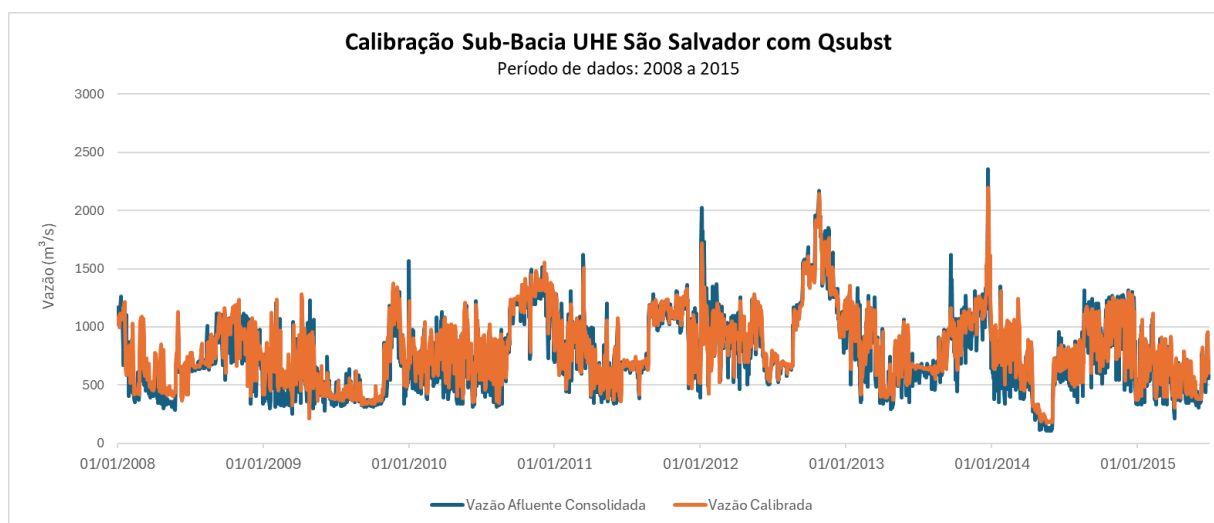


Figura 28 - Calibração sub-bacia UHE São Salvador com Q_{subst}
Fonte: Própria autora (2025)

Os indicadores de desempenho do modelo para as sub-bacias das UHEs Cana Brava e São Salvador foram calculados e estão apresentados na Tabela 11, permitindo avaliar a adequação dos parâmetros obtidos a partir da calibração da UHE Serra da Mesa.

Tabela 11 - Coeficientes da calibração com Q_{subst}

Sub-Bacia	Nash	Nash-log	ΔV
UHCB	0.871	-0.848	-3.353
UHSA	0.826	0.812	4.305

Fonte: Própria autora (2025)

Com a aplicação do Qsubst, o modelo passou a reproduzir de forma satisfatória o escoamento das sub-bacias a jusante, representando inclusive a manutenção do fluxo em períodos de estiagem em função das vazões defluentes dos reservatórios. O desempenho é confirmado pelos coeficientes de Nash, de 0,871 para a UHE Cana Brava e 0,826 para a UHE São Salvador, valores próximos de 1 que indicam elevada aderência entre as vazões calculadas e observadas.

Além disso, a boa representação obtida demonstra que os parâmetros calibrados a partir da UHE Serra da Mesa são adequados também para as unidades a jusante, mesmo em bacias com dinâmica complexa e fortemente influenciada por reservatórios. Assim, o modelo mostra-se uma ferramenta confiável para a análise hidrológica e o planejamento operacional, possibilitando avaliar alterações no regime de vazões e a propagação dos efeitos da operação das usinas ao longo da bacia.

5.2.3. Cálculo da vazão incremental entre aproveitamentos com suporte do Qsubst

Foi realizada uma estimativa da vazão incremental entre as UHEs da bacia, utilizando dados históricos da ANA e simulações com o Qsubst. Para a simulação, adotou-se um valor reduzido de defluência nas usinas montantes, de forma a isolar a contribuição da bacia incremental.

Os resultados indicam que a vazão proveniente da bacia incremental entre as usinas é significativa, evidenciando a relevância dessas contribuições para a operação das UHEs, conforme apresentado na Figura 29 e Figura 30. Essa análise fornece subsídios importantes para o planejamento operacional e o controle de cheias.

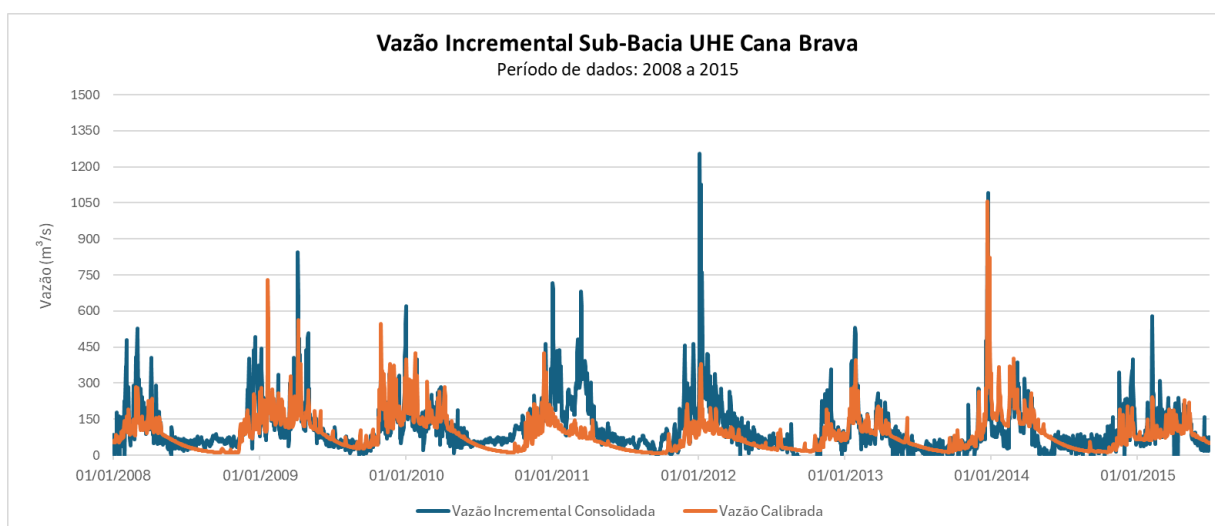


Figura 29 - Vazão incremental sub-bacia UHE Cana Brava
Fonte: Própria autora (2025)

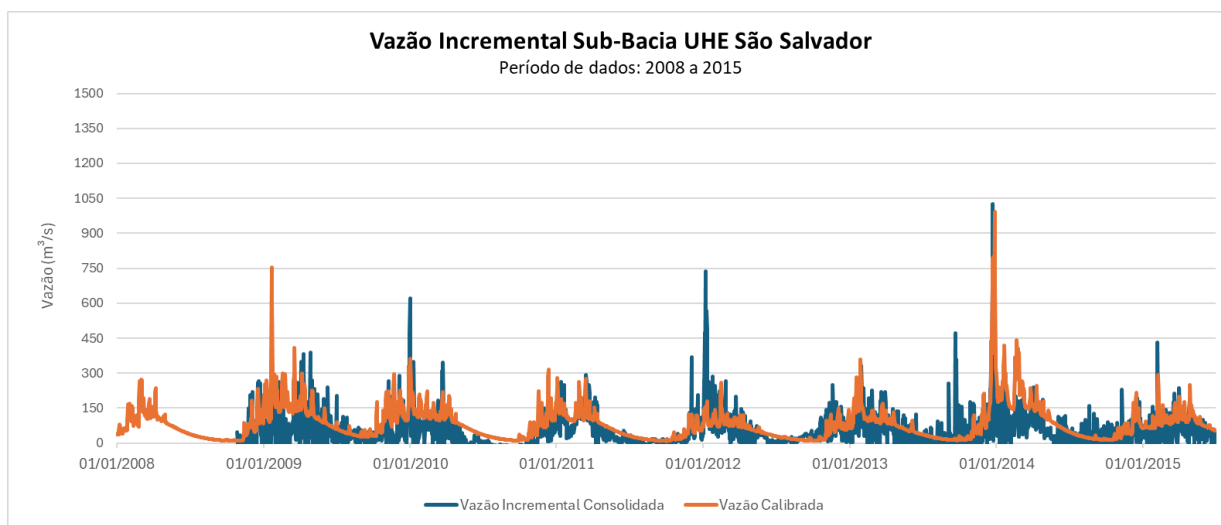


Figura 30 - Vazão incremental sub-bacia UHE São Salvador
Fonte: Própria autora (2025)

Apesar das falhas e variações nos dados históricos da ANA, incluindo valores negativos, as simulações realizadas com o modelo permitem obter uma estimativa realista do comportamento das vazões incrementais entre as UHEs, mesmo que os coeficientes de ajuste não apresentem bons valores (Tabela 12).

Tabela 12 - Coeficientes da calibração da vazão incremental nas sub-bacias

Sub-Bacia	Nash	Nash-log	ΔV
UHCB	-2.520	-19.350	-81.257
UHSA	-2.543	-22.645	-85.889

Fonte: Própria autora (2025)

Dessa forma, o modelo captura o padrão geral das vazões, fornecendo estimativas qualitativas confiáveis para o planejamento operacional e controle de cheias, sem reproduzir exatamente os valores observados.

5.2.4. Validação dos parâmetros calibrados

Após a calibração do modelo para o período de 2001 a 2015, procedeu-se à etapa de validação, na qual os parâmetros ajustados foram aplicados em um período independente, compreendendo os anos de 2016 a 2022. O objetivo desta verificação foi avaliar a robustez do modelo e a capacidade dos parâmetros calibrados de reproduzir o comportamento hidrológico em condições distintas daquelas utilizadas no ajuste inicial.

A simulação foi realizada com a aplicação do Qsubst, considerando as séries de vazões observadas disponibilizadas pela ANA. Os resultados indicam boa concordância entre as vazões simuladas e observadas para as sub-bacias da UHE Cana Brava e da UHE São Salvador, conforme ilustrado na Figura 31 e Figura 32.

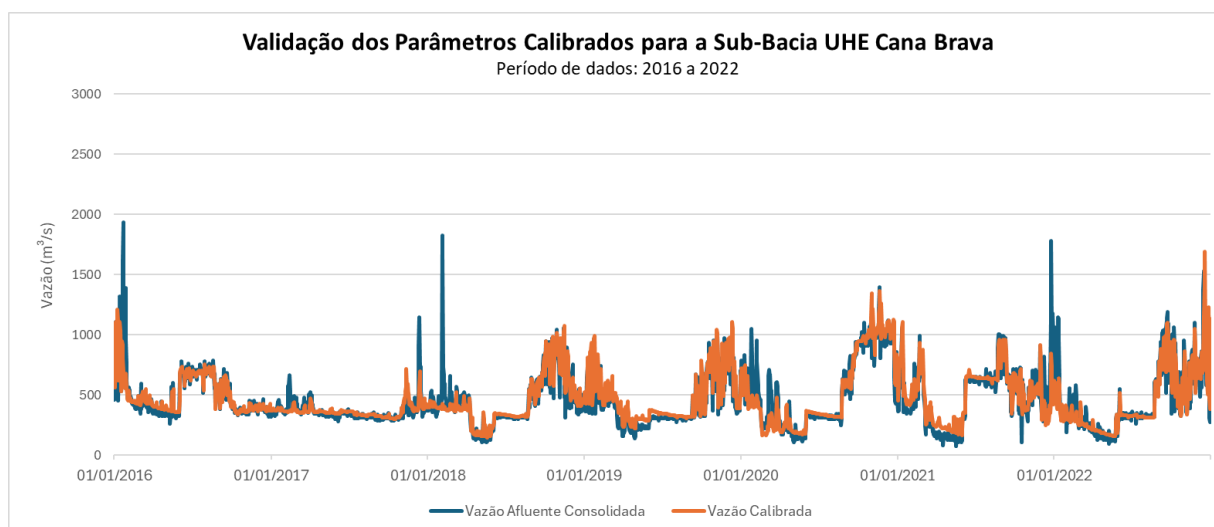


Figura 31 - Validação dos parâmetros calibrados para a sub-bacia UHE Cana Brava
Fonte: Própria autora (2025)

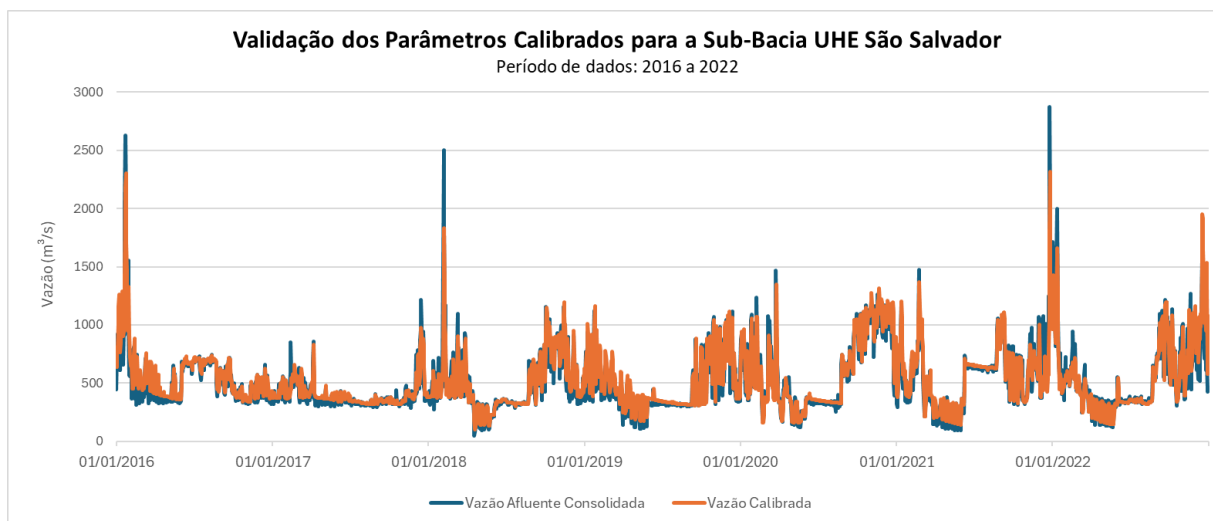


Figura 32 - Validação dos parâmetros calibrados para a sub-bacia UHE São Salvador
Fonte: Própria autora (2025)

A Tabela 13 apresenta os coeficientes de desempenho obtidos, que se mantiveram próximos aos valores da etapa de calibração, confirmando a consistência dos parâmetros ajustados. Os índices de Nash e Nash-log foram superiores a 0,77 para a UHCB e 0,84 para a UHSA, enquanto os erros de volume permaneceram baixos, reforçando a adequação do modelo.

Tabela 13 - Validação dos parâmetros calibrados

Sub-Bacia	Nash	Nash-log	ΔV
UHCB	0.778	0.821	1.063
UHSA	0.848	0.867	3.190

Fonte: Própria autora (2025)

Esses resultados demonstram que o conjunto de parâmetros calibrados a partir da UHE Serra da Mesa é capaz de representar adequadamente as vazões nas unidades a jusante em diferentes períodos, consolidando o modelo como ferramenta confiável para análise hidrológica e planejamento operacional.

5.3. Discussão dos Resultados

Os resultados alcançados neste estudo evidenciam que o MGB-IPH, quando calibrado de forma adequada, reproduz com boa fidelidade a variabilidade hidrológica da bacia do Alto Tocantins, especialmente no que se refere à propagação das vazões incrementais entre as usinas de Cana Brava e São Salvador. A análise dos coeficientes de desempenho demonstrou que o modelo apresentou ajustes satisfatórios, em linha com o que foi observado por Silva (2009) no rio São Francisco, que destacou a importância da calibração criteriosa para assegurar previsões consistentes em grandes bacias.

De forma semelhante, os resultados aqui obtidos também dialogam com os achados de Collischonn *et al.* (2007) na bacia do rio Uruguai, onde os autores observaram que a capacidade de representar eventos extremos de cheia depende fortemente da propagação da onda de vazão. No presente estudo, verificou-se que a incorporação das vazões observadas defluentes dos reservatórios a montante (Q_{subst}) aumentou significativamente a representatividade do modelo, permitindo simular a propagação fluvial de maneira mais realista.

Esse ajuste metodológico está em consonância com as melhorias propostas por Pontes *et al.* (2015), que ressaltaram os ganhos obtidos ao substituir o método Muskingum-Cunge pelo inercial no MGB-IPH, reforçando que o aprimoramento contínuo do módulo de propagação é decisivo para a acurácia das previsões. Adicionalmente, observa-se paralelismo com Fan *et al.* (2017), que, ao aplicar previsões operacionais de cheias no alto rio Uruguai, destacaram a relevância de representar corretamente as defluências dos reservatórios para antecipar cenários críticos. No presente estudo, a utilização das séries observadas em Serra da Mesa e Cana Brava cumpriu papel semelhante, permitindo ao modelo capturar com maior realismo as contribuições incrementais a jusante.

Resultados compatíveis também foram encontrados em outras grandes bacias nacionais: no rio Ji-Paraná (RO), a aplicação do MGB-IPH apresentou elevados valores de eficiência de Nash-Sutcliffe e baixo erro de volume, evidenciando a capacidade do modelo de representar a sazonalidade das vazões em diferentes trechos do rio (PAIVA *et al.*, 2013). De forma semelhante, no Alto Teles Pires (MT), a calibração e validação indicaram que o modelo reproduziu de maneira satisfatória tanto os eventos de cheia quanto as estiagens, com coeficientes de desempenho adequados e boa correspondência entre os hidrogramas simulados e observados (EMBRAPA, 2014).

Em síntese, a comparação com os trabalhos anteriores mostra que a aplicação do MGB-IPH no Alto Tocantins produziu resultados compatíveis com a literatura nacional, tanto em termos de métricas de calibração quanto de capacidade de simulação.

6. CONCLUSÕES

O presente estudo demonstrou a aplicabilidade do Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH) para simulação e previsão de vazões na bacia do Rio Tocantins, com foco nas Usinas Hidrelétricas de Cana Brava e São Salvador. O pré-processamento detalhado da bacia em mini-bacias e a definição das Unidades de Resposta Hidrológica (URHs), aliados à utilização de dados espaciais, fluviométricos, pluviométricos e climatológicos de qualidade, permitiram a construção de uma base robusta para a modelagem hidrológica, capaz de refletir a complexidade dos processos naturais e das interações com os reservatórios.

A calibração inicial do modelo na UHE Serra da Mesa, seguida da aplicação às sub-bacias da UHE Cana Brava e UHE São Salvador, evidenciou que os parâmetros ajustados reproduzem de forma satisfatória o escoamento em diferentes condições hidrológicas, mesmo em áreas fortemente influenciadas por reservatórios. Os coeficientes de Nash e Nash-log, indicadores de quão próximas as vazões simuladas estão das observadas, demonstraram elevada aderência, enquanto os erros de volume permaneceram baixos, evidenciando a confiabilidade do modelo. A validação realizada para o período de 2016 a 2022 reforçou a consistência e a robustez dos parâmetros calibrados, mostrando que o MGB-IPH é capaz de representar com precisão a dinâmica hídrica da bacia em períodos distintos daqueles utilizados na calibração.

Os resultados obtidos indicam que o modelo ajustado constitui uma ferramenta eficiente para previsão de vazões e apoio à gestão operacional das usinas, permitindo antecipar situações críticas, subsidiar decisões preventivas e contribuir para a segurança das estruturas. A análise da vazão incremental entre aproveitamentos destacou a relevância das contribuições das sub-bacias para a operação das UHEs, fortalecendo o planejamento e o controle de cheias. Além disso, os coeficientes de desempenho apresentaram valores satisfatórios, confirmando a proximidade entre as vazões simuladas e observadas, enquanto os erros de volume permaneceram baixos, reforçando a confiabilidade do modelo tanto em termos de ajuste estatístico quanto de capacidade de simulação hidrológica.

De forma complementar, verificou-se que os resultados obtidos no Alto Tocantins se alinham ao desempenho já observado em outras grandes bacias brasileiras, confirmando a consistência do MGB-IPH e a importância da calibração criteriosa para

garantir previsões robustas. Dessa forma, conclui-se que a metodologia desenvolvida se mostra aplicável também em estudos de gestão de riscos, análises de cenários hidrológicos e simulações de eventos extremos, consolidando o MGB-IPH como um instrumento estratégico tanto para a gestão sustentável dos recursos hídricos quanto para a operação segura e eficiente do sistema hidrelétrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M. E.; MEYER, A. O.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D. **Manual de aplicação do modelo MGB utilizando o IPH-HYDRO Tools, 2020**. Manual Técnico, HGE, IPH, UFRGS, 2020.

ANA. **Relatório de análise de impacto regulatório N° 1/2020/CORSH/SOE Documento n° 02500.054561/2020-75**, 2020. Disponível em: <https://participacao-social.ana.gov.br/api/files/Relatorio_de_AIR_-_Sistema_Hidrico_do_Rio_Tocantins-1607537134591.pdf>. Acesso em: 15 maio de 2023.

ANEEL. **Quantidade de empreendimentos de geração de energia em operação**. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/empreendimentos-em-operacao?utm_source>. Acesso em: 08 de maio de 2025.

BEVEN, K. **Rainfall-runoff modelling: the primer**. John Wiley & Sons, 2012.

BRAVO, J. M., **Subsídios à operação de reservatórios baseada na previsão de variáveis hidrológicas**. Tese de Doutorado - Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

BREMICKER, M. **Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells für das Weser und das Ostsee Einzugsgebiet als Baustein eines AtmosphärenHydrologie-Modells**. 1998. Dissertation - Geowissenschaftlicher Fakultät, Albert-LudwigsUniversität. Freiburg. Juli, 1998.

BUBA, H.; ARAUJO, A. N.; OLIVEIRA, A. G. de. **Avanços no monitoramento da operação de reservatórios da Copel**. Revista Técnica do Instituto de Engenharia do Paraná. Ano I – número 3, 2011.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Clarendon. Oxford. 194p. 1986.

CARDOSO, R. S. et al. **Avaliação dos recursos hídricos e do potencial energético da bacia hidrográfica do rio Tocantins**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017, Florianópolis. Anais. Florianópolis: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2017.

CEMADEN. **Situação atual e projeção hidrológica para o reservatório de Serra da Mesa – Bacia do rio Tocantins – 12/04/2022 – Ano 3 N° 23**, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/rede-mcti/cemaden/conteudo/monitoramento/monitoramento-hidrologico/relatorio-serra-da-mesa/situacao-atual-e-projecao-hidrologica-para-o-reservatorio-de-serra-da-mesa-bacia-do-rio-tocantins-12-04-2022-ano-3-no-23>>. Acesso em: 02 ago. 2025.

CEPEL. **Manual PREVIVAZ: Previsão de Vazões para Reservatórios Hidrelétricos**. Rio de Janeiro: CEPEL. 2015.

CEPEL. **Modelo DESSEM**, 2023. Disponível em: <https://www.cepel.br/wp-content/uploads/2024/01/DESSEM_ManualMetodologia_Outubro2023.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2025.

CHAUVIN, C., et al. **Hidrologia de pequenas bacias hidrográficas**. Éditions Quae, 2011.

COLLISCHONN, W.; PILAR, J. V.; CRUZ, M. A. S.; MENDIONDO, E. M.; MENDES, C. A. B. **Simulação hidrológica utilizando o hidrograma unitário derivado do modelo numérico do terreno**. 1999. Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, 1999.

COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. 2001. 270f. Tese (Doutorado em Engenharia). Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

COLLISCHONN, W. et al. **Previsão sazonal de vazões na bacia do rio Paraná com base em modelos de séries temporais**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 6, n. 2, p. 81-94, 2001.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 6, n. 1, p. 95-118, 2001.

COLLISCHONN, W.; BRAVO, J. M.; SILVA, B. C.; RODRIGUEZ, D. A. Modelagem hidrológica. In: LIMA, J. W. M.; COLLISCHONN, W.; MARENGO, J. A. (orgs.) **Efeitos das mudanças climáticas na geração de energia elétrica**. 1 ed. São Paulo: AES Tietê, 2014. p. 95-143.

CUNHA, T. J. S. M. et al. **Mapeamento e caracterização de solos de várzea do rio Tocantins**. 2018. Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 48, n. 1, p. 11-18, 2018.

DOWNER, C. W., & OGDEN, F. L. **GSSHA: Gridded Surface/Subsurface Hydrologic Analysis**. Journal of Hydrologic Engineering, 2006.

EASTMAN, J. R. **Idrisi for Windows users guide**. Clark University. Worcester. 1995.

ECHEVERRIA, C.; BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W. **Aplicação do modelo hidrológico MGB-IPH na bacia transfronteiriça do rio Apa**. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011.

EMBRAPA. **Modelagem hidrológica utilizando o Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH): estudo de caso da bacia hidrográfica do Alto Teles Pires**. Brasília: Embrapa, 2014.

ENGIE. Engie Brasil Energia. Disponível em: <<https://www.engie.com.br/atividades/geracao-de-energia/>>. Acesso em: 20 de maio de 2023.

EPE. Plano Decenal de Expansão de Energia 2033, 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2033>>. Acesso em: 10 maio 2025.

FAN, F. M. **Acoplamento entre SIG e modelos hidrológicos: Integração do modelo MGB-IPH**. 2011. Dissertação (Pós- Graduação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

FAN, F. M. **Simulação dos impactos de lançamentos de poluentes sobre a qualidade da água de bacias hidrográficas integrada com sistema de informação geográfica**.

2013. Dissertação (Pós- Graduação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

FAN F. M., BUARQUE D. C., PONTES, P.R.M., COLLISCHONN W. **Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul**. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Novembro de 2015, Brasília-DF. Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. PAP019919. 2015.

FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W. **Evaluation of upper Uruguay river basin (Brazil) operational flood forecasts**. Brazilian Journal of Water Resources, v. 22, 2017.

FELIX, V. S.; PAZ, A. R. **Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída**. Brazilian Journal of Water Resources, v.21, n. 3, p. 556-569, 2016.

FEMA. **HEC-HMS Hydrologic Modeling System**. U.S. Army Corps of Engineers, 2015.

GAREN, D. C. **Extended Streamflow Prediction (ESP) and Water Supply Forecasting**. Water Resources Research, 2345–2356, 1992.

HUFFMAN, G. J. et al. **Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG), Version 07**. NASA Goddard Space Flight Center, 2019.

JUNK, W. J. et al. **Biodiversity and its conservation in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil**. 2011. Aquatic Sciences, v. 74, n. 3, p. 375-402, 2011.

LIANG, X.; LETTENMAIER, D.; WOOD, E. F. & BURGE, S. J. **A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models**. Journal of Geophysical Research, v. 99, n° D7 p. 14.415-14.428, July, 1994.

MACHADO, D. B. et al. **Avaliação da influência da cobertura vegetal na resposta hidrológica de bacias hidrográficas na bacia do Rio Tocantins**. 2016. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 9, n. 1, p. 107-122, 2016.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI**. Brasília: MMA, 2006.

MEES, Alexandre. Unidade 1: Reservatórios. **Qualidade de Água em Reservatórios**, 2020. Disponível:

<https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/2205/1/Unidade_1.pdf>.

Acesso em: 10 maio 2023.

MIRANDA, L. E. **Environment and conservation in the Pantanal of Mato Grosso**. 2006. Aquatic Sciences, v. 68, n. 3, p. 375-386, 2006.

MOORE, R. J. **Forecasting runoff volumes for water supply reservoirs**. 2010. Journal of Hydrology, v. 385, n. 1-4, p. 306-312, 2010.

- MOSAVI, A., OZTURK, P., & CHAU, K. W. **Flood Prediction Using Machine Learning Models: Literature Review**. Water, 1536, 2018.
- NASCIMENTO, A. R. et al. **Avaliação do desempenho do GPM-IMERG na bacia Tocantins - Araguaia**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 38, n. 2, 2023.
- OLIVEIRA, R. F. **Calibração e validação do modelo de grandes bacias MGB-IPH para a bacia do Alto Teles Pires**. Trabalho Final de Graduação (Engenharia Agrícola e Ambiental). Universidade Federal de Mato Grosso. Mato Grosso, 2016.
- ONS. **Conceitos e Metodologias Para a Operação Hidráulica Dos Reservatórios**. Rio de Janeiro, 2016.
- ONS. **Operação da Usina de Furnas e o Sistema Interligado Nacional**. Brasília, 2022.
- OSN. **O que é o Sistema Interligado Nacional (SIN)**. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: 10 maio 2025.
- ONS. **Relatórios anuais e informações sobre o parque hidrelétrico brasileiro, 2025**. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>. Acesso em: 08 ago. 2025.
- ONS. **SIN Maps**, 2025. Disponível em: <<https://sig.ons.org.br/app/sinmaps/>>. Acesso em: 08 ago. 2025.
- PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M. **Simulação hidrológica de grandes bacias: aplicação do MGB-IPH na bacia do rio Ji-Paraná (RO)**, 2013. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 20. Bento Gonçalves. Porto Alegre: ABRH, 2013.
- PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C. **Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões**. Brazilian Journal of Water Resources, v.20, n. 4, p. 888-904, 2015
- PONTES, F., SANTOS, M., & OLIVEIRA, R. **Avaliação do modelo MGB-IPH com método inercial para propagação de cheias**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 451-462, 2015.
- RAWLS, W. J.; AHUJA, L. R.; BRAKENSIEK, D. L. & SHIRMOHAMMADI, A. **Infiltration and soil water movement**. 1993. In: Maidment, D. Handbook of hydrology.
- RIBEIRO NETO, A. **Simulação hidrológica na Amazônia: bacia do rio Madeira**. 2006. 195f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- RODRIGUES, D. J. et al. **Influência de fatores ambientais na diversidade de peixes da bacia do Rio Tocantins, Brasil**. 2013. Biota Neotropica, v. 13, n. 2, p. 152-160, 2013.

- SANTOS, C. A. et al. **Características morfológicas, físicas e químicas do solo em diferentes sistemas de uso na região de Palmas, TO.** 2017. Caderno de Ciências Agrárias, v. 9, n. 2, p. 23-30, 2017.
- SILVA, F. G. et al. **Modelagem hidrológica em grande escala: aplicação do modelo de grandes bacias MGB-IPH na bacia do Alto Paraguai.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 33, n. 3, p. 413-424, 2018.
- SILVA, M. M. A. P. de M. **Modelagem da qualidade da água na bacia do rio Piracicaba - MG.** 2014. 164f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- SHUTTLEWORTH, W. J. **Evaporation.** In: Maidment, D. Handbook of hydrology. 1993. Chapter 4. McGraw-Hill.
- SOARES, M. A. M. **Uso de modelagem hidrológica para análise do regime de vazões na bacia do Rio Tocantins.** 2009. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 14, n. 2, p. 85-97, 2009.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos.** 1998. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – ABRH. p. 669.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação.** 2009. 4.ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH.
- USACE. **EM 1110-2-3600: Management of Water Control Systems.** [S.l.], p. 184. 1987.
- VERGARA, H., et al. **A coupled hydrologic–biogeochemical model and its application to the development of environmental flow indicators.** 2018. Ecological Indicators, v. 94, p. 491-502, 2018.
- WIGMOSTA, M. S.; VAIL, L. W. & LETTENMAIER, D. P. **A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain.** 1994. Water Resources Research v. 30, n° 6, p. 1665-79.
- YEH, W. W. G. **Reservoir management and operation models: a state-of-the-art review.** Water Resour. Res., v. 21, p. 1797 - 1818, 1985.
- ZAMBELLI, M. S. **Planejamento da Operação Energética Via Curvas-Guias de Armazenamento.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, 2006.

ANEXO A - METODOLOGIA MGB-IPH

BALANÇO DE ÁGUA NO SOLO

A avaliação do balanço hídrico no solo é conduzida de maneira individual para cada bloco de uso, utilizando as características e os parâmetros específicos do respectivo bloco. A Figura 33 ilustra visualmente esse processo, enquanto a Equação 1 oferece uma descrição quantitativa do balanço na camada de solo.

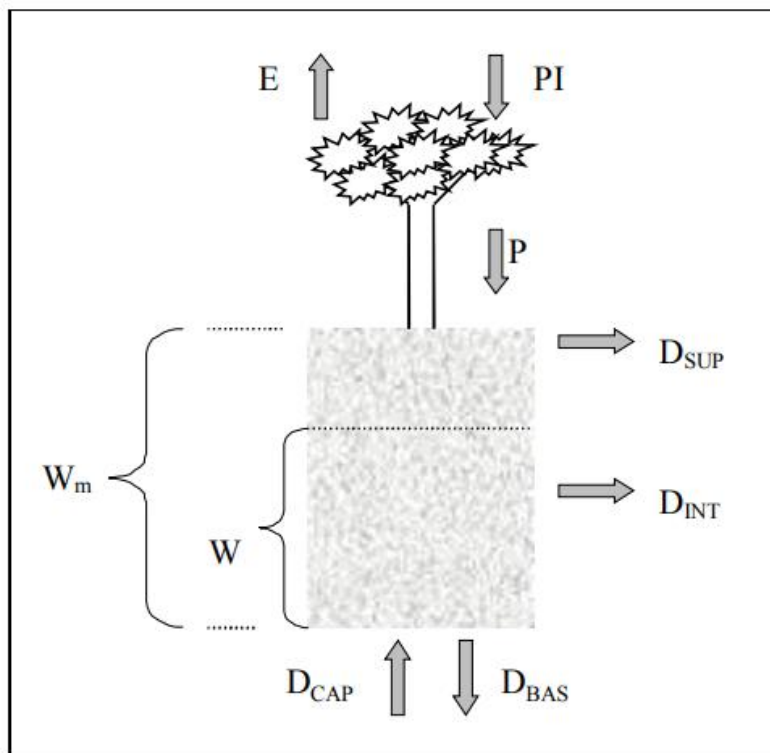


Figura 33 - Esquema do balanço de água vertical na camada de solo

Fonte: Collischonn (2001)

$$W_2 = W + P - T - D_{SUP} - D_{INT} - D_{BAS} + D_{CAP} \quad (1)$$

onde:

W_2 [mm]: armazenamento na camada de solo ao final do intervalo de tempo;

W [mm]: armazenamento na camada de solo ao início do intervalo de tempo;

P [mm]: precipitação incidente (PI) menos a interceptação (I) ao longo do intervalo de tempo;

T [mm]: evapotranspiração da água da camada de solo ao longo do intervalo de tempo;

D_{SUP} [mm]: escoamento superficial ao longo do intervalo de tempo (drenagem rápida);

D_{INT} [mm]: escoamento superficial ao longo do intervalo de tempo (drenagem rápida);

D_{BAS} [mm]: escoamento subterrâneo ao longo do intervalo de tempo (drenagem muito lenta);

D_{CAP} [mm]: fluxo do reservatório subterrâneo para a camada superficial do solo.

O intervalo de tempo considerado é de 1 dia.

Escoamento superficial

O escoamento superficial é caracterizado por ser rápido e direto, referindo-se ao fluxo de água que alcança prontamente a rede de drenagem. Esse tipo de escoamento é calculado sob a premissa de que toda a chuva que incide sobre uma parcela de solo já saturada de umidade resulta em escoamento superficial.

O modelo considera que existe uma relação entre o armazenamento na camada do solo no início do intervalo de tempo e a porcentagem de área saturada através das Equações (2), (3) e (4).

$$D_{SUP} = P - (W_m - W) \quad (2)$$

quando $\delta \leq 0$ e por:

$$D_{SUP} = P - (W_m - W) + W_m \cdot (\delta)^{b+1} \quad (3)$$

quando $\delta > 0$, onde:

$$\delta = \left[\left(1 - \frac{W}{W_m} \right)^{\frac{1}{b+1}} - \frac{P}{(b+1) \cdot W_m} \right] \quad (4)$$

onde:

W [mm]: armazenamento na camada do solo;

W_m [mm]: armazenamento máximo na camada do solo;

b : parâmetro adimensional que representa a não-uniformidade da capacidade de armazenamento do solo no bloco;

P [mm]: precipitação menos a interceptação;

D_{SUP} [mm]: escoamento superficial (drenagem rápida).

Escoamento sub-superficial

O escoamento sub-superficial é identificado como um fluxo de velocidade intermediária, mais lento do que o escoamento superficial, porém mais rápido do que o escoamento subterrâneo. Para descrever essa modalidade de escoamento, o modelo emprega uma relação análoga à proposta por Brooks e Corey (RAWLS *et al.*, 1993), a qual correlaciona a condutividade hidráulica do solo com a sua textura.

A relação de Brooks e Corey é não-linear em relação à umidade do solo, sendo notável que a taxa de drenagem é consideravelmente maior quando o solo está próximo da saturação, em contraste com situações em que o solo se apresenta seco, de acordo com a Equação (5).

$$D_{INT} = K_{INT} \cdot \left(\frac{W - W_Z}{W_M - W_Z} \right)^{\left(3 + \frac{2}{XL}\right)} \quad (5)$$

onde,

W_Z [mm]: limite de armazenamento para haver escoamento sub-superficial;

K_{INT} [mm]: parâmetro de escoamento subsuperficial;

XL : índice de porosidade do solo (parâmetro);

D_{INT} [mm]: escoamento subsuperficial.

O parâmetro K_{INT} é calibrado e o índice XL é fixado em 0,4, que é uma média para diferentes tipos de solo. Quando W é menor do que W_Z não há escoamento sub-superficial.

Escoamento subterrâneo

O escoamento subterrâneo é calculado através da Equação (6), equação linear com relação ao armazenamento no solo.

$$D_{BAS} = K_{BAS} \cdot \left(\frac{W - W_C}{W_M - W_C} \right) \quad (6)$$

onde,

W_C [mm]: limite de armazenamento no solo para haver escoamento subterrâneo;

K_{BAS} [mm]: parâmetro de escoamento subterrâneo;

D_{BAS} [mm]: escoamento subterrâneo.

Quando W é menor do que W_c não há escoamento subterrâneo.

Geralmente, os valores de W_z e W_c são fixados em cerca de um décimo do valor de W_M , com a finalidade de prevenir a ocorrência de escoamento negativo, e tais parâmetros não são levados em consideração durante o processo de calibração. Em algumas circunstâncias, quando o armazenamento de água no solo é baixo, ocorre a transferência de água do reservatório subterrâneo para a camada de solo. Essa funcionalidade possibilita que o modelo simule situações em que as águas subterrâneas são novamente disponibilizadas para a evapotranspiração. A Equação (7) detalha o fluxo ascendente:

$$D_{cap} = \frac{W_c - W}{W_c} \cdot DM_{cap} \quad (7)$$

onde,

W_c [mm]: limite de armazenamento para haver fluxo ascendente;

D_{cap} [mm]: fluxo ascendente;

DM_{cap} [mm]: máximo fluxo ascendente para o solo (parâmetro do modelo).

EVAPOTRANSPIRAÇÃO

O modelo emprega o cálculo da evaporação e transpiração através da equação de Penman-Monteith (Equação 8), em uma abordagem semelhante à adotada por Wigmosta *et al.* (1994).

$$e = \left(\frac{\Delta \cdot (R_L - G) + \rho_A \cdot c_p \cdot \frac{(e_s - e_d)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \right) \cdot \frac{1}{\lambda \cdot \rho_w} \quad (8)$$

onde,

e [$m \cdot s^{-1}$]: taxa de evaporação da água;

λ [$Mj \cdot kg^{-1}$]: calor latente de vaporização

$\Delta [kPa \cdot ^\circ C^{-1}]$: taxa de variação da pressão de saturação do vapor;

$R_L [Mj \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$: radiação líquida na superfície;

$G [Mj \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$: fluxo de energia para o solo;

$\rho_A [kg \cdot m^{-3}]$: massa específica do ar;

$\rho_w [kg \cdot m^{-3}]$: massa específica da água;

$c_p [Mj \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}]$: calor específico do ar úmido;

$e_s [kPa]$: pressão de saturação do vapor;

$e_a [kPa]$: pressão do vapor;

$\gamma [kPa \cdot ^\circ C^{-1}]$: constante psicrométrica;

$r_s [s \cdot m^{-1}]$: resistência superficial da vegetação;

$r_a [s \cdot m^{-1}]$: resistência aerodinâmica.

Esta formulação tem uma forte base física, o que permite representar as alterações de evapotranspiração associadas às mudanças de uso do solo, embora para isso sejam necessários dados específicos para cada tipo de vegetação, que não estão normalmente disponíveis.

A energia disponível para a evapotranspiração é inicialmente utilizada para evaporar a água interceptada, a qual se encontra armazenada nas folhas, caules e ramos da vegetação, bem como diretamente sobre o solo. Caso ainda haja energia disponível após a etapa de evaporação, essa energia será destinada à transpiração.

ESCOAMENTO NAS CÉLULAS

Os termos D_{SUP} , D_{INT} e D_{BAS} se referem ao fluxo que emerge da camada de solo. Este fluxo não alcança imediatamente a rede de drenagem, experimentando um atraso e amortecimento dentro da própria célula. Esses efeitos são representados no modelo por meio do encaminhamento do fluxo através de reservatórios lineares, como mostrado na Figura 34.

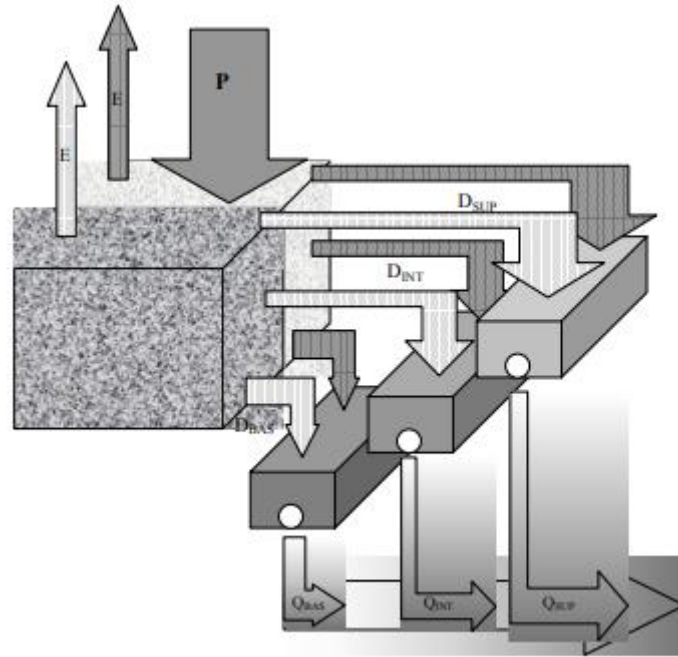


Figura 34 - Estrutura de cálculo de uma célula com dois blocos

Fonte: Collischonn (2001)

O fluxo superficial é direcionado para o reservatório superficial, o fluxo subsuperficial é direcionado para o reservatório subsuperficial e o fluxo subterrâneo é direcionado para o reservatório subterrâneo. É nesses reservatórios que o fluxo proveniente dos diversos blocos de uso e cobertura vegetal se encontram.

Cada um dos reservatórios é representado matematicamente pelas Equações (9), (10) e (11) de reservatório linear simples. A soma dos valores de D_{SUP} , D_{INT} e D_{BAS} é o escoamento da célula.

$$Q_{SUP} = \frac{1}{TK_S} \cdot V_{SUP} \quad (9)$$

$$Q_{INT} = \frac{1}{TK_I} \cdot V_{INT} \quad (10)$$

$$Q_{BAS} = \frac{1}{TK_B} \cdot V_{BAS} \quad (11)$$

onde,

$Q_{SUP} [m^3 \cdot s^{-1}]$: vazão de saída do reservatório superficial;

$Q_{INT} [m^3 \cdot s^{-1}]$: vazão de saída do reservatório sub-superficial;

$Q_{BAS} [m^3 \cdot s^{-1}]$: é a vazão de saída do reservatório subterrâneo;

$V_{SUP} [m^3]$: volume no reservatório superficial;

$V_{INT} [m^3]$: volume no reservatório sub-superficial;

$V_{BAS} [m^3]$: volume no reservatório subterrâneo;

$TK_S [s]$: parâmetro de retardo do reservatório superficial;

$TK_I [s]$: parâmetro de retardo do reservatório sub-superficial;

$TK_B [s]$: parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo.

O valor do parâmetro TK_B pode ser obtido analisando os períodos de recessão do hidrograma e em alguns locais da bacia. As Equações (12) e (13) mostram como é obtido o valor de TK_B a partir de dados observados.

$$TK_B = C_B \cdot 86400 \quad (12)$$

$$C_B = \frac{ND}{\ln\left(\frac{Q_{ND}}{Q_0}\right)} \quad (13)$$

onde,

$C_B [dias]$: parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo;

ND : número de dias do período de recessão do hidrograma;

Q_{ND} : vazão no início da recessão;

Q_0 : vazão no final da recessão.

Os valores de TK_S e TK_I são determinados com base nas características topográficas da célula, de acordo com as Equações (14), (15) e (16). A calibração, proposta por Bremicker (1998), relaciona esses parâmetros de retardo ao relevo. Isso exige um modelo numérico de terreno com resolução menor do que o modelo hidrológico.

No estudo, o modelo hidrológico tem resolução de 10 x 10 km, enquanto os modelos numéricos de terreno (MNT) têm resolução de 1 x 1 km ou 100 x 100 m. Para cada célula, é calculado um tempo de retardo característico, ajustado na calibração por um coeficiente adimensional. O tempo de retardo é obtido via equação de Kirpich, considerando a diferença de elevação entre o ponto mais alto e mais baixo do MNT na célula.

$$TK_S = C_S \cdot T_{ind} \quad (14)$$

$$TK_I = C_I \cdot T_{ind} \quad (15)$$

$$T_{ind} = 3600 \cdot \left(0,868 \cdot \frac{L^3}{\Delta H} \right)^{0,385} \quad (16)$$

onde,

T_{ind} [s]: tempo de retardo característico da célula;

C_S : um parâmetro adimensional para calibração do escoamento superficial;

C_I : parâmetro adimensional para calibração do escoamento sub-superficial.

L [km]: largura da célula;

ΔH [m]: diferença de altura entre os extremos mais alto e mais baixo da célula.

Os atrasos no fluxo dentro da célula não estão relacionados à sua propagação ao longo dela. A propagação através dos principais rios é conduzida de maneira independente, como será descrito a seguir.

ESCOAMENTO NA REDE DE DRENAGEM

As células em que é dividida a bacia do modelo estão ligadas pela rede de drenagem, e cada célula escoar para uma de suas oito vizinhas., conforme Figura 35. O modelo diferencia células fonte, localizadas nas cabeceiras dos cursos d'água, e células com curso de água. As células fonte não tem nenhuma célula a montante, já as células com curso d'água estão a jusante de pelo menos uma célula.

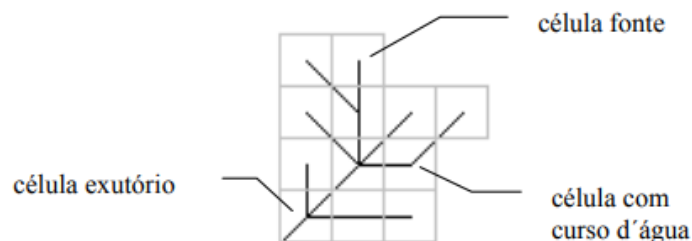


Figura 35 - Discretização de uma bacia em células e a rede de drenagem
Fonte: Collischonn (2001)

O modelo utiliza o método de Muskingum-Cunge (TUCCI, 1998) para propagar o fluxo nos segmentos de rios, relacionando a vazão de saída de um trecho de rio em um intervalo de tempo com as vazões de entrada e saída no intervalo de tempo anterior e a vazão de entrada atual.

Os parâmetros do método são calculados com base nos dados de comprimento, declividade, rugosidade e largura média dos trechos de rio. O comprimento e a declividade são obtidos a partir de mapas topográficos, a largura é determinada por uma relação com a área de drenagem da bacia e a rugosidade é estimada usando observações locais, fotos e informações sobre o material do leito.

Durante a propagação pelo sistema de drenagem, o intervalo de tempo diário é subdividido em intervalos menores para garantir precisão no tempo de viagem e amortecimento do hidrograma, conforme Tucci (1998). Esse processo é essencial para capturar com precisão a dinâmica do fluxo na rede de drenagem.

PARÂMETROS DO MODELO

A modelagem hidrológica utilizando o modelo MGB-IPH inclui uma série de etapas prévias nos quais as informações da bacia e das variáveis hidrológicas são obtidas e os dados de entrada preparados no formato adequado para leitura pelo modelo. Essa fase de preparação dos dados é de vital importância, pois a qualidade do ajuste obtido durante a calibração do modelo depende da acurácia dessas informações. (ECHEVERRIA *et al.*, 2011)

No que diz respeito ao modelo MGB-IPH, a maioria dos parâmetros está ligada à configuração topográfica da bacia, enquanto alguns são estabelecidos diretamente no código fonte do modelo, abrangendo aspectos como o fluxo da água pelo solo (COLLISCHONN *et al.*, 2014). No entanto, nem todos esses parâmetros podem ser diretamente mensurados, o que torna essencial calibrá-los de forma apropriada, a fim de que se adequem às características reais da área de estudo. Existem dois tipos de parâmetros no modelo: fixos e calibráveis.

Parâmetros fixos

Possuem valores que podem ser medidos, relacionados à vegetação, ou que não interferem profundamente nos resultados. Segundo Collischonn (2001), os elementos fixos no modelo MGB-IPH compreendem:

- Índice de Área Foliar (IAF)

O IAF expressa a relação entre a área das folhas de todas as plantas e da área de uma parcela de solo. O valor do IAF depende da vegetação, e valores típicos vão de 1,0 ou menos para vegetação rasteira, até 6,0 ou mais para florestas, conforme a Tabela 14.

Tipo de cobertura	IAF	Fonte
Coníferas	6	Bremicker (1998)
Soja irrigada	7,5*	Fontana et al. (1992)
Soja não irrigada	6,0*	Fontana et al. (1992)
Arros de sequeiro	6,0*	Oliveira e Machado (1999)
Floresta amazônica	6 a 9,6*	Honzák et al. (1996)
Pastagem amazônica (estiagem)	0,5	Roberts et al. (1996)
Pastagem amazônica (época úmida)	3,9	Roberts et al. (1996)
Savana africana (região semi-árida – Sahel)	1,4*	Kabat et al. (1997)
Cerrado (estiagem)	0,4	Miranda et al. (1996)
Cerrado (época úmida)	1,0	Miranda et al. (1996)

* valor máximo durante o ciclo anual

Fonte: Collischonn (2001)

Para as culturas anuais é importante procurar representar o ciclo anual do IAF. Este tipo de vegetação, como a soja, atinge valores máximos do IAF quando o desenvolvimento da planta é máximo permanecendo pelo período aproximado de um a dois meses, e muda bruscamente quando ocorre a colheita. Após a colheita, o IAF é considerado relativamente baixo, mas os valores mínimos ocorrem durante o preparo do solo.

A Equação (17) expressa a relação entre a capacidade de interceptação e o índice foliar (IAF) utilizada no modelo.

$$S_{IL} = F_i \cdot IAF \quad (17)$$

onde,

S_{IL} [mm]: capacidade do reservatório de interceptação;

IAF : índice de área foliar (adimensional);

F_i [mm]: parâmetro de lâmina máxima de interceptação. O valor de F_i é fixado em 0,2 mm, conforme Wigmosta et al. (1994).

- Albedo

O albedo corresponde à fração da radiação solar que é refletida ao alcançar a superfície do solo, levando em conta a vegetação presente. A Tabela 15 mostra os valores médios diários de albedo frequentemente empregados para amplas categorias de cobertura vegetal.

Tabela 15 - Valores de albedo médio diário

Cobertura	Albedo
Água	0,08
Florestas altas	0,11 a 0,16
Cultivos agrícolas altos (cana de açúcar)	0,15 a 0,20
Cultivos agrícolas baixos (trigo, soja)	0,20 a 0,26
Gramma e pastagens	0,20 a 0,26
Solo nu	0,10 (úmido) a 0,35 (seco)
Neve e gelo	0,20 (velha) a 0,80 (nova)

Fonte: Shuttleworth (1993)

O valor do albedo de uma região agrícola pode variar de acordo com a fase do ciclo de cultivo, alternando assim entre o solo lavrado e recém semeado, praticamente nu, e a fase de crescimento e maturação, atingindo os valores apresentados na Tabela 15. Em regiões com uma destacada época seca sazonal, o albedo de pastagens também pode aumentar, atingindo valores mais próximos ao do solo nu (Tabela 16).

Tabela 16 - Valores de albedo de algumas coberturas vegetais típicos do Brasil

Cobertura	Albedo	
Cerrado (estiagem)	0,18	Miranda et al. (1996)
Cerrado (época úmida)	0,13	Miranda et al. (1996)
Floresta amazônica	0,134	Wright et al. (1996)
Pastagem amazônica	0,18	Wright et al. (1996)

Fonte: Collischonn (2001)

- Resistência superficial

A resistência superficial representa a resistência ao fluxo de umidade do solo, através das plantas, até a atmosfera. Esta resistência é diferente para os diversos tipos de plantas e depende de variáveis ambientais como a umidade do solo, a temperatura do ar e a radiação recebida pela planta.

A resistência superficial da vegetação depende da disponibilidade de água no solo. Em condições favoráveis, ou seja, sem déficit hídrico, os valores de resistência superficial são mínimos. Nestas condições a resistência superficial estimada de alguns tipos de vegetação é apresentada na Tabela 17 abaixo.

Tabela 17 - Resistência superficial de diversos tipos de vegetação em condições de boa disponibilidade de água no solo

Cobertura do solo	Resistência superficial sem déficit ($r_{seco} - s \cdot m^{-1}$)	Referência
Floresta	100	Shuttleworth (1993)
Cerrado	100 a 200	Conde (1997)
Cultura	40	Bremicker (1998)
Trigo	40	Bremicker (1998)
Campo	40 a 80	Bremicker (1998)
Grama	69	Shuttleworth (1993)
Grama	71	Todorovic (1999)
Savana africana	60	Blyth (1997)
Savana africana com arbustos (tiger bush)	98	Blyth (1997)
Millet	154	Blyth (1997)

Fonte: Collischonn (2001)

Durante períodos de estiagem mais longos, a umidade do solo vai sendo retirada por transpiração e, à medida que o solo vai perdendo umidade, ocorre o *stress* hídrico, isto é, a transpiração diminui, mas a redução não ocorre imediatamente. Para valores de umidade do solo entre a capacidade de campo e um limite, que vai de 50 a 80% da capacidade de campo, a evapotranspiração não é afetada pela umidade do solo. A partir deste limite a evapotranspiração é diminuída, atingindo o mínimo – normalmente zero – no ponto de murcha (Shuttleworth, 1993).

De acordo com o modelo proposto por Wigmosta *et al.* (1994), esta diminuição da evapotranspiração com a redução da umidade do solo ocorre pelo aumento da resistência superficial. A resistência superficial original é alterada por um coeficiente de

ajuste (F_4), de acordo com a Equação (18). O coeficiente é igual a 1, da saturação até um limite mínimo de armazenanto no solo (W_L), a partir do qual seu valor começa a aumentar, Equação (19).

$$r_{su} = F_4 \cdot r_s \quad (18)$$

onde,

$$\frac{1}{F_4} = \frac{W - W_{PM}}{W_L - W_{PM}} \text{ para } W \leq W_L \quad (19)$$

onde,

$r_{su} [s \cdot m^{-1}]$: resistência superficial considerando a umidade do solo;

$r_u [s \cdot m^{-1}]$: resistência superficial em boas condições de umidade do solo;

F_4 : coeficiente de ajuste da resistência superficial;

$W [mm]$: armazenamento do solo;

$W_{PM} [mm]$: armazenamento do solo no ponto de murcha;

$W_L [mm]$: armazenamento em que inicia o efeito sobre a resistência superficial.

Conforme Shuttleworth (1993), os valores de WL e WPM são fixados em 50% e 10% de Wm, respectivamente, e não são considerados na calibração.

A resistência superficial é considerada um parâmetro fixo e não é considerada na calibração. Quando existem dados disponíveis, é possível utilizar valores médios mensais para representar a variabilidade sazonal da resistência superficial.

- Altura da Vegetação

Os valores adotados para a altura média da cobertura vegetal, que servem para calcular a resistência aerodinâmica à evapotranspiração, são dados na Tabela 18. Este parâmetro está inversamente relacionado à resistência aerodinâmica, o que significa que a resistência aerodinâmica em florestas é menor do que em áreas de pastagem ou agricultura.

Tabela 18 - Altura dos tipos de cobertura vegetal	
Cobertura	Altura (m)
Floresta	10
Cerrado	5

Campo, pastagem	0,5
Agricultura	0,5
Pastagem amazônica	0,53
Floresta amazônica	30

Fonte: Collischonn (2001)

Parâmetros calibráveis

São alterados a cada aplicação do modelo, buscando um bom ajuste entre os dados de vazão observados e calculados e podem estar associados aos blocos de uso do solo ou às células. Um parâmetro calibrável associado a um determinado bloco assume esse valor para esse bloco em todas as células da bacia (SILVA, 2014).

De acordo com Collischonn (2001), os parâmetros calibráveis do modelo MGB-IPH são:

- Wm (capacidade de armazenamento no solo): capacidade de absorver a água da chuva, gerando pouco ou nenhum escoamento superficial. Os valores usuais variam de 50 a 1000 mm, sendo maiores para solos mais arenosos;
- b (forma da relação entre armazenamento e saturação): parâmetro que controla a separação de escoamento superficial até a saturação da capacidade de armazenamento do solo. Um aumento desse parâmetro faz com que um maior volume de água escoe superficialmente, e menos água infiltre no solo. O valor usual é 0,12 e pode chegar até 1,60. Este parâmetro ajusta os picos de vazão observados e calculados, principalmente durante as pequenas cheias;
- Kbas (escoamento residual): parâmetro que controla a vazão durante a estiagem, pois é decorrente do escoamento subterrâneo. Os valores usuais variam entre 0,05 até 5 mm/dia;
- Kint (drenagem sub-superficial): parâmetro que controla a quantidade de água da camada de solo que é escoada sub-superficialmente. Os valores mais adequados de Kint giram em torno de 4 a 40 mm/dia;
- XL (forma da curva de redução da drenagem): controla a forma da curva de redução da drenagem intermediária ou sub-superficial do solo. Os valores giram em torno de 0,67;

- CAP (fluxo ascendente): controla o fluxo do reservatório subterrâneo para a camada superficial do solo. Geralmente a possibilidade de retorno da água subterrânea para a camada de solo é desprezada, por isso adota-se CAP igual a zero;
- Wc (armazenamento residual): esse parâmetro limita o escoamento subsuperficial e o escoamento subterrâneo, sendo pouco sensível em uma faixa razoável de valores e, em geral, é fixado em 10% da capacidade de armazenamento no solo (Wm);
- CS: parâmetro para calibração da propagação superficial nas células;
- CI: parâmetro para calibração da propagação sub-superficial nas minibacias;
- CB: parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo. Seu valor varia de normalmente entre 1200 e 8000 horas;
- QB: representa o fluxo de base da bacia. Os valores variam em torno de 0.01.

Os parâmetros IAF (índice de área foliar), rs (resistência superficial da vegetação); ra (resistência aerodinâmica da vegetação); Wm (máximo armazenamento no solo); b (parâmetro de forma da relação de umidade no solo) e o albedo são os mais importantes para a correta representação das mudanças de uso e cobertura do solo. Entre estes a maior incerteza está na correta estimativa dos parâmetros b e Wm para cada tipo de uso do solo e cobertura vegetal Collischonn (2001).

Por fim, o modelo estima a propagação na rede de drenagem utilizando o método de Muskingum Cunge. As vazões nos trechos de rio de cada célula são discretizadas em subtrechos conforme critério de precisão numérica. O intervalo de tempo utilizado no modelo MGB-IPH é subdividido em intervalos menores durante a propagação na rede de drenagem, considerando o intervalo de tempo ideal para a propagação apresentar precisão no tempo de viagem e no amortecimento do hidrograma, conforme descrito por Tucci (2009).

ANEXO B – ARTIGO SUBMETIDO EM REVISTA CIENTÍFICA

Modelagem hidrológica para previsão de vazões afluentes às usinas hidrelétricas da bacia do Alto Rio Tocantins

Jordana Ghisleni¹; Benedito Cláudio da Silva²

¹Mestranda em Engenharia Hídrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais. jordanaghisleni@gmail.com. ²Dr. Professor adjunto da Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais. silvabenedito@unifei.edu.br.

RESUMO

O Brasil apresenta forte dependência da energia hidrelétrica, tornando a gestão das usinas hidrelétricas essencial para a segurança e estabilidade do sistema elétrico nacional. A Bacia do Rio Tocantins, que abriga importantes empreendimentos como as UHEs Serra da Mesa, Cana Brava e São Salvador, possui papel estratégico nesse contexto, exigindo o monitoramento constante e a previsão de vazões para o planejamento da operação e o controle de cheias. Este estudo teve como objetivo calibrar o Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH) para simular o comportamento hidrológico do trecho entre essas usinas. O pré-processamento da bacia foi realizado com o plugin IPH Hydro Tools no QGIS, permitindo discretizar minibacias, mapear a rede de drenagem e definir as unidades de resposta hidrológica conforme as características de solo, relevo e uso da terra. A calibragem do modelo hidrológico apresentou bom desempenho, especialmente para a UHE Serra da Mesa. Com a substituição das vazões simuladas pelas observadas (Qsubst), o modelo passou a representar de forma mais realista a operação das usinas a jusante, incluindo a vazão incremental entre aproveitamentos. Os resultados demonstram que o MGB-IPH é uma ferramenta robusta e confiável para a previsão de vazões e o planejamento operacional em grandes bacias hidrográficas, contribuindo para uma operação mais eficiente das usinas hidrelétricas e para a mitigação de riscos hidrológicos.

Palavras-chave: Gestão de usinas hidrelétricas; Previsão de vazões; Calibragem de modelos hidrológicos; MGB-IPH e Bacia do Rio Tocantins.

Hydrological modeling for forecasting inflows to hydroelectric plants in the Upper Tocantins River basin

ABSTRACT

Brazil is heavily dependent on hydroelectric power, making the management of hydroelectric plants essential for the security and stability of the national electricity system. The Tocantins River Basin, home to important projects such as the Serra da Mesa, Cana Brava, and São Salvador hydroelectric plants, plays a strategic role in this context, requiring constant monitoring and flow forecasting for operational planning and flood control. This study aimed to calibrate the Large Basin Model (MGB-IPH) to simulate the hydrological behavior of the stretch between these plants. The basin was preprocessed using the IPH Hydro Tools plugin in QGIS, allowing for the discretization of mini-basins, mapping of the drainage network, and definition of hydrological response units based on soil, relief, and land use characteristics. The hydrological model calibration performed well, especially for the Serra da Mesa hydroelectric plant. By replacing simulated flows with observed flows (Qsubst), the model began to more realistically represent the operation of downstream plants, including the incremental flow between developments. The results demonstrate that the MGB-IPH is a robust and reliable tool for flow forecasting and operational planning in large river basins, contributing to more efficient operation of hydroelectric plants and mitigating hydrological risks.

Keywords: Hydroelectric plant management; Flow forecasting; Hydrological model calibration; MGB-IPH and the Tocantins River Basin.

Introdução

A disponibilidade e a variabilidade dos recursos hídricos desempenham um papel central na matriz energética brasileira, fortemente dependente da geração hidrelétrica. A operação eficiente dessas usinas exige um planejamento cuidadoso, que considere tanto os cenários de abundância quanto os de eventos extremos. Em especial, as cheias podem representar riscos significativos à segurança das estruturas e à continuidade da geração de energia, exigindo mecanismos de previsão e resposta rápida por parte dos operadores do sistema. Nesse contexto, as bacias hidrográficas assumem papel estratégico, pois é nelas que ocorrem os principais processos que regulam a disponibilidade e o movimento da água (Leão et al., 2015).

Entre as bacias de maior relevância, destaca-se a do Rio Tocantins, uma das maiores do Brasil e responsável por abrigar importantes usinas hidrelétricas que contribuem significativamente para a produção energética nacional. A operação segura e eficiente dessas usinas depende diretamente da capacidade de antecipar variações de vazão, principalmente em períodos de cheias. Para enfrentar esse desafio, a utilização e o ajuste de modelos hidrológicos visando à previsão de vazões têm se consolidado como uma alternativa eficaz e estratégica, pois possibilitam identificar com antecedência situações críticas e adotar medidas preventivas que preservem a integridade das estruturas e a continuidade da geração de energia (Souza et al., 2014).

O Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH), desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), é uma ferramenta capaz de simular o comportamento hidrológico de bacias de grande porte, integrando dados climáticos, topográficos e de uso do solo. Contudo, a eficácia das previsões depende fortemente de um ajuste criterioso do modelo, que considere a qualidade e a representatividade de todos os dados de entrada, desde séries históricas de precipitação e vazão até informações atualizadas sobre uso e cobertura do solo. Um ajuste bem executado permite calibrar parâmetros de forma realista, reduzindo incertezas e aumentando a confiabilidade das estimativas (Moraes et al. 2016).

Diante disso, esta pesquisa tem como objetivo geral realizar o ajuste do MGB-IPH na bacia do Rio Tocantins, visando à previsão de vazões nas usinas hidrelétricas de Cana Brava e São Salvador durante períodos de cheias, de modo a subsidiar a operação segura e eficiente dessas usinas. De forma mais detalhada, os objetivos específicos incluem: caracterizar as principais variáveis hidrológicas e climáticas da bacia que influenciam os regimes de vazão; organizar, tratar e integrar os dados hidrometeorológicos, topográficos e de uso e cobertura do solo necessários para a configuração do modelo; realizar o ajuste e a calibração do MGB-IPH para o trecho da bacia de interesse; avaliar e consolidar o processo de configuração e ajuste do modelo; e comparar os resultados obtidos com evidências de outros estudos desenvolvidos em grandes bacias brasileiras, verificando a consistência e a aplicabilidade do modelo em diferentes contextos hidrológicos (Ferreira et al., 2017).

Os resultados esperados a partir deste estudo têm o potencial de subsidiar estratégias mais seguras e eficientes de operação das usinas hidrelétricas. O ajuste correto do modelo, incorporando todas as variáveis relevantes e refletindo fielmente as condições reais da bacia, é essencial para garantir previsões robustas, reduzir riscos operacionais e manter a geração contínua de energia durante situações críticas, reforçando sua importância para a confiabilidade e segurança do sistema elétrico brasileiro.

Material e métodos

Modelo MGB-IPH

O Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH), desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), é uma ferramenta reconhecida para gestão de recursos hídricos e operação de sistemas hidrelétricos. Ele integra processos hidrológicos superficiais, subsuperficiais e subterrâneos, permitindo simular o ciclo hidrológico completo de uma bacia (Collischonn, 2001) e incorporar dados climáticos, topográficos, de uso do solo e hidrológicos, essenciais para prever vazões, níveis de água e evapotranspiração (Silva et al., 2018).

A preparação dos dados de entrada, os processos e resultados do modelo são resumidos na Figura 1 (Oliveira, 2016).

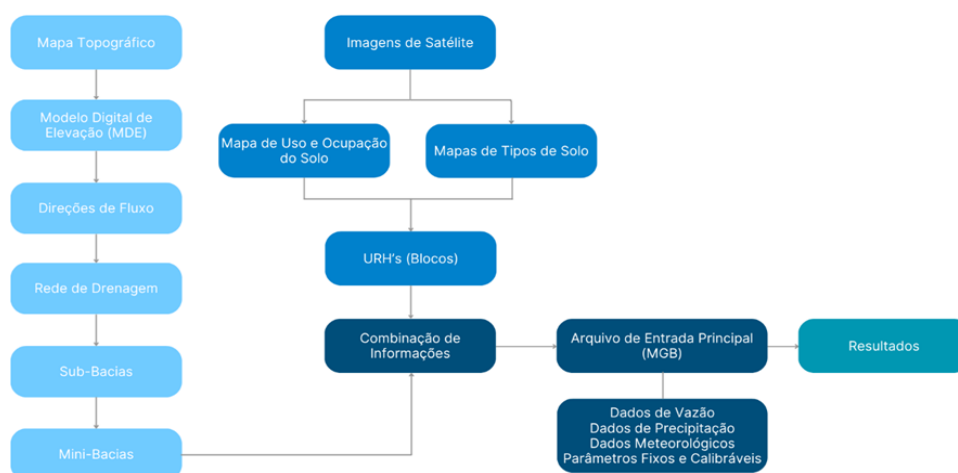


Figura 1 - Fluxograma da aplicação do modelo MGB-IPH em relação aos dados de entrada

Grandes bacias são tipicamente áreas superiores a 1000 km², onde os processos de propagação fluvial são relevantes, a heterogeneidade de chuva e uso do solo não permite métodos clássicos de hidrologia, e a caracterização do terreno exige técnicas de SIG e sensoriamento remoto.

A calibração do MGB-IPH é fundamental para aprimorar a precisão das previsões, ajustando parâmetros para reduzir diferenças entre simulações e dados observados. Esse processo garante que o modelo reflita adequadamente as particularidades da bacia, tornando-o confiável para tomada de decisões em gestão de recursos hídricos.

O MGB-IPH utiliza a discretização da bacia em unidades irregulares chamadas minibacias, baseadas em informações topográficas de Modelos Digitais de Elevação (MDE), que podem ser agrupadas em sub-bacias representando grandes áreas de drenagem. Cada minibacia é subdividida em Unidades de Resposta Hidrológica (URHs), que representam áreas com comportamento hidrológico semelhante, considerando características do solo, cobertura vegetal e topografia (Fan, 2013).

O modelo integra algoritmos que simulam o balanço de água no solo, escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo, evapotranspiração e escoamento na rede de drenagem. A bacia é representada por células quadradas conectadas por canais de drenagem, e cada célula contém blocos de uso do solo, definidos por parâmetros como armazenamento máximo e índice de área foliar da vegetação. Variáveis meteorológicas, como precipitação, temperatura e umidade, são interpoladas a partir de estações próximas (Collischon e Tucci, 2001).

A estrutura do modelo é inspirada na configuração do modelo LARSIM, com adaptações nos módulos de balanço hídrico, evapotranspiração e escoamento, empregando a metodologia Muskingum-Cunge para o fluxo na rede de drenagem (Bremicker, 1998; Shuttleworth, 1993; Wigmosta et al., 1994; Tucci, 1998).

O MGB-IPH requer grande quantidade de dados hidrológicos, topográficos e de uso do solo, geralmente processados por Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (Burrough, 1986). Imagens de sensoriamento remoto e modelos numéricos do terreno fornecem informações detalhadas, que são agregadas à resolução do modelo de aproximadamente 10 x 10 km por célula (Eastman, 1995; Collischonn et al., 1999; Collischonn, 2001).

Os parâmetros do modelo são divididos em fixos, que refletem características físicas da bacia, e calibráveis, que permitem ajustar o modelo às condições hidrológicas observadas, aumentando a precisão das previsões.

Os parâmetros fixos do MGB-IPH correspondem às características físicas, ambientais e geomorfológicas da bacia que permanecem constantes durante a simulação, como vegetação, solo, topografia, índice de área foliar (IAF), albedo, resistência superficial e altura do dossel da vegetação (Fan, 2011). Já os parâmetros calibráveis são ajustados durante a calibração do modelo para adequar a simulação às observações reais, envolvendo processos como escoamento superficial, infiltração, armazenamento no solo e propagação do fluxo nas minibacias (Fan, 2011; Alves et al., 2020). Valores

iniciais desses parâmetros servem como ponto de partida para o processo de calibração, permitindo ajustes que refletem as características específicas da bacia em estudo.

A calibração do modelo consiste em comparar as vazões simuladas com as observadas, ajustando os parâmetros hidrológicos para que o comportamento da bacia seja adequadamente representado. Para quantificar o ajuste, utilizam-se funções objetivo, como o coeficiente de Nash (R^2), que indica o ajuste entre vazões calculadas e observadas, o coeficiente de Nash para os logaritmos das vazões (Rlog), sensível aos períodos de estiagem, e a relação entre volumes medidos e calculados (ΔV), que avalia diferenças relativas entre vazões totais (Collischonn, 2001; Ribeiro Neto, 2006). Essas métricas permitem orientar o ajuste dos parâmetros e garantir previsões hidrológicas confiáveis para suporte à gestão de recursos hídricos e operação de usinas hidrelétricas.

A metodologia para geração das previsões de precipitações consiste em alimentar o modelo hidrológico MGB-IPH com um conjunto de previsões meteorológicas oriundas de saídas de diferentes modelos de previsão numérica, com diferentes condições iniciais e parametrizações.

Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins-Araguaia

A Bacia do Rio Tocantins-Araguaia está localizada na região centro-norte do Brasil e se estende pelos estados de Tocantins, Goiás, Mato Grosso, Pará, Maranhão e pelo Distrito Federal, conforme ilustrado na Figura 2. É formada principalmente pelos rios Tocantins e Araguaia, que, junto a seus diversos afluentes, compõem uma das maiores e mais relevantes bacias hidrográficas do país.

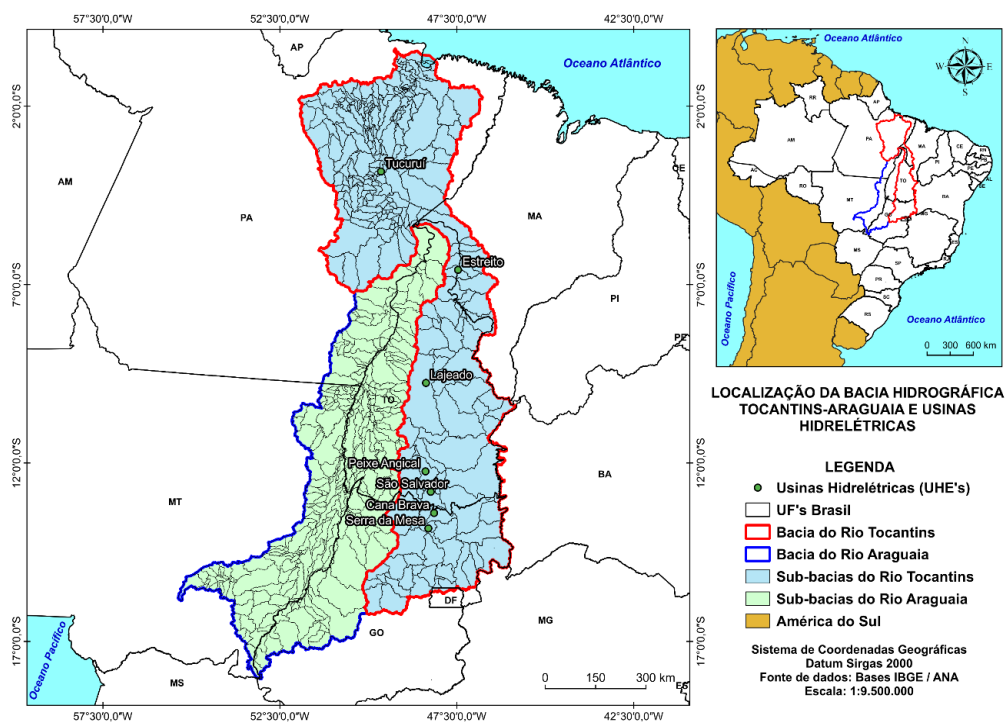


Figura 2 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins-Araguaia

Com aproximadamente 770.000 km² de área de drenagem, a bacia do Tocantins-Araguaia desempenha papel estratégico na hidrologia e no sistema energético do Brasil. O rio Tocantins, que nasce em Goiás e percorre cerca de 1.900 km até o encontro com o rio Araguaia, e o rio Araguaia, com aproximadamente 2.600 km até sua foz no Oceano Atlântico, possuem grande volume de água, contribuindo significativamente para o regime fluvial da região (Machado et al., 2016). A bacia responde por cerca de 9% da disponibilidade de água doce do país, com regime hidrológico complexo, influenciado por chuvas tropicais, variações pluviométricas irregulares e padrões de escoamento típicos da região amazônica.

No contexto da geração de energia elétrica, a bacia abriga sete usinas hidrelétricas de grande porte em cascata, das quais destacam-se a UHE Serra da Mesa, com maior reservatório do país e função de regularização de vazões, a UHE Cana Brava e a UHE São Salvador, situadas a jusante, e a UHE

Tucuruí, com grande capacidade instalada de 8.365 MW, responsável pela regulação final antes da foz (Cardoso et al., 2017; Ana, 2023). A presença dessas usinas evidencia a importância estratégica da bacia para a segurança hídrica e energética do Brasil, reforçando a necessidade de planejamento e operação eficiente de seus recursos.

A bacia do Rio Tocantins apresenta relevo diversificado, com montanhas e planaltos, como a Serra Geral e a Chapada das Mangabeiras, que influenciam a formação dos cursos d'água e a regulação dos fluxos fluviais (Soares, 2009; Junk et al., 2011). Áreas de baixadas, como a Planície do Tocantins, atuam como regiões de armazenamento temporário, controlando cheias e vazantes ao longo do ano (Miranda, 2006). Na região central do Brasil, onde estão localizadas as UHEs Serra da Mesa, Cana Brava e São Salvador, o relevo é predominantemente composto por planaltos e chapadas, com altitudes variando entre 300 e 700 metros. Trechos montanhosos próximos às UHEs Serra da Mesa e Cana Brava apresentam declividades de 5 a 12%, enquanto as planícies próximas à UHE São Salvador possuem declividade inferior a 3%, favorecendo acúmulo de água. Essas características do relevo estão representadas no mapa à esquerda da Figura 3.

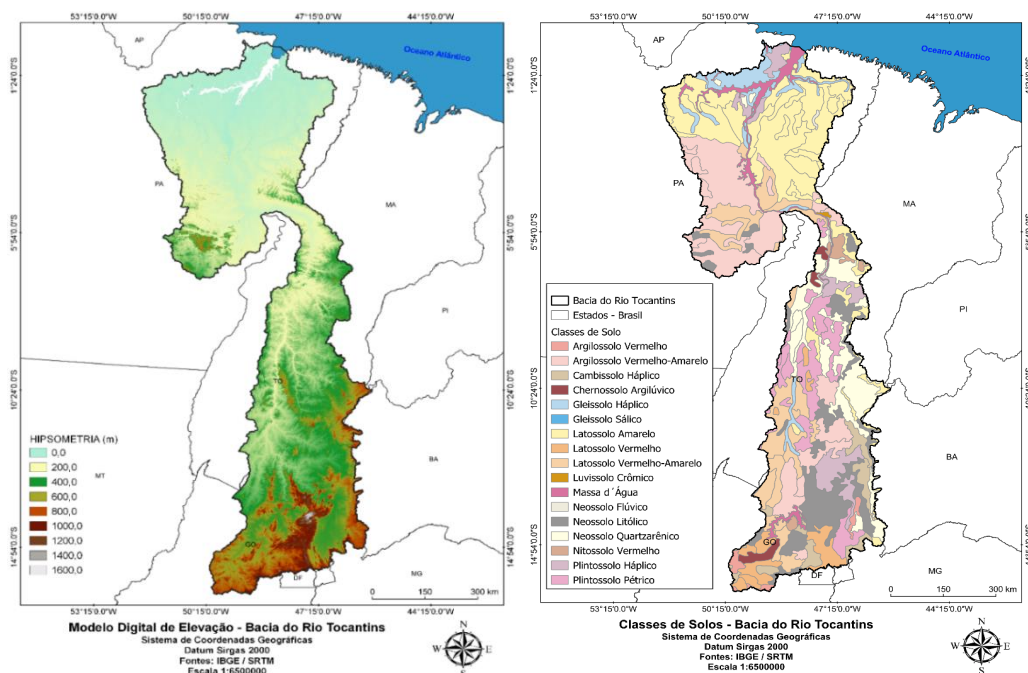


Figura 3 - Relevo e tipos de solo da Bacia do Rio Tocantins

Essa heterogeneidade do relevo e do solo influencia diretamente a formação de escoamentos, a subdivisão em minibacias, a distribuição das Unidades de Resposta Hidrológica (URHs) e processos hidrológicos como infiltração e escoamento superficial, sendo fundamental para a calibração do modelo MGB-IPH e a simulação precisa de eventos críticos.

O clima da Bacia do Rio Tocantins, no norte do Brasil, é equatorial úmido, com altas temperaturas, umidade elevada e intensa pluviosidade, fatores que influenciam diretamente a hidrologia e a disponibilidade de água (Marengo, 2006). A precipitação apresenta forte sazonalidade, com estação chuvosa de novembro a abril e seca de maio a outubro, afetando escoamento superficial, armazenamento em solos e reservatórios e recarga de aquíferos (Rodrigues et al., 2013). Fatores locais como relevo, cobertura vegetal e tipo de solo modulam a resposta hidrológica da bacia.

De acordo com os dados do Cemaden (2012), entre outubro de 2021 e março de 2022, a bacia de captação da UHE Serra da Mesa registrou 1441 mm de chuva, correspondendo a 111% da média deste período e 103% da média histórica da estação chuvosa (1983–2021). Em março de 2022, a precipitação foi de 93 mm, equivalente a 44% da média histórica para o mês (Figura 4).

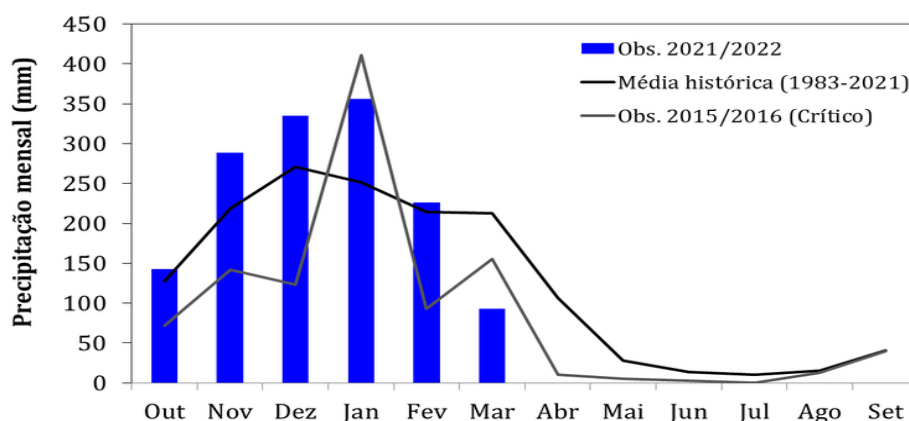


Figura 4 - Precipitação mensal da Bacia Hidrográfica da UHE Serra da Mesa

Compreender o regime climático é essencial para calibrar o modelo hidrológico MGB-IPH, permitindo simulações precisas de cheias e subsidiando decisões estratégicas na operação das usinas e na gestão integrada dos recursos hídricos.

O estudo concentra-se no ajuste do Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH) para as Usinas Hidrelétricas Cana Brava e São Salvador, localizadas na cascata do Rio Tocantins, ambas operando no regime fio d'água. Nesse regime, as usinas utilizam predominantemente a vazão natural do rio para geração de energia, sem desempenhar papel significativo na regularização do fluxo da cascata.

A UHE Cana Brava, situada no município de Cavalcante (GO), iniciou suas operações em 2002 e está sob concessão da ENGIE Brasil Energia até 2033. Possui um reservatório de 139 km² e três unidades geradoras equipadas com turbinas do tipo Francis, totalizando 450 MW de capacidade instalada (Engie, 2023). A UHE São Salvador, localizada no município de Paranã (TO) a jusante da Cana Brava, entrou em operação em 2009, com concessão válida até 2037. Seu reservatório cobre 104 km² e possui duas unidades geradoras com turbinas verticais Kaplan, somando 243,2 MW de capacidade instalada (Engie, 2023).

As vazões naturais observadas no período chuvoso, entre novembro e abril, permitem analisar o comportamento hidrológico da bacia, avaliar a consistência dos dados e orientar a calibração do modelo hidrológico, buscando garantir uniformidade na avaliação dos dados hidrológicos e compreender a coerência do regime hidrológico ao longo da bacia (Figura 5).

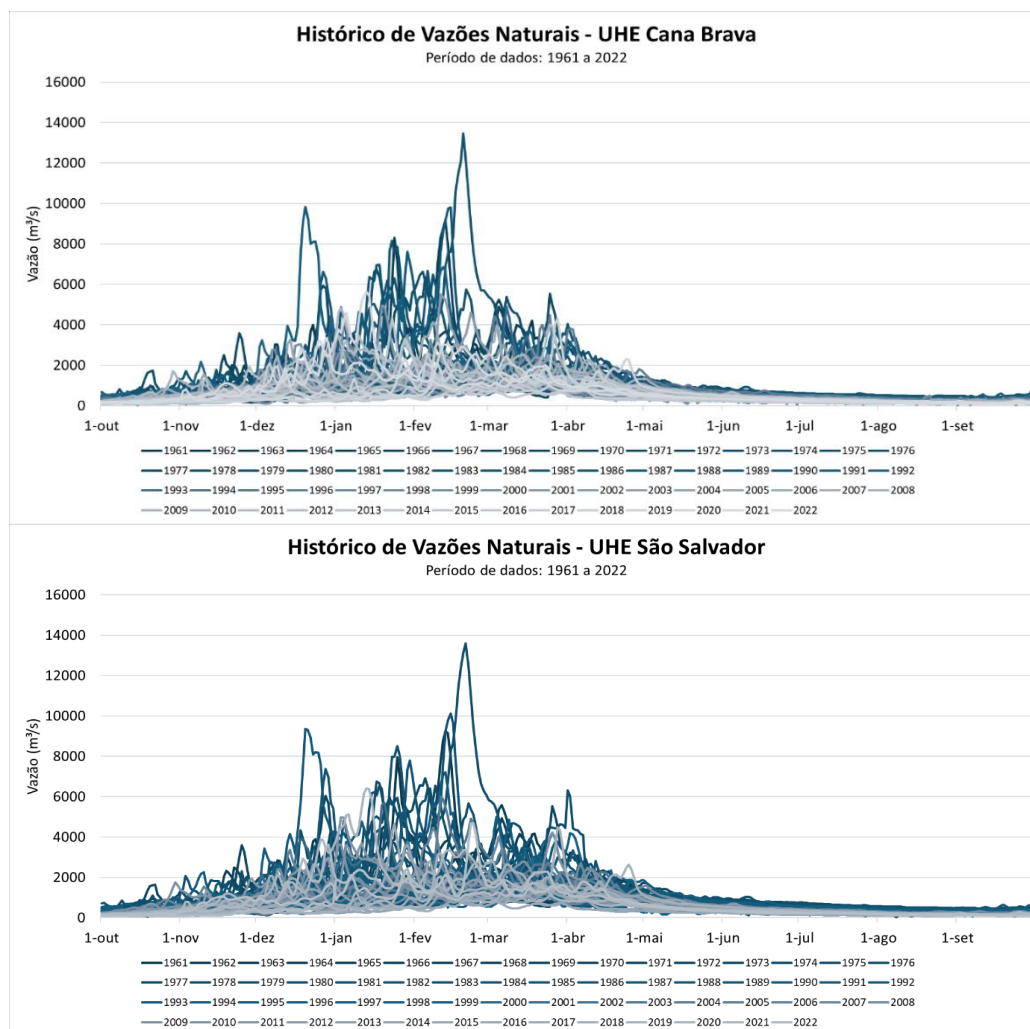


Figura 5 - Histórico de vazões naturais

Material e métodos

Pré-processamento do MGB-IPH

O pré-processamento de dados é a etapa inicial para a modelagem hidrológica, a partir da discretização da bacia, permitindo extrair atributos como rede de drenagem, bacias e minibacias hidrográficas. Esse processamento gera um arquivo base contendo informações topológicas de cada minibacia, como área de drenagem, comprimento, declividade do trecho e fração de classes de resposta hidrológica.

Para a discretização das minibacias, foi utilizado o plugin IPH Hydro Tools no QGIS, com base no Modelo Digital de Elevação (MDE), garantindo a correta estruturação da rede de drenagem e subdivisão das bacias em unidades menores, essenciais para a simulação detalhada dos processos hidrológicos. O preenchimento de depressões espúrias e o cálculo da direção do fluxo de água em cada célula do MDE asseguram a fidelidade do escoamento simulado. As minibacias geradas estão representadas no mapa à esquerda da Figura 6.

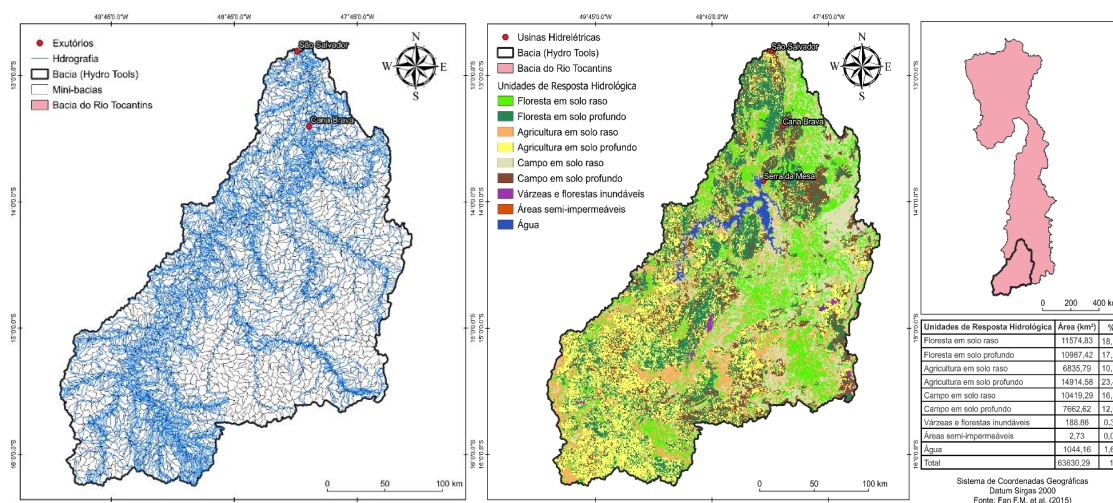


Figura 6 - Relevo e tipos de solo da Bacia do Rio Tocantins

Os pontos exutórios foram selecionados a montante das UHEs Cana Brava e São Salvador, permitindo que o ajuste do modelo representasse corretamente o escoamento até os principais pontos de interesse operacional.

Para o modelo, é necessário espacializar as Unidades de Resposta Hidrológica (URHs), áreas com comportamento hidrológico homogêneo, que influenciam diretamente os processos simulados pelo MGB-IPH. O mapeamento das URHs combina informações sobre tipo e uso do solo, geologia, topografia e declividade, refletindo a capacidade de infiltração, armazenamento e escoamento da água. As URHs utilizadas neste trabalho estão representadas no mapa à direita da Figura 6 e foram extraídas do portal HGE da UFRGS (Fan et al., 2015).

A análise indica que a maior parte da bacia (18,19%) corresponde a floresta em solo raso, com aproximadamente 11.575 km², informação relevante para a evapotranspiração, infiltração e escoamento superficial simulados pelo modelo. A correta classificação das URHs permite que o MGB-IPH represente as heterogeneidades espaciais da bacia, fornecendo subsídios para integração com dados hidrológicos e meteorológicos, e garantindo robustez nas simulações e análises de planejamento das usinas.

Para o ajuste do modelo MGB-IPH, foram coletados dados de chuva e vazão que representem adequadamente a hidrologia da bacia, garantindo séries temporais completas e consistentes. A verificação da integridade, padronização e formatação desses dados é essencial para um ajuste robusto do modelo e para futuras simulações precisas dos processos hidrológicos.

Foram utilizadas 16 estações fluviométricas (Tabela 1) e 12 pluviométricas (Tabela 2), distribuídas estrategicamente ao longo das sub-bacias da área de estudo (Figura 7), permitindo capturar a variabilidade espacial da precipitação e do escoamento. Esses dados possibilitam o cálculo de estatísticas básicas, como médias, máximos, mínimos e séries acumuladas, fundamentais para ajustar parâmetros do modelo, como infiltração, tempo de concentração e escoamento superficial.

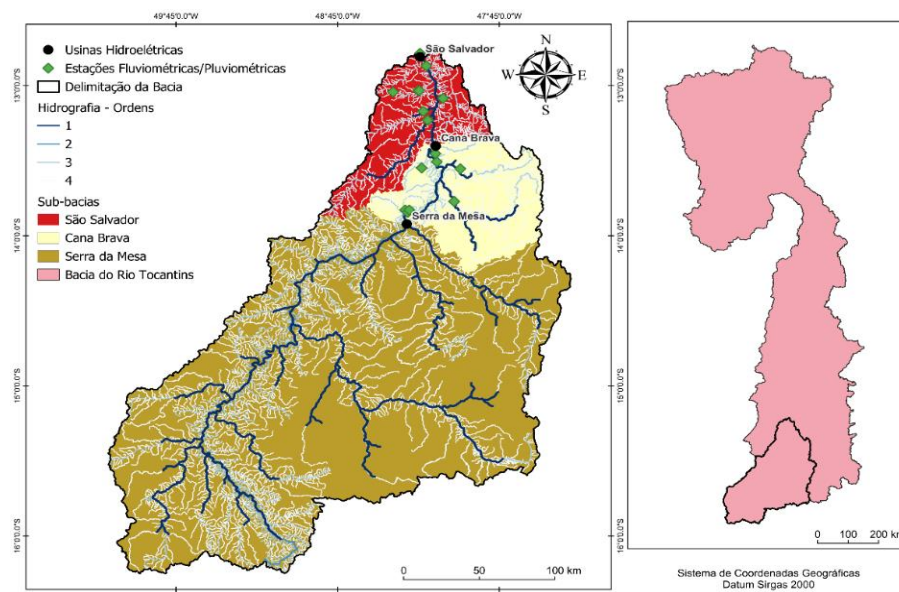


Figura 7 - Estações fluviométricas e pluviométricas por Sub-Bacias

Tabela 1 - Estações fluviométricas

Código	Nome	UF/Município	Latitude (S)	Longitude (W)
20919000	UHSM RESERVATÓRIO	GO/MINAÇU	-13.8444	-48.3164
20920080	UHSM BARRAMENTO	GO/MINAÇU	-13.8286	-48.3067
20980000	UHCB RIO PRETO	GO/MINAÇU	-13.7719	-48.0289
21030000	UHCB RIO BONITO	GO/MINAÇU	-13.5483	-48.2300
21040000	UHCB RIO SÃO FELIX	GO/CAVALCANTE	-13.5539	-47.9908
21050025	UHCB RESERVATÓRIO 2	GO/MINAÇU	-13.5069	-48.1367
21050028	UHCB RESERVATÓRIO 1	GO/MINAÇU	-13.4531	-48.1456
21050080	UHCB BARRAMENTO	GO/MINAÇU	-13.4031	-48.1439
21050200	UHSA RIO CANA BRAVA	GO/MINAÇU	-13.2300	-48.1928
21060000	UHSA RESERVATÓRIO	TO/PARANÃ	-12.8678	-48.2011
21062000	PALMEIRÓPOLIS	TO/PALMEIRÓPOLIS	-13.0331	-48.2519
21080000	UHSA BARRAMENTO	TO/PARANÃ	-12.8086	-48.2386
21150100	UHSA RIO MUCAMBÃO	TO/PALMEIRÓPOLIS	-13.1706	-48.2200
21160100	UHSA RIO CUSTÓDIO	TO/PARANÃ	-13.0847	-48.0981
21163100	UHSA MUCAMBINHO	TO/PALMEIRÓPOLIS	-13.0328	-48.2456
22042315	UHPA FAZENDA BARREIRO	TO/SÃO SALVADOR DO TOCANTINS	-12.7850	-48.2403

Tabela 2 - Estações pluviométricas

Código	Nome	UF/Município	Latitude (S)	Longitude (W)
1248003	PALMEIRÓPOLIS	TO/PALMEIRÓPOLIS	-13.0419	-48.4069
1248009	UHPA FAZENDA BARREIRO	TO/SÃO SALVADOR DO TOCANTINS	-12.7850	-48.2403
1248012	UHSA BARRAMENTO	TO/PARANÃ	-12.8086	-48.2386
1347003	UHCB RIO SÃO FELIX	GO/CAVALCANTE	-13.5539	-47.9911
1348004	UHSM BARRAMENTO	GO/MINAÇU	-13.8283	-48.3322
1348006	UHCB BARRAMENTO	GO/MINAÇU	-13.4031	-48.1439
1348007	UHCB RIO PRETO	GO/MINAÇU	-13.7717	-48.0294
1348009	UHCB RIO BONITO	GO/MINAÇU	-13.5481	-48.2300
1348010	UHSA RIBEIRÃO MUCAMBINHO	TO/PALMEIRÓPOLIS	-13.0328	-48.2453
1348011	UHSA RIO CUSTÓDIO	TO/PARANÃ	-13.0847	-48.0983
1348012	UHSA RIO MUCAMBÃO	TO/PALMEIRÓPOLIS	-13.1706	-48.2200
1348013	UHSA RIO CANA BRAVA	GO/MINAÇU	-13.2297	-48.1931

Apesar da cobertura observacional, a bacia apresenta regiões com baixa densidade de estações pluviométricas, o que limita a representação espacial da precipitação. Para contornar essa limitação, foram utilizados dados do produto IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM), fornecido pela missão GPM (NASA/JAXA), com alta resolução espacial ($\sim 0,1^\circ$) e temporal (30 minutos a diária), permitindo preencher lacunas e verificar a consistência dos dados observados (Huffman et al., 2019). Estudos de validação na região Norte e Centro-Oeste do Brasil mostram bom desempenho estatístico do IMERG, com baixos valores de viés e erro quadrático médio (Nascimento et al., 2023).

Para a modelagem climatológica, foram utilizados dados das Normais Climatológicas do Brasil (1961–2010), fornecidas pelo INMET, que representam médias mensais de cinco décadas e constituem referência confiável para estudos hidrológicos, ambientais e agrícolas. Foram considerados dados de temperatura, umidade relativa, insolação, velocidade do vento e pressão atmosférica extraídos de estações estratégicas na região da bacia hidrográfica (Tabela 3), selecionadas por sua relevância e séries históricas consistentes.

Tabela 3 - Estações meteorológicas da região estudada

Código	Nome	Estado	Latitude (S)	Longitude (W)
83379	FORMOSA	GO	-15.22	-47.34
83228	PEIXE	TO	-12.02	-48.54
83332	POSSE	GO	-14.09	-46.37
93235	TAQUATINGA	TO	-12.40	-46.44

A utilização dessas normais climatológicas permite simulações mais precisas do comportamento hidrológico da bacia, garantindo que as variações sazonais e regionais do clima sejam adequadamente representadas, o que é fundamental para estimativas de vazão e decisões sobre o uso sustentável dos recursos hídricos, especialmente em uma bacia extensa como a do rio Tocantins.

As séries históricas de vazões observadas das UHEs Serra da Mesa, Cana Brava e São Salvador foram obtidas na plataforma da ANA, incluindo vazões afluentes e defluentes quando disponíveis. Foi realizada análise preliminar para identificar falhas ou valores atípicos, garantindo a confiabilidade dos dados.

A Figura 8 apresenta a variação temporal das vazões observadas durante os períodos de operação das usinas, permitindo avaliar a consistência das séries. Essas informações foram essenciais para a análise, calibração e validação do modelo hidrológico, possibilitando comparação direta entre vazões simuladas e registros reais.

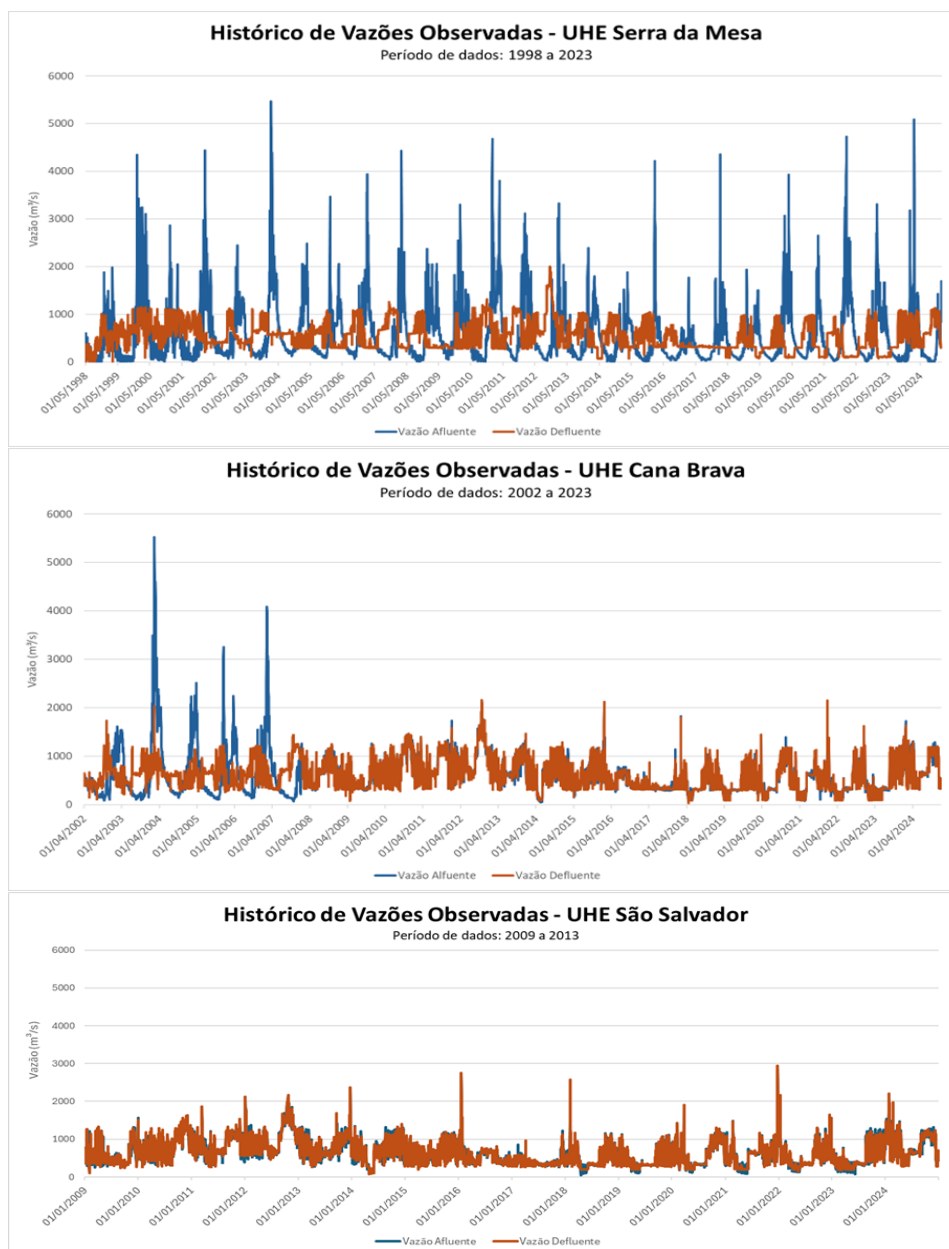


Figura 8 - Histórico de vazões observadas

Para a calibração do modelo MGB-IPH, cada Unidade de Resposta Hidrológica (URH) recebeu parâmetros específicos, incluindo capacidade máxima de armazenamento de água no solo (W_m), parâmetro de distribuição do armazenamento (b), constantes de recessão do escoamento de base (K_{bas} e K_{int}), fração do escoamento superficial (XL), capacidade de armazenamento em depressões (CAP) e conteúdo inicial de água no solo (W_c).

As URHs incluem floresta rasa e profunda, agricultura rasa e profunda, campo, várzea, áreas de solo inconsolidado (ASI) e corpos d'água. Parâmetros adicionais da bacia, como declividade média do canal (CS), capacidade de infiltração inicial (CI) e máxima (CB), e vazão de base específica (QB) também foram definidos.

Os valores de todos os parâmetros estão detalhados na Tabela 4, servindo como base para o ajuste do modelo, focando nos parâmetros que mais influenciam a resposta hidrológica da bacia.

Tabela 4 - Parâmetros hidrológicos por URH e da bacia

Use	Wm	B	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
FlorRas	324.0	0.69	3.66	15.16	0.60	0.00	0.10
FlorProf	648.0	0.40	7.32	30.32	0.60	0.00	0.10
AgriRas	324.0	0.99	3.66	15.16	0.60	0.00	0.10
AgriProf	648.0	0.69	7.32	30.32	0.60	0.00	0.10
CampRas	324.0	0.79	3.66	15.16	0.60	0.00	0.10
CampProf	648.0	0.50	2.48	19.84	0.60	0.00	0.10
Varzea	432.0	0.55	0.99	4.96	0.60	0.00	0.10
ASI	432.0	0.55	0.99	4.96	0.60	0.00	0.10
Agua	432.0	0.55	0.99	4.96	0.00	0.00	0.00
CS	22.49						
CI	297.60						
CB	1006.00						

Calibração do Modelo

A calibração do modelo hidrológico MGB-IPH iniciou-se pela UHE Serra da Mesa (UHSM), situada a montante da bacia, e depois foi estendida às sub-bacias das UHEs Cana Brava (UHCB) e São Salvador (UHSA), com o objetivo de avaliar a capacidade do modelo em reproduzir o escoamento natural da UHSM e os efeitos dos reservatórios sobre as unidades a jusante.

Inicialmente, e, as simulações foram realizadas sem o Qsubst, ou seja, utilizando apenas as vazões calculadas pelo modelo, sem substituir pelas vazões defluentes observadas dos reservatórios. Essa etapa permitiu verificar a habilidade do modelo em reproduzir o escoamento natural.

Conforme Figura 9, os resultados mostraram boa concordância para a UHSM, mas desempenho insatisfatório para a UHCB e UHSA, devido à influência não representada do reservatório de Serra da Mesa. Foram identificadas inconsistências nos dados da UHCB e UHSA entre 2001 e 2007, como lacunas e valores anômalos, sendo a calibração concentrada no período de 2008 a 2015, quando os dados apresentaram maior consistência.

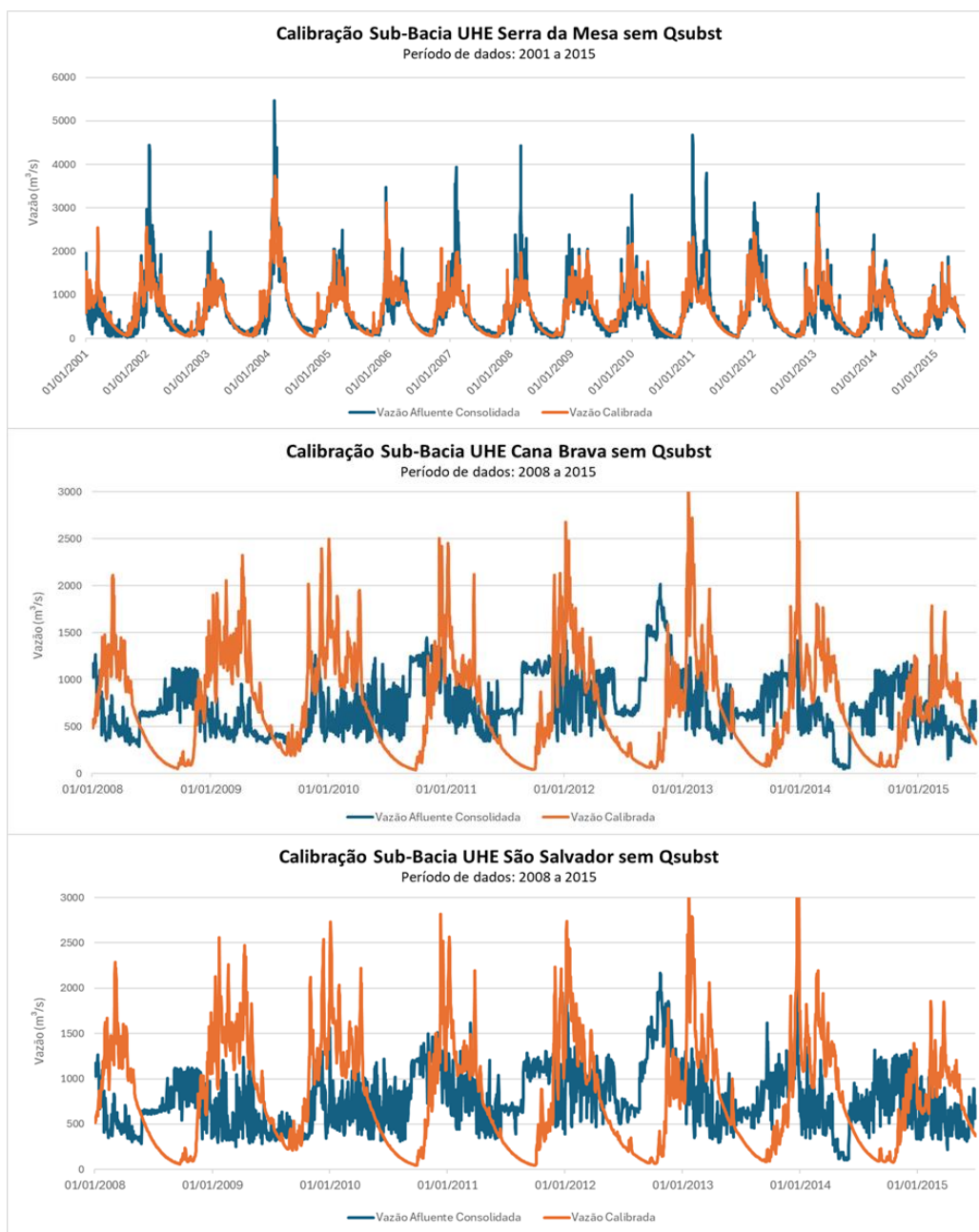


Figura 9 - Calibração sub-bacia das UHEs sem Qsubst

Os indicadores de desempenho, Coeficiente de Nash (Nash), Nash-log e erro relativo de volume (ΔV), evidenciaram bom ajuste para a UHSM, com Nash e Nash-log superiores a 0,75 e erro de volume próximo de zero. Já para UHCB e UHSA, os valores negativos de Nash e Nash-log e os altos erros de volume indicaram limitação do modelo em representar os efeitos dos reservatórios a montante (Tabela 5).

Tabela 5 - Coeficientes da calibração sem Qsubst

Sub-Bacia	Nash	Nash-log	ΔV
UHSM	0.763	0.786	-0.674
UHCB	-0.192	-0.449	1.256
UHSA	-0.259	-0.405	7.817

Esses resultados demonstram a necessidade de estratégias de correção, como a aplicação do Qsubst, substituindo as vazões calculadas pelas observadas a jusante dos barramentos, para representar realisticamente a operação dos reservatórios e melhorar o desempenho do modelo nas sub-bacias a jusante.

A calibração do modelo foi estendida às sub-bacias da UHE Cana Brava (UHCB) e UHE São Salvador (UHSA) utilizando os parâmetros ajustados para a UHE Serra da Mesa e considerando o Qsubst, ou seja, substituindo as vazões calculadas pelas defluentes observadas dos reservatórios a montante.

Os gráficos comparativos (Figura 10) mostram boa concordância entre as vazões observadas e simuladas para ambas as unidades. Os indicadores de desempenho (Tabela 6) confirmam a adequação do modelo, com coeficientes de Nash de 0,871 para UHCB e 0,826 para UHSA, demonstrando elevada aderência entre vazões observadas e calculadas.

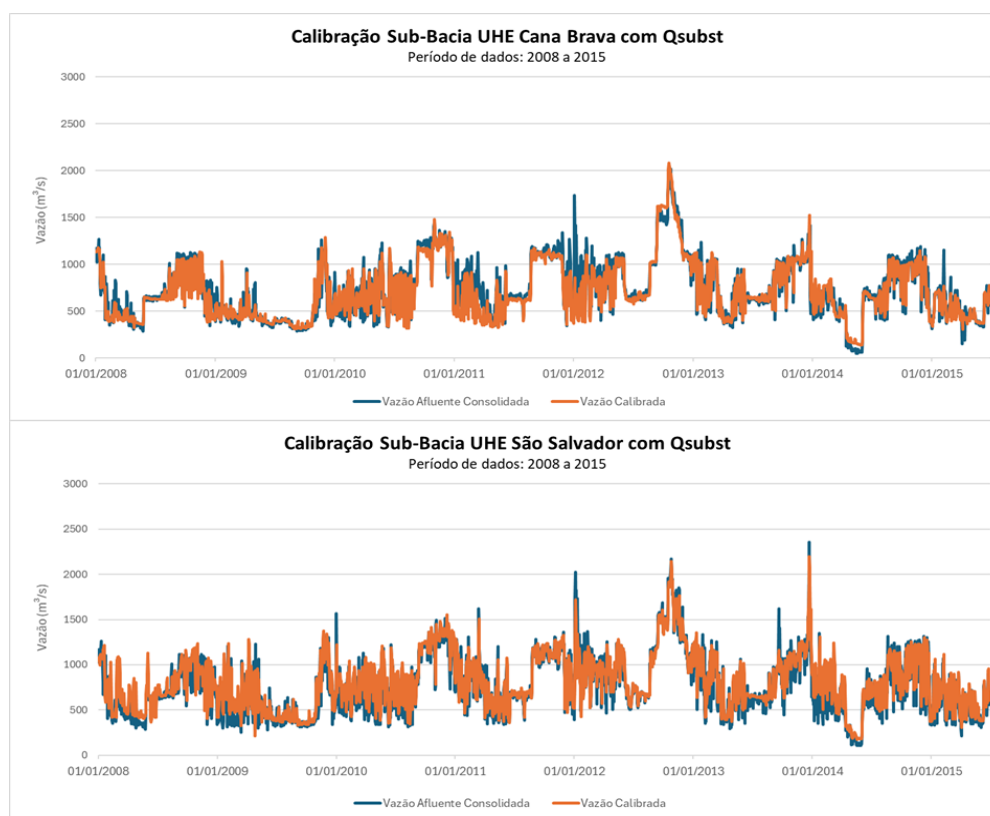


Figura 10 - Calibração sub-bacia das UHEs com Qsubst

Tabela 6 - Coeficientes da calibração com Qsubst

Sub-Bacia	Nash	Nash-log	ΔV
UHCB	0.871	-0.848	-3.353
UHSA	0.826	0.812	4.305

A aplicação do Qsubst permitiu ao modelo representar de forma satisfatória o escoamento das sub-bacias a jusante, incluindo períodos de estiagem, e demonstrou que os parâmetros calibrados a partir da UHE Serra da Mesa são adequados para as unidades a jusante, mesmo em bacias com dinâmica complexa e forte influência de reservatórios.

Assim, o modelo se mostra confiável para análises hidrológicas e planejamento operacional, permitindo avaliar alterações no regime de vazões e os efeitos da operação das usinas ao longo da bacia.

Foi realizada outra simulação para estimar a vazão incremental entre as UHEs da bacia, utilizando dados históricos da ANA e o Qsubst, adotando defluências reduzidas nas usinas montantes para isolar a contribuição da bacia incremental.

Os resultados (Figura 11) mostram que essa vazão é significativa, sendo relevante para o planejamento operacional e controle de cheias.

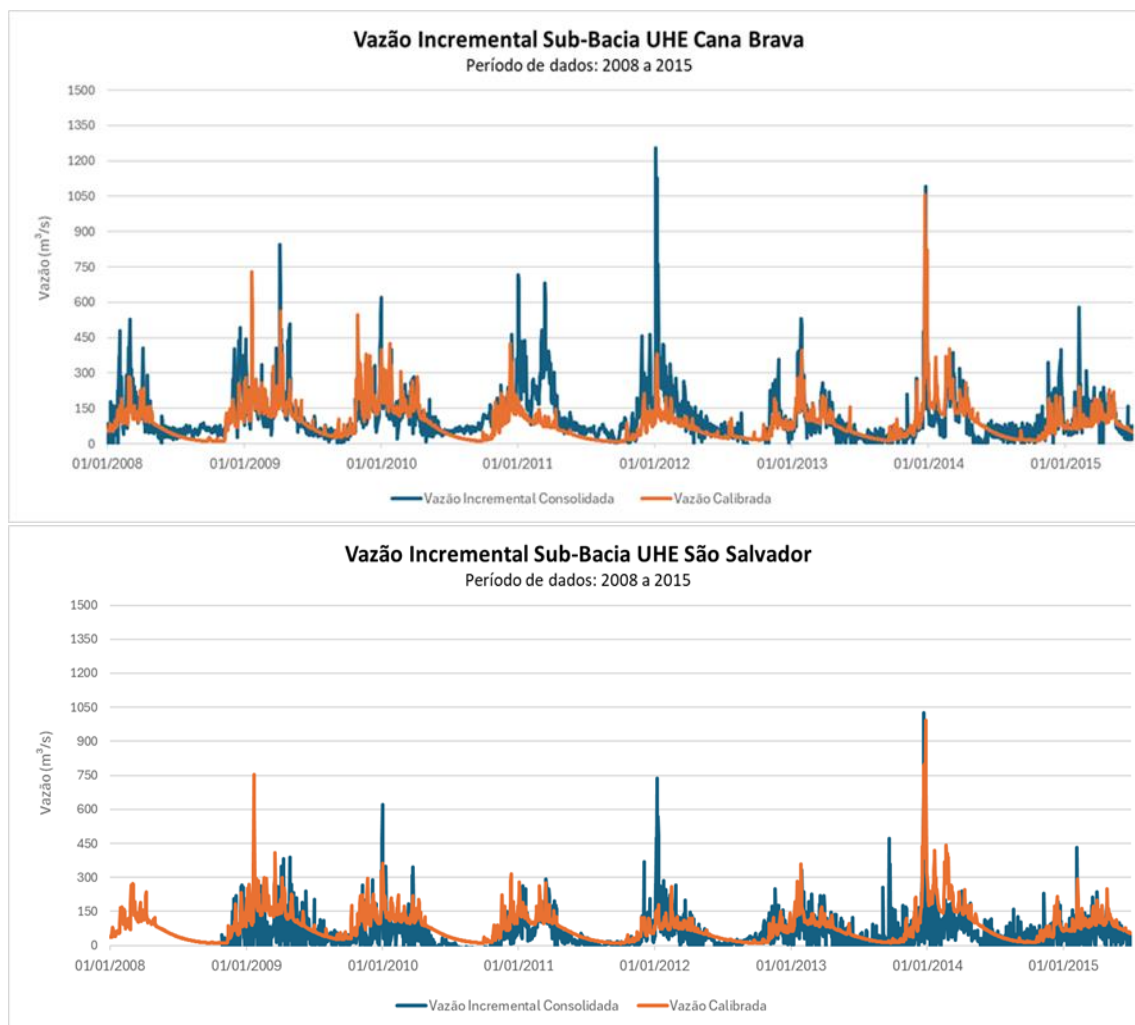


Figura 11 - Vazão incremental sub-bacia das UHEs

Apesar de falhas e variações nos dados históricos, incluindo valores negativos, essa simulação forneceu estimativas qualitativas realistas do comportamento das vazões incrementais, mesmo que os coeficientes de ajuste (Tabela 7) apresentem baixo desempenho. Assim, o modelo captura o padrão geral das vazões, oferecendo subsídios confiáveis para análise operacional, sem reproduzir exatamente os valores observados.

Tabela 7 - Coeficientes da calibração da vazão incremental nas sub-bacias

Sub-Bacia	Nash	Nash-log	ΔV
UHCB	-2.520	-19.350	-81.257
UHSA	-2.543	-22.645	-85.889

Após a calibração do modelo para 2001–2015, foi realizada a validação aplicando os mesmos parâmetros ao período de 2016 a 2022, com o objetivo de verificar a robustez do modelo em condições distintas. As simulações, conduzidas com o uso do Qsubst e dados observados da ANA, apresentaram boa concordância entre as vazões simuladas e observadas para as UHEs Cana Brava e São Salvador (Figura 12).

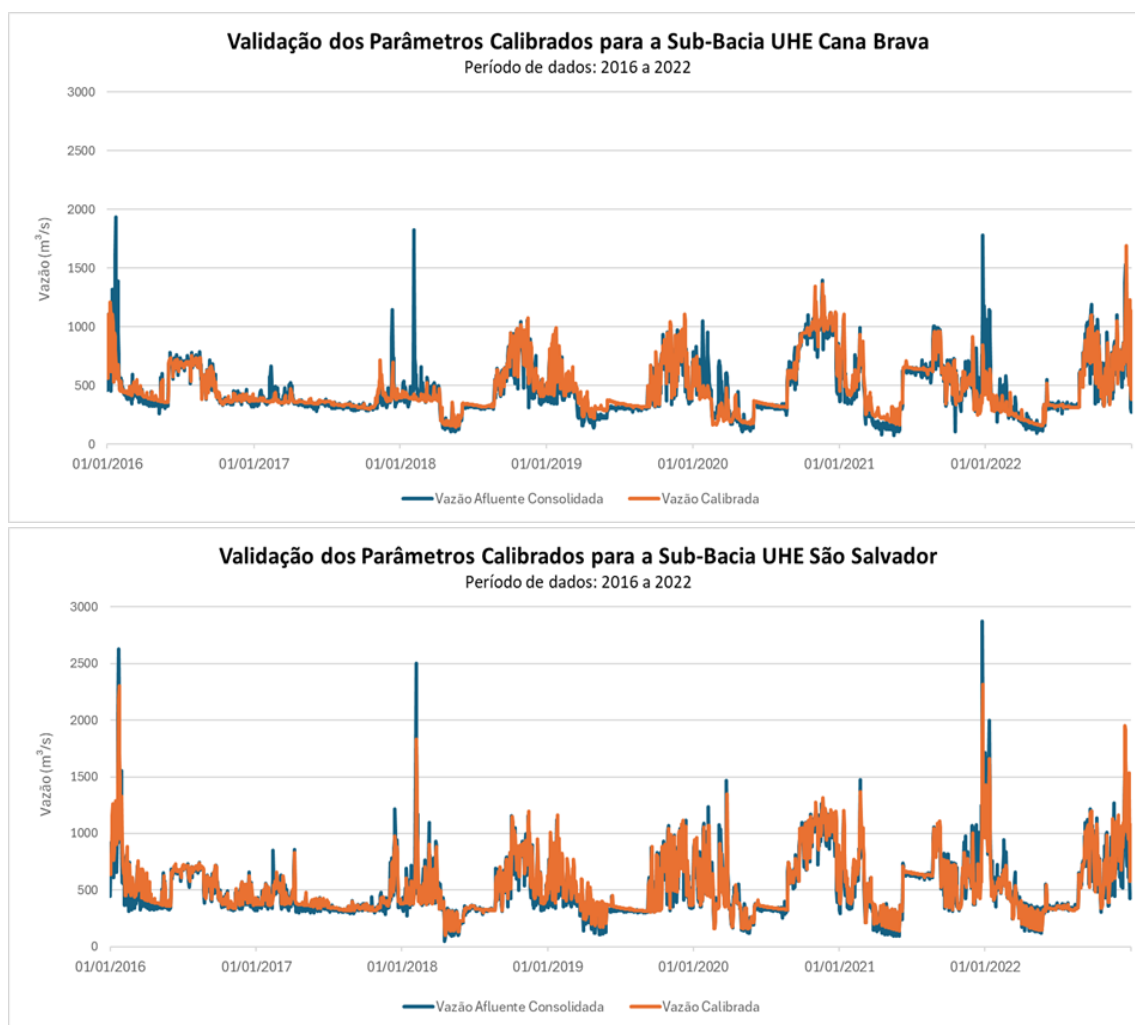


Figura 12 - Validação dos parâmetros calibrados para a sub-bacia das UHEs

Os índices de desempenho (Tabela 8) mantiveram-se próximos aos obtidos na calibração, com Nash e Nash-log superiores a 0,77 e erros de volume baixos, confirmando a consistência e estabilidade dos parâmetros ajustados.

Tabela 8 - Validação dos parâmetros calibrados

Sub-Bacia	Nash	Nash-log	ΔV
UHCB	0.778	0.821	1.063
UHSA	0.848	0.867	3.190

Assim, os resultados demonstram que o modelo calibrado a partir da UHE Serra da Mesa representa adequadamente as condições hidrológicas nas usinas a jusante, consolidando o MGB-IPH como uma ferramenta confiável para análises hidrológicas e planejamento operacional da bacia.

Discussão

Os resultados demonstram que a incorporação das vazões observadas defluentes dos reservatórios a montante aumentou significativamente a representatividade do modelo, permitindo uma simulação mais realista da propagação fluvial. Esse ajuste metodológico aprimorou o desempenho do módulo de propagação, contribuindo para maior precisão nas previsões hidrológicas.

Além disso, observou-se que o modelo apresentou bons índices de eficiência e baixo erro de volume, reproduzindo adequadamente tanto eventos de cheia quanto períodos de estiagem, com boa correspondência entre os hidrogramas simulados e observados.

De modo geral, a aplicação do MGB-IPH na bacia do Alto Tocantins resultou em desempenho satisfatório, com métricas de calibração consistentes e alta capacidade de simulação das condições hidrológicas.

Conclusão

O estudo comprovou a aplicabilidade do MGB-IPH na simulação e previsão de vazões na bacia do rio Tocantins, especialmente nas usinas de Cana Brava e São Salvador. A modelagem, estruturada a partir de uma base de dados abrangente e da calibração em diferentes sub-bacias, apresentou bons índices de desempenho, com alta correspondência entre vazões simuladas e observadas e baixos erros de volume.

A validação confirmou a robustez do modelo, evidenciando sua capacidade de representar a dinâmica hídrica mesmo sob condições variadas. O MGB-IPH mostrou-se eficiente para apoiar a gestão operacional das usinas e o controle de cheias, permitindo previsões consistentes e maior segurança nas decisões.

Conclui-se que o modelo é uma ferramenta confiável e versátil para a previsão de vazões, a análise de cenários hidrológicos e a gestão sustentável dos recursos hídricos no Alto Tocantins.

Agradecimento

Os autores agradecem à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pelo suporte institucional e pela oportunidade de desenvolvimento acadêmico e científico. Agradece também aos professores e colegas que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

Referências

- Alves, M. E.; Meyer, A. O.; Fan, F. M.; Paiva, R. C. D., 2020. Manual de aplicação do modelo MGB utilizando o IPH-HYDRO Tools. Manual Técnico, HGE, IPH, UFRGS.
- Bremicker, M., 1998. Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells für das Weser und das Ostsee Einzugsgebiet als Baustein eines AtmosphärenHydrologie-Modells. Dissertation - Geowissenschaftlicher Fakultät, Albert-LudwigsUniversität. Freiburg.
- Burrough, P. A., 1986. Principles of geographical information systems for land resources assessment. Clarendon. Oxford. 194p.
- Cardoso, R. S. et al, 2017. Avaliação dos recursos hídricos e do potencial energético da bacia hidrográfica do rio Tocantins. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis. Anais. Florianópolis: Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- Collischonn, W. et al., 2001. Previsão sazonal de vazões na bacia do rio Paraná com base em modelos de séries temporais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 6, n. 2, p. 81-94.
- Cemaden. Situação atual e projeção hidrológica para o reservatório de Serra da Mesa – Bacia do rio Tocantins – 12/04/2022 – Ano 3 Nº 23, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/rede-mcti/cemaden/conteudo/monitoramento/monitoramento-hidrologico/relatorio-serra-da-mesa/situacao-atual-e-projecao-hidrologica-para-o-reservatorio-de-serra-da-mesa-bacia-do-rio-tocantins-12-04-2022-ano-3-no-23>>. Acesso: 02 ago. 2025.
- Collischonn, W., 2001. Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. 270f. Tese (Doutorado em Engenharia). Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

- Collischonn, W.; Tucci, C. E. M., 2001. Simulação hidrológica de grandes bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 6, n. 1, p. 95-118.
- Collischonn, W.; Pilar, J. V.; Cruz, M. A. S.; Mendiondo, E. M.; Mendes, C. A. B., 1999. Simulação hidrológica utilizando o hidrograma unitário derivado do modelo numérico do terreno. *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Belo Horizonte.
- Cunha, T. J. S. M. et al., 2018. Mapeamento e caracterização de solos de várzea do rio Tocantins. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 48, n. 1, p. 11-18.
- Eastman, J. R., 1995. *Idrisi for Windows users guide*. Clark University. Worcester.
- Ribeiro Neto, A., 2006. Simulação hidrológica na Amazônia: bacia do rio Madeira. 195f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Engie. Engie Brasil Energia, 2023. Disponível em: <<https://www.engie.com.br/atividades/geracao-de-energia/>>. Acesso em: 20 de maio de 2023.
- Fan F. M., Buarque D. C., Pontes, P.R.M., Collischonn W., 2015. Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Novembro de 2015, Brasília-DF. *Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. PAP019919.
- Fan, F. M., 2011. Acoplamento entre SIG e modelos hidrológicos: Integração do modelo MGB-IPH. 2011. Dissertação (Pós- Graduação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Fan, F. M., 2013. Simulação dos impactos de lançamentos de poluentes sobre a qualidade da água de bacias hidrográficas integrada com sistema de informação geográfica. Dissertação (Pós- Graduação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Ferreira, A. L.; Mendes, E. A.; Pereira, L. G., 2017. Ajuste de modelos hidrológicos em grandes bacias hidrográficas: estudo do Rio Tocantins. *Anais do Congresso Brasileiro de Recursos Hídricos*, v. 17, p. 1-12.
- Huffman, G. J. et al., 2019. *Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG), Version 07*. NASA Goddard Space Flight Center.
- Junk, W. J. et al., 2011. Biodiversity and its conservation in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil. 2011. *Aquatic Sciences*, v. 74, n. 3, p. 375-402.
- Leão, A. M. et al., 2015. Flood forecasting on the Tocantins River using ensemble rainfall forecasts and real-time satellite rainfall estimates. *ResearchGate*. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/276212024>>. Acesso: 23 abr. 2025.
- Machado, D. B. et al., 2016. Avaliação da influência da cobertura vegetal na resposta hidrológica de bacias hidrográficas na bacia do Rio Tocantins. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 9, n. 1, p. 107-122.
- Marengo, J. A., 2006. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília: MMA.
- Miranda, L. E., 2006. Environment and conservation in the Pantanal of Mato Grosso. *Aquatic Sciences*, v. 68, n. 3, p. 375-386.
- Moraes, J. C.; Silva, R. T.; Almeida, F. P., 2016. Avaliação do MGB-IPH em bacias brasileiras. *Acta Scientiarum: Agronomy*, v. 38, n. 3, p. 245-256.
- Nascimento, A. R. et al., 2023. Avaliação do desempenho do GPM-IMERG na bacia Tocantins - Araguaia. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 38, n. 2.
- Oliveira, R. F., 2016. Calibração e validação do modelo de grandes bacias MGB-IPH para a bacia do Alto Teles Pires. Trabalho Final de Graduação (Engenharia Agrícola e Ambiental). Universidade Federal de Mato Grosso. Mato Grosso.
- Santos, C. A. et al., 2017. Características morfológicas, físicas e químicas do solo em diferentes sistemas de uso na região de Palmas, TO. *Caderno de Ciências Agrárias*, v. 9, n. 2, p. 23-30.
- Rodrigues, D. J. et al., 2013. Influência de fatores ambientais na diversidade de peixes da bacia do Rio Tocantins, Brasil. *Biota Neotropica*, v. 13, n. 2, p. 152-160.
- Silva, F. G. et al., 2018. Modelagem hidrológica em grande escala: aplicação do modelo de grandes bacias MGB-IPH na bacia do Alto Paraguai. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 33, n. 3, p. 413-424.
- Soares, M. A. M., 2009. Uso de modelagem hidrológica para análise do regime de vazões na bacia do Rio Tocantins. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 14, n. 2, p. 85-97.