

Sistema FIEB



CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM  
COMPUTACIONAL E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

Dissertação de mestrado

**ANÁLISE DE VAZÃO E PRECIPITAÇÃO NA  
BACIA TOCANTINS-ARAGUAIA UTILIZANDO O  
MODELO WRF-HYDRO**

Apresentada por: José Roberto Dantas da Silva Júnior

Orientador: Prof. Dr. Davidson Martins Moreira

Março de 2023

José Roberto Dantas da Silva Júnior

# ANÁLISE DE VAZÃO E PRECIPITAÇÃO NA BACIA TOCANTINS-ARAGUAIA UTILIZANDO O MODELO WRF-HYDRO

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial, Curso de Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial do Centro Universitário SENAI CIMATEC, como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial**.

Área de conhecimento: Sistemas Complexos

Orientador: Prof. Dr. Davidson Martins Moreira

Salvador

2023

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

S586a Silva Junior, José Roberto Dantas da

Análise de vazão e precipitação na bacia Tocantins-Araguaia utilizando o modelo WRF-Hydro / José Roberto Dantas da Silva Junior. – Salvador, 2023.

85 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Davidson Martins Moreira.

Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2023.

Inclui referências.

1. Hidrometeorologia. 2. WRF-Hydro. 3. Modelagem computacional. 4. Segurança hídrica. 5. MATOPIBA I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Moreira, Davidson Martins. III. Título.

CDD 620.00113

---

## Nota sobre o estilo do PPGMCTI

---

Esta dissertação de mestrado foi elaborada considerando as normas de estilo (i.e. estéticas e estruturais) propostas aprovadas pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial e estão disponíveis em formato eletrônico (por solicitação via e-mail à secretaria do programa) e em formato impresso somente para consulta.

Ressalta-se que o formato proposto considera diversos itens das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), entretanto opta-se, em alguns aspectos, seguir um estilo próprio elaborado e amadurecido pelos professores do programa de pós-graduação supracitado.

**CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC****Mestrado Acadêmico em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial**

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Mestrado, intitulada **“ANÁLISE DE VAZÃO E PRECIPITAÇÃO NA BACIA TOCANTINS-ARAGUAIA UTILIZANDO O MODELO WRF-HYDRO”** apresentada no dia 30 de março de 2023, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial.

Assinado eletronicamente por:  
Davidson Martins Moreira  
CPF: \*\*\*.832.500-\*\*  
Data: 22/04/2023 09:38:50 -03:00



Orientador:

**Prof. Dr. Davidson Martins Moreira**  
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:  
Alex Álisson Bandeira Santos  
CPF: \*\*\*.191.765-\*\*  
Data: 19/04/2023 09:42:59 -03:00



Membro Interno:

**Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira Santos**  
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:  
MARCELO Albano MORET Simões Gonçalves  
CPF: \*\*\*.131.127-\*\*  
Data: 25/04/2023 10:04:12 -03:00



Membro Interno:

**Prof. Dr. Marcelo Albano Moret Simões Gonçalves**  
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:  
Diogo Nunes da Silva Ramos  
CPF: \*\*\*.300.584-\*\*  
Data: 19/04/2023 09:59:13 -03:00



Membro Externo:

**Prof. Dr. Diogo Nunes da Silva Ramos**  
FIEB

Assinado eletronicamente por:  
Marcelo Romero de Moraes  
CPF: \*\*\*.279.180-\*\*  
Data: 19/04/2023 15:23:55 -03:00



Membro Externo:

**Prof. Dr. Marcelo Romero de Moraes**  
UNIPAMPA

A jornada do conhecimento é uma travessia que nos transforma profundamente, levando-nos por caminhos inexplorados e revelando horizontes que antes pareciam distantes. Este trabalho é um reflexo dessa jornada de expansão, que somente foi possível graças ao suporte incondicional e ao amor de pessoas extraordinárias.

A meus pais, cujo amor e sacrifício formaram a base sólida sobre a qual pude construir meus sonhos, dedico este trabalho como um pequeno símbolo de minha eterna gratidão.

Vocês me ensinaram a valorizar a educação e a perseguir meus objetivos com determinação e integridade.

À minha esposa, companheira de todas as horas, cujo apoio inabalável e fé inquestionável em minhas capacidades foram o estímulo que me impulsionou a ir além das expectativas.

Seu amor, paciência e compreensão foram os pilares que me sustentaram nos momentos de dúvida e me motivaram a seguir em frente, mesmo quando o caminho parecia incerto.

À minha filha, meu maior tesouro na vida, que com sua alegria e espontaneidade me lembra diariamente da importância de olhar o mundo com olhos curiosos e coração aberto. Você me ensinou que cada descoberta, não importa o quão pequena, é um passo em direção ao crescimento.

Este trabalho é dedicado a vocês, que são meu porto seguro e minha fonte de inspiração.

Juntos, compartilhamos a crença de que o conhecimento é uma luz que ilumina os caminhos da vida, e é com profundo amor e gratidão que compartilho este sucesso com cada um de vocês.

"Uma mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original."

Albert Einstein

---

## Agradecimentos

---

Minha profunda gratidão a Deus, por me dar saúde e força, iluminando meu caminho com fé e perseverança diante dos desafios desta jornada.

À minha esposa, pilar de apoio e amor que me sustentou com sua fé inabalável, e à minha filha, que com sua alegria inocente me lembra da beleza e simplicidade da vida. Agradeço também aos meus pais, pelos valores sólidos que me ensinaram a importância da educação e do trabalho. E ao meu irmão Anderson, que me apontou o caminho desta jornada acadêmica.

Agradeço ao Prof. Dr. Davidson Martins Moreira, meu orientador, cujo apoio, incentivo e orientação foram fundamentais para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho. Sua dedicação e sabedoria foram fontes de inspiração e orientação constantes, proporcionando-me as ferramentas necessárias para superar os desafios acadêmicos e pessoais que se apresentaram.

Expresso minha sincera gratidão ao Centro Universitário SENAI CIMATEC pela excelência acadêmica e pelo estímulo ao desenvolvimento pessoal e profissional, elementos essenciais à minha formação.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), agradeço pelo essencial suporte financeiro que foi determinante para a realização deste projeto.

"Basta a cada dia o seu próprio mal" (Mateus 6:34)

Salvador, Brasil  
30 de Março de 2023

José Roberto Dantas da Silva Júnior

---

## Resumo

---

A gestão eficiente de recursos hídricos é um desafio crucial para o desenvolvimento sustentável global. Portanto, a governança sustentável da água requer uma abordagem interdisciplinar que integre conhecimentos sobre processos ambientais, sociais e tecnológicos, bem como estratégias inclusivas que envolvam cientistas, gestores, políticos, iniciativas públicas e privadas para produzir soluções colaborativas e contribuir para a segurança hídrica. O sistema WRF-Hydro representa o estado da arte em modelagem computacional de recursos hídricos, especialmente em estudos de pequenas e médias bacias hidrográficas que geralmente têm menos dados disponíveis para análises hidrometeorológicas. Neste contexto temos como objeto de estudo a Bacia Tocantins-Araguaia, localizada na delimitação geoeconômica denominada MATOPIBA, referenciada como uma fronteira agrícola composta por biomas dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. Conhecer as suas características hidrológicas é fundamental para o manejo da produção de grãos, pois eventos climáticos afetam seu rendimento. Portanto, o objetivo principal deste trabalho é avaliar o desempenho da modelagem hidrológica do WRF-Hydro na simulação de vazão e precipitação, considerando a variação de parâmetros de infiltração em uma área delimitada da Bacia Tocantins-Araguaia. As simulações foram realizadas com resolução espacial de 3 km e rede de canais de 100 m, no período de 01/01 a 11/06 de 2019. Para validar o desempenho do WRF-Hydro, os dados simulados foram comparados com os dados observacionais de estações fluviométricas e pluviométricas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Os resultados mostraram uma tendência de superestimação da vazão e precipitação, mas com uma representação satisfatória dos padrões observados, o que indica que o modelo tem capacidade de estimativa para fins operacionais. Demonstrando que a aplicação do WRF-Hydro tem o potencial de melhorar a previsibilidade, gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos, contribuindo para a segurança hídrica.

**Palavras-chave:** Hidrometeorologia, WRF-Hydro, Modelagem Computacional, Segurança Hídrica, MATOPIBA

---

## Abstract

---

The efficient management of water resources is a crucial challenge for global sustainable development. Therefore, sustainable water governance requires an interdisciplinary approach that integrates knowledge about environmental, social, and technological processes and inclusive strategies involving scientists, managers, politicians, and public and private initiatives to produce collaborative solutions and contribute to water security. The WRF-Hydro system represents the state of the art in computational modeling of water resources, especially in studies of small and medium-sized watersheds that generally have fewer data available for hydrometeorological analyses. In this context, the object of study of this research is the Tocantins-Araguaia Basin, located in the geoeconomic boundary known as MATOPIBA, referred to as an agricultural frontier composed of biomes from the states of Maranhão, Tocantins, Piauí, and Bahia. Knowing its hydrological characteristics is fundamental for grain production management, as climatic events affect its yield. The main objective of this work is to evaluate the performance of the WRF-Hydro hydrological modeling in simulating flow and precipitation, considering the variation of infiltration parameters in a delimited area of the Tocantins-Araguaia Basin. The simulations were performed with a spatial resolution of 3 km and a 100 m channel network, from 01/01 to 11/06 of 2019. To validate the performance of WRF-Hydro, the simulated data were compared with observational data from fluvimetry and pluviometry stations of the National Agency for Water and Basic Sanitation (ANA). The results showed a tendency of overestimation of flow and precipitation, but with a satisfactory representation of observed patterns, indicating that the model has estimation capacity for operational purposes. Demonstrating that the application of WRF-Hydro has the potential to improve the predictability, management, and planning of water resources, contributing to water security.

**Keywords:** Hydrometeorology, WRF-Hydro, Computational Modeling, Water Safety, MATOPIBA

---

# Sumário

---

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos . . . . .	4
1.1.1	Geral . . . . .	4
1.1.2	Objetivos específicos . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Revisão da Literatura</b>	<b>5</b>
2.1	Gestão de Recursos Hídricos . . . . .	5
2.2	Modelagem Computacional . . . . .	7
2.3	Modelo WRF . . . . .	10
2.4	Modelo WRF-Hydro . . . . .	17
2.5	Trabalhos correlatos . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	<b>30</b>
3.1	Área de estudo . . . . .	30
3.2	Domínios na área de estudo . . . . .	37
3.3	Modelagem com sistema WRF-Hydro . . . . .	39
3.4	Parametrizações físicas do Modelo WRF-Hydro . . . . .	44
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>46</b>
4.1	Resultados da simulação . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>55</b>
5.1	Conclusões . . . . .	55
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . .	56
<b>A</b>	<b>Produção Técnica e Científica</b>	<b>57</b>
	<b>Referências</b>	<b>59</b>

---

## Lista de Tabelas

---

3.1	Configuração dos domínios . . . . .	40
3.2	Dados das Estações Analisadas . . . . .	42
3.3	Parametrizações físicas utilizadas nas simulações do WRF-HYDRO . . . . .	44
4.1	Indicadores estatísticos da simulação . . . . .	50

---

## Lista de Figuras

---

2.1	Estrutura esquemática de um modelo de circulação geral . . . . .	8
2.2	Representação esquemática da estrutura de grade cartesiana usada em GCMs de diferenças finitas . . . . .	9
2.3	Estrutura esquemática de modelo climático regional . . . . .	10
2.4	Esquema simplificado da arquitetura e fluxo de dados do modelo WRF . . . . .	11
2.5	Coordenada vertical . . . . .	13
2.6	Grade do tipo C de Arakawa para componente horizontal (a) e componente vertical (b) . . . . .	16
2.7	Aninhamento de grades permitidos pelo modelo WRF em (a) e (b) . . . . .	17
2.8	Esquema generalizado da arquitetura WRF-Hydro . . . . .	18
2.9	Fluxo hidrológico WRF-Hydro . . . . .	19
2.10	Fluxo de execução do WRF-Hydro . . . . .	20
2.11	Pré-processamento WRF-Hydro . . . . .	21
2.12	Estrutura do sistema WRF-Hydro dado os aspectos físicos relacionados à meteorologia e o tipo de acoplamento. . . . .	22
2.13	Tendência de publicações acadêmicas sobre o WRF-Hydro . . . . .	28
2.14	Principais autores de publicações acadêmicas sobre o WRF-Hydro . . . . .	28
2.15	Histórico anual de publicações acadêmicas sobre o WRF-Hydro das principais instituições sobre o tema . . . . .	29
3.1	Delimitação territorial do MATOPIBA e suas mesorregiões, situado entre norte e o nordeste do Brasil. . . . .	32
3.2	Temperatura média no MATOPIBA. . . . .	33
3.3	Principais Bacias do MATOPIBA. . . . .	34
3.4	Principais Rios do MATOPIBA. . . . .	35
3.5	Distribuição de chuvas no MATOPIBA. . . . .	36
3.6	Área de estudo. . . . .	38
3.7	Delimitação dos domínios aninhados. . . . .	39
3.8	Localização do domínio de interesse com fluxos de água e estações hidrometeorológicas. . . . .	43
4.1	Análise de Vazão simulada e observada na Estação Itacajá . . . . .	47
4.2	Análise de Vazão simulada e observada na Estação Jacaré . . . . .	48
4.3	Análise de Vazão simulada e observada na Estação Goaitins . . . . .	48
4.4	Análise de Vazão/Precipitação simulada e observada na Estação Itacajá . . . . .	49
4.5	Análise de Vazão/Precipitação simulada e observada na Estação Jacaré . . . . .	49
4.6	Análise de Vazão/Precipitação simulada e observada na Estação Goiatins . . . . .	50
4.7	Dispersão da Vazão Observada/Simulada na Estação Itacajá . . . . .	51
4.8	Dispersão da Vazão Observada/Simulada na Estação Jacaré . . . . .	52
4.9	Dispersão da Vazão Observada/Simulada na Estação Goiatins . . . . .	53

---

## Lista de Siglas

---

AGCM	Atmospheric General Circulation Model
ANA	Agência Nacional de Águas
ARW	Advanced Research WRF
ASAS	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
CIMATEC	Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia
CLP	Camada Limite Planetária
CONUS	Continental United States
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DEM	Digital Elevation Model
D01	Domínio 01
D02	Domínio 01
ENSO	El-Niño Southern Oscillation
ESRI	Environmental Systems Research Institute, Inc.
GCM	General Circulation Model
GDAS-FNL	Global Data Assimilation System - Final Analysis
GIS	Geographic Information System
GOCART	Goddard Chemistry Aerosol Radiation and Transport
GSMaP	Global Satellite Mapping of Precipitation
HPC	High Performance Computing
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LSM	Land Surface Model
MATOPIBA	Sigla para Maranhão - Tocantins - Piauí - Bahia
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NMM	Nonhydrostatic Mesoscale Model
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NWP	Numerical Weather Prediction
OGCM	Ocean General Circulation Model
PPG-MCTI	Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial
RCM	Regional Climate Model
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
USGS	U.S. Geological Survey
USP	Universidade de São Paulo
UTC	Universal Time Coordinated
VIC	Variable Infiltration Capacity
WBE	Wastewater-based epidemiology
WPS	WRF Pre-Processing System
WRF	Weather Research and Forecasting Model
WRF-Hydro	Weather Research and Forecasting Model Hydrological
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

---

## Lista de Símbolos

---

$O_i$	quantidade observada no modelo
$M_i$	quantidade simulada pelo modelo
$r$	correlação linear entre simulação e observação
$NSE$	coeficiente de eficiência NASH-Sutcliffe
$RMSE$	raiz quadrada do erro médio
$Bias$	erro
$km$	quilômetro
$\Delta x$	comprimento da grade horizontal
$\Delta y$	comprimento da grade vertical
$\Delta \eta$	espaço entre dois níveis da CLP
$m/s$	metros por segundo
$mm$	milímetros
$\phi$	geopotencial
$p$	pressão
$p_0$ e $P_{h,s}$	pressão na superfície
$p_{top}$ e $P_{ht}$	pressão no topo da CLP
$\rho$	densidade
$\mu$	viscosidade
$R_d$	constante do ar seco
$\theta$	temperatura
$\alpha$	inverso da densidade
$u$	velocidade vento na direção horizontal
$v$	velocidade vento na direção lateral
$w$	velocidade vento na direção vertical
$c_p$	calor específico à pressão constante do ar
$c_v$	calor específico a volume constante do ar
$F_U$	forçante na direção horizontal
$F_V$	forçante na direção lateral
$F_W$	forçante na direção vertical
$F_\theta$	energia termodinâmica
$\nabla$	divergente
$g$	aceleração da gravidade

## Introdução

---

A gestão dos recursos hídricos ainda é um desafio global e alterações nos padrões médios de eventos climáticos globais são facilmente perceptível e vêm sendo objeto de diversos estudos científicos, na perspectiva de estimar e compreender o comportamento dessas mudanças, fornecendo subsídios relevantes à gestão dos recursos hídricos que vem potencialmente se tornando no maior desafio a nível mundial.

Em 2020, o Relatório de Desenvolvimento Hídrico das Nações Unidas destacou que apenas 10% dos países em desenvolvimento possuem sistemas de monitoramento relacionados à qualidade da água ([UNESCO, 2020](#)).

Em 2021, o Relatório Mundial sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos, sob título “O valor da água” ([UNESCO, 2021](#)), salientou que durante o período de 2009 – 2019, as inundações causaram quase 55.000 mortes (incluindo 5.110 apenas 2019), afetaram outras 103 milhões de pessoas (incluindo 31.000 em 2019) e causaram 76,8 bilhões de dólares em perdas econômicas (sendo US\$ 36,8 bilhões, apenas em 2019). Globalmente, as inundações e eventos extremos de precipitação aumentaram em mais de 50% na última década, ocorrendo a uma taxa quatro vezes maior do que em 1980, sendo o foco deste estudo.

No Brasil, por exemplo, tem sido observado um aumento significativo na ocorrência de eventos climáticos extremos na região amazônica durante as últimas décadas. Há uma crescente quantidade de evidências que sugere uma intensificação do ciclo hidrológico na bacia amazônica considerando como partida, o final da década de 1990, conforme [Barichivich et al. \(2018\)](#). Um aspecto notável da alteração na hidrologia da região amazônica é a frequência de inundações recentes, que tendem a ser generalizadas e, às vezes, graves para as populações que vivem próximas aos rios. No entanto, é comum que as áreas urbanas sofram impactos sociais mais significativos do que as áreas rurais ([MACIEL et al., 2020](#)).

Em 2022, o Relatório Mundial sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos, sob título “Águas subterrâneas: tornar visível o invisível” [UNESCO \(2022\)](#), destacou que metade do volume de água para uso doméstico mundial é captada de fontes subterrâneas já que a maioria da população rural não tem acesso a sistemas de abastecimento e 25% dessa água é utilizada em irrigação, projetando-se um nível de aumento anual dessa demanda na ordem de 1%, nas próximas três décadas. Essa utilização possui contrastes, pela falta de investimentos adequados em capacitação, infraestrutura e conhecimento do potencial dos recursos hídricos disponíveis, pois existem regiões em que muitas dessas fontes são

não renováveis (e.g. Saara na África e no Oriente Médio) e a segurança hídrica deve ser sempre observada. No entanto, há vastos aquíferos sub explorados na África Subsaariana onde apenas 3% das áreas agrícolas são equipadas com irrigação e utilizam apenas 5% de águas subterrâneas e se comparado com a utilização de 59%, na América do Norte e de 57% no sul da Ásia.

Essas mudanças climáticas, fenômenos naturais e antropogênicos (causado por grandes queimadas, desmatamento em larga escala, assoreamento de rios, urbanização etc.), são afetadas por diferentes variáveis. Dentre esses fenômenos naturais, as inundações podem ser classificadas como “desastres naturais”, pois causam muitas perdas econômicas e sociais associadas e, muitas vezes, perda de vidas. Portanto, entender os processos que levam a esses fenômenos, identificar e analisar mudanças direta ou indiretamente confirmadas nas variáveis para aprimorar a classificação de enchentes e outros fenômenos, para que ações possam ser tomadas visando mitigar os efeitos nocivos causados pela ocorrência de níveis elevados de água, secas e perda de biodiversidade.

Dessa forma, a compreensão dos fenômenos que determinam as mudanças no ciclo da água aprimorará o conhecimento necessário para o manejo mais adequado desse importante recurso natural, essencial para a produção e manutenção dos biomas. Assim, destaca-se a importância da pesquisa sobre os recursos hidrológicos e de suas variáveis, que estão relacionadas aos padrões exigidos para a sobrevivência biológica e segurança hídrica adequada para equilibrar a capacidade de consumo e produção do meio ambiente.

Nessa perspectiva, proporcionando o enfrentamento desses desafios, a modelagem computacional apresenta-se como um mecanismo relevante para a tomada de decisão. No entanto, o uso de soluções computacionais requer uma curva de aprendizado significativa, que ultrapassa o domínio de conhecimento comum. Além disso, os usuários que precisam dessas soluções geralmente vêm de outros domínios de conhecimento além da computação, e essa camada de conhecimento representa tempo adicional para desenvolvimento de pesquisa e execução de trabalho relacionado à solução. Portanto, a aplicação de ferramentas baseadas em modelos hidro meteorológicos é considerada uma alternativa promissora para atender às necessidades globais de análise e planejamento do uso da água, avaliação de impactos ambientais na hidrologia regional, previsão e mitigação de riscos. Logo, a representação hidro meteorológica requer um modelo capaz de caracterizar a hidrologia da atmosfera da superfície terrestre, onde a disponibilidade de dados e medições são fundamentais para o entendimento da dinâmica das bacias hidrográficas.

Neste contexto, o modelo numérico hidrometeorológico WRF-Hydro (Weather Research and Forecasting - Hydro) é utilizado como uma poderosa ferramenta computacional para simulação de séries históricas de eventos, assim como previsão de eventos em tempo futuro, capaz de preencher as lacunas de dados e cálculos obtidos através da simulação e

aplicação de modelos hidrológicos por meio da análise de padrões de séries temporais. O sistema de modelagem WRF-Hydro é uma técnica de última geração para estudar recursos hídricos e bacias hidrográficas de grande porte, assim como, de pequeno e médio porte. Como exemplo de grande porte, temos o serviço nacional de águas dos Estados Unidos, que usam o WRF-Hydro para toda área do CONUS (Continental United States), no entanto a solução tem papel importante nos cenários de pequeno e médio porte, onde a disponibilidade de dados para análise hidrometeorológica é baixa ([GOCHIS et al., 2020](#)).

Atualmente, o NCAR (National Center for Atmospheric Research), responsável pelo modelo WRF-Hydro, destaca quatro grandes desafios globais: enchentes, poluição, seca e biodiversidade. E, o sistema WRF-Hydro foi desenvolvido através de uma colaboração entre o NCAR e a NASA (National Aeronautics and Space Administration) desta forma permitindo aos usuários a criar, armazenar e comparar cenários futuros para modelagem e simulação de chuvas, gestão de reservatórios e previsão de inundações ([WERNER et al., 2019](#)).

Em todo o mundo, os modelos WRF-Hydro têm sido usados para prever e simular enchentes, eventos de precipitação severa causados por furacões, simulações de fluxo de água, umidade do solo, precipitação, evapotranspiração, e ainda são usados para estudar condições hidro meteorológicas em regiões áridas. e zonas úmidas (([RUMMLER et al., 2019](#)); ([SALAS et al., 2018](#)); ([SILVER et al., 2017](#)); ([SOMOS-VALENZUELA; PALMER, 2018](#)); ([SUN et al., 2020](#)); ([VARLAS et al., 2018](#)); ([VERRI et al., 2017](#))).

A nível nacional, no trabalho de ([WHITE et al., 2019](#)), foi aplicado o sistema WRF-Hydro no estado de Pernambuco buscando desenvolver uma ferramenta de gestão para simular chuvas, gestão de reservatórios e previsão de cheias. Em ([JÚNIOR et al., 2021](#)), também, empregou-se o WRF-Hydro no Nordeste do Brasil, na região de MATOPIBA com o objetivo de simular os fluxos dos corpos hídricos e o desenvolvimento de uma ferramenta web para a aplicação do modelo.

Dessa forma, o modelo WRF-Hydro tem-se mostrado um grande aliado na gestão de recursos hídricos e modelagem hidro meteorológica, assim como demonstrado em ([SUN et al., 2020](#)), pois este modelo possui um grande potencial para estudo de pequenas e médias bacias hidrográficas que tendem a ter uma menor disponibilidade de dados e estações hidro meteorológicas.

## 1.1 *Objetivos*

### 1.1.1 *Geral*

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho do modelo WRF-Hydro totalmente acoplado, com base nos dados de vazão e precipitação da bacia Tocantins-Araguaia, localizada na região do MATOPIBA.

### 1.1.2 *Objetivos específicos*

- Relacionar dados pertinentes para simulação do WRF-Hydro que afetam o ciclo hidrológico da área de estudo;
- Simular o WRF-Hydro na região de estudo, avaliando precipitação e vazão;
- Avaliar os resultados das simulações com a comparação dos dados medidos nas estações pluviométricas e fluviométricas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) em uma série temporal no ano de 2019.

Para alcançar os objetivos propostos, a dissertação está estruturada de forma que no:

**Capítulo 1**, introdução, é apresentada a motivação da pesquisa e sua relevância, além dos objetivos;

**Capítulo 2** - Revisão bibliográfica, é comentado alguns estudos que se relacionam com objeto desta pesquisa na aplicação do WRF-Hydro em várias partes do mundo;

**Capítulo 3** - Metodologia, é comentado e descrito o método utilizado para o desenvolvimento da proposta apresentada;

**Capítulo 4** - contém os Resultados da simulação realizada neste estudo, bem como a discussão acerca da comparação entre os dados simulados e os observados;

**Capítulo 5** - é composto pelas Considerações finais e os resultados esperados;

E por fim, as referências.

## Revisão da Literatura

Neste capítulo são apresentados os conceitos mais relevantes relacionados ao objeto de pesquisa desta dissertação. Além disso, apresenta breves descrições de trabalhos correlatos disponíveis na literatura a nível mundial, nacional e regional onde vem sendo aplicado e avaliado o desempenho do modelo WRF e WRF-Hydro.

### 2.1 *Gestão de Recursos Hídricos*

A escassez de sistemas de monitoramento da qualidade da água, em países em desenvolvimento, evidenciado pelo *Relatório das Nações Unidas para o Desenvolvimento Hídrico* (UNESCO, 2020), preconiza ações imediatas no sentido de mitigar essa carência. Assim, nesta pesquisa investiga-se fatores que através da ação natural e antrópica corroboram para potencializam os quatro grandes desafios mundiais.

De acordo com a Portaria conjunto 148 de 18/12/2013, da Secretaria Nacional de Defesa Civil, órgão do Ministério da Integração Nacional Branco e Saito (2017), segue-se algumas definições relevantes, tais como:

- Enchentes - genericamente, as cheias, ou enchentes, são as vazões que elevam os níveis de água em um corpo d'água (rios, lagos, lagoas etc.), até o limite da capacidade de drenagem de sua calha (canal principal por onde escoam as águas do corpo hídrico);
- Inundação – afirma-se como inundação, o transbordamento da calha do corpo hídrico pelas vazões que excedem sua capacidade de drenagem, acarretando submersão das áreas contíguas, chamadas de várzeas de inundação. Essa submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água se dá em zonas que normalmente não se encontram submersas. O transbordamento ocorre de modo gradual, geralmente ocasionado por chuvas prolongadas na bacia hidrográfica. Dessa forma, pode-se denominar como “inundação” o processo de alagamento urbano que tem por característica a extrapolação da capacidade de escoamento realizado pelo sistema de drenagem instalados nas regiões urbanas. Cabe destacar que esses eventos hídricos não caracterizam um desastre natural pois é o resultado de uma série de ações antropogênicas no espaço natural (e.g. desmatamento para o assentamento urbano e posteriores impermeabilização do solo urbano);
- Enxurrada – vem a ser o escoamento superficial concentrado e com alta energia de

transporte, que pode estar ou não associado ao domínio fluvial (do rio). Provocado por chuvas intensas e concentradas, normalmente em pequenas bacias de relevo acidentado. Apresenta grande potencial destrutivo;

- Alagamento - é a extrapolação da capacidade de escoamento de sistemas de drenagem urbana e consequente acúmulo de água em áreas rebaixadas atingindo ruas, calçadas ou outras infraestruturas urbanas, em decorrência de precipitações intensas;
- Cota de Transbordamento - é o nível de água de referência em uma determinada seção do rio obtida por meio de informação levantada em campo (não-estatística), a partir da qual se desencadeia o processo de inundação;
- Risco Hidrológico - é a combinação das possibilidades de ocorrência de eventos hidrológicos e os impactos negativos esperados sobre a população exposta. Este protocolo de ações integradas entre os órgãos signatários restringe-se ao desastre de Inundação, conforme definição acima. Portanto, pode-se afirmar que as inundações são fenômenos de transbordamento (naturais ou decorrente da ação humana), em que as áreas fora dos limites normais de um curso de água ou zonas que não são normalmente submersas, ocasionados por alto volume de chuvas que se acumulam nas bacias hidrográficas;
- Poluição - não obstante a existência de definições específicas amplamente conhecidas para a poluição, pode-se afirmar que a poluição da água é a contaminação dos corpos d'água por elementos físicos, químicos e biológicos que podem ser nocivos ou prejudiciais aos organismos, plantas e à atividade humana. Essa contaminação, pode ser oriunda de eventos naturais e, dos hábitos e práticas cotidianas da sociedade contemporânea que atuam direta e indiretamente para aumentar a poluição de lagos, rios e mares. Portanto, todos os integrantes da espécie humana dão sua contribuição nesse processo de degradação. Por isso, é responsabilidade de todos a mudança de hábitos que possam mitigar esse processo;
- Seca - é a escassez prolongada de precipitações (chuva) ou até mesmo inexistência, por um grande intervalo de tempo, geralmente da ordem de meses ou até mesmo anos, durante o qual a precipitação cai consideravelmente em relação aos níveis históricos climatológicos esperado e/ou apropriado. A baixa disponibilidade hídrica tende a causar sérios impactos sociais na região afetada, com impacto direto sobre a vida humana e o meio ambiente, pois todas as atividades são diretamente afetadas pela seca, a exemplo da agricultura.

Quanto ao “gerenciamento de reservatórios”, em 2003 foi lançado o SMART, que é uma estação instalada em uma plataforma ancorada na represa, transmitindo dados continuamente, via rádio, para o computador na barragem, permitindo aos operadores conhecerem a qualidade da água. Esses dados são retransmitidos via Internet para o instituto ([ERENO, 2003](#)).

Além dos fatores, cujas definições foram comentadas acima, uma gestão de recursos hídricos adequada deve analisar os resultados de estudos que focam na investigação das condições hidro meteorológicas, tais como:

- A previsão de enchentes para permitem aos usuários criarem, salvarem e compararem cenários futuros;
- Eventos severos de precipitações provocado por furacões;
- Simulações de fluxo em corpos d'água;
- Mitigação de resíduos em corpos d'água;
- Umidade do solo, precipitação evapotranspiração.

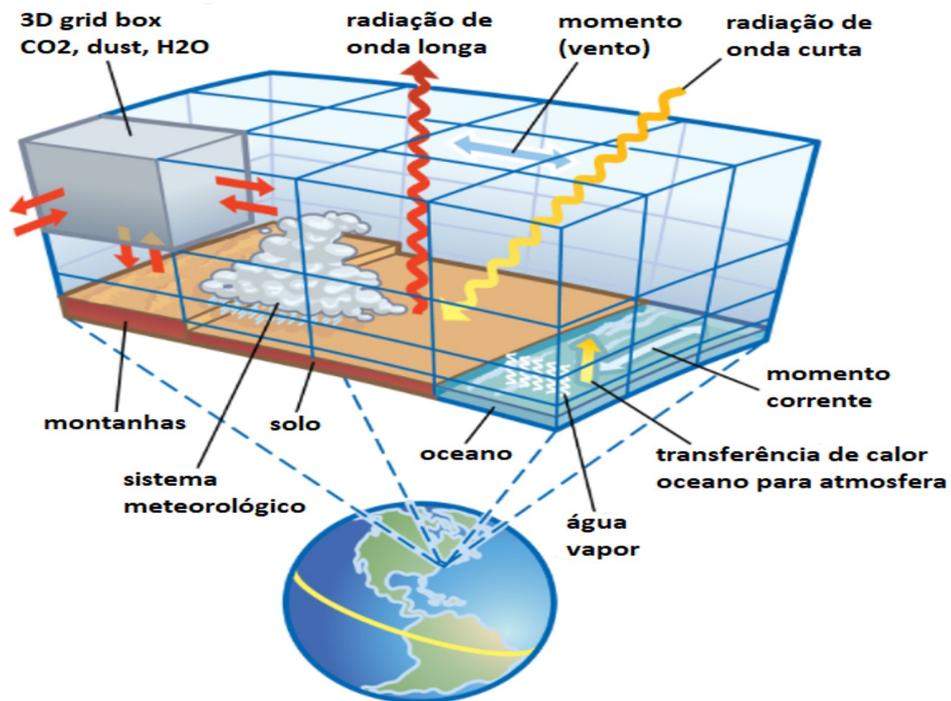
Esses fatores envolvidos nessas observações, também, resultam da ação natural e antrópica corroboram para potencializar os quatro grandes desafios mundiais no contexto hídrico: enchentes, poluição, seca e biodiversidade.

## ***2.2 Modelagem Computacional***

No presente século, houve uma intensificação dos avanços tecnológicos e científicos, permitindo a obtenção de conhecimentos que nos permitem uma melhor representação da atmosfera e compreensão dos princípios físicos que regulam seu movimento e composição. Isto é alcançado através da aplicação de métodos numéricos para solucionar as equações que modelam cada parte deste sistema complexo. Estes conhecimentos, combinados com o aumento da capacidade de processamento dos computadores e a ampliação da utilização de modelos matemáticos computacionais, possibilitaram uma maior eficiência na Previsão Numérica do Tempo ([SAMPAIO; DIAS, 2014](#)).

Os modelos NWP (Numerical Weather Prediction) são considerados a principal ferramenta para prever o estado da atmosfera, uma vez que consistem em um conjunto de equações que permitem simular os processos físicos, dinâmicos e termodinâmicos descritos em forma numérica e resolvidos em um ambiente computacional. As simulações climáticas globais são elaboradas utilizando modelos GCMs (General circulation models), representados na Figura 2.1.

Figura 2.1: Estrutura esquemática de um modelo de circulação geral

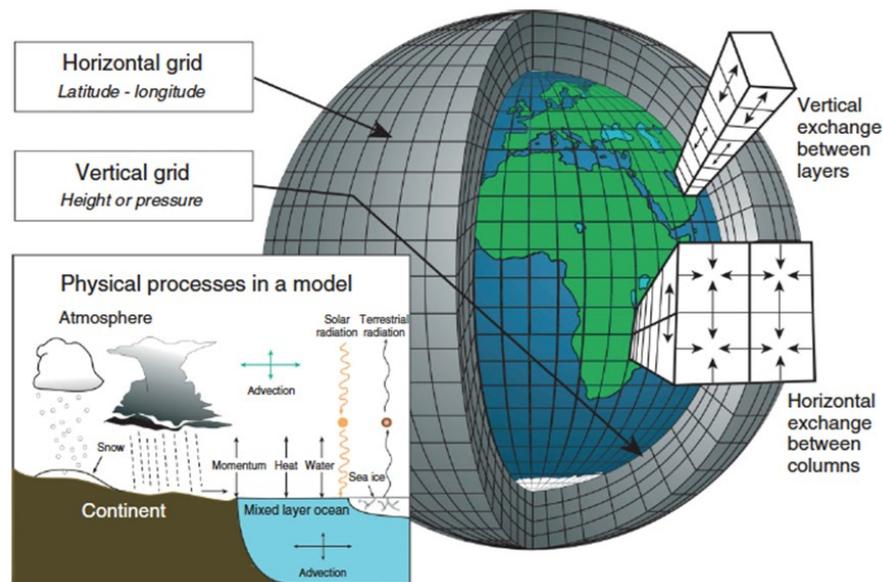


Fonte: (RUDDIMAN, 2001)

A Figura 2.1 ilustra o modelo geral de circulação e as interações entre os componentes do sistema climático, incluindo a atmosfera, oceanos e superfície terrestre. No entanto, cada um desses elementos é estudado individualmente devido a sua participação em fenômenos distintos.

As interações entre esses componentes são apresentadas na 2.2.

Figura 2.2: Representação esquemática da estrutura de grade cartesiana usada em GCMs de diferenças finitas



Fonte: (EDWARDS, 2011)

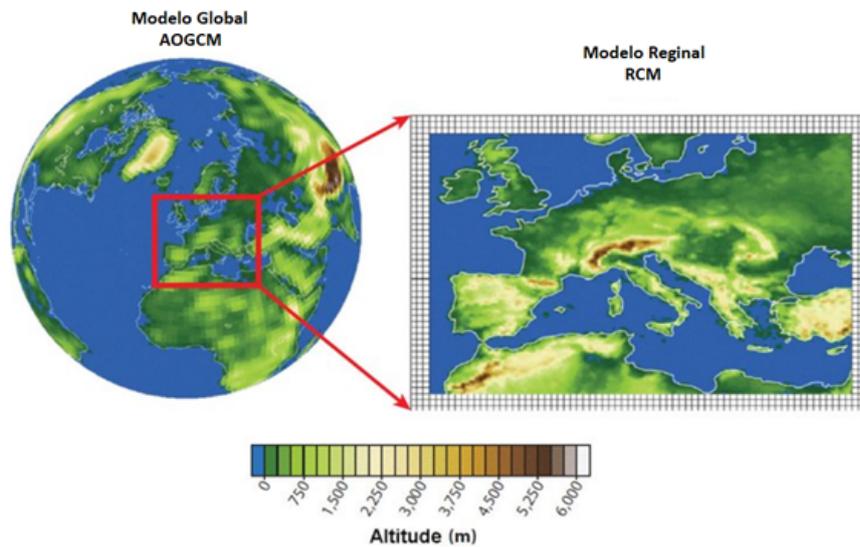
A Figura 2.2 ilustra o modelo geral de circulação e as interações entre os componentes do sistema climático, incluindo a atmosfera, oceanos e superfície terrestre.

Os primeiros experimentos envolvendo NWP utilizaram a abordagem liderada por Richardson (1922), que consistia no uso de grades cartesianas e métodos de diferença finita. Estes experimentos calcularam as transferências verticais e horizontais de massa e energia entre caixas de grade em um período (geralmente 10 a 15 minutos), conforme representado na Figura 2.2. Os primeiros modelos de NWP impuseram suposições simplificadoras para reduzir as demandas de cálculo dos modelos, e todos eles eram regionais (em vez de globais) em escala Ereno (2003). Deste modo, integram os modelos de circulação geral, os AGCMs (Atmospheric General Circulation Models) que simulam as circulações presentes na atmosfera e os OGCMs (Ocean General Circulation Models) que simulam as circulações oceânicas (GIORGI; JR, 2015).

A previsão do tempo em todo o planeta é estimada pelos modelos globais com resolução horizontal em torno de 200 km, e são inicializados com condições iniciais de todo o globo. As restrições dos GCMs, principalmente devido às resoluções utilizadas, levaram à necessidade de desenvolver modelos que pudessem resolver processos de pequena escala. Assim, foram criados os modelos climáticos regionais (RCMs – Regional Climate Models) Haupt et al. (2017) que possuem uma resolução mais fina numa área limitada, como mostra a Figura 2.3, ou seja, os modelos regionais são inicializados pelas condições de fronteira dos GCMs ou de reanálises. Os RCMs permitem solucionar processos físicos em escalas menores e conseqüentemente revelam maior riqueza de detalhes, pois evidenciam melhor

a superfície e os fenômenos regionais (FERRARI, 2018)

Figura 2.3: Estrutura esquemática de modelo climático regional



Fonte: (GIORGI; JR, 2015)

Os modelos regionais dependem de condições iniciais e de contornos laterais, obtidas através de modelos globais de baixa resolução, desta forma os erros provenientes destes contornos, também são fatores limitantes na utilização dos modelos de mesoescala e afetam, conseqüentemente, a qualidade das previsões (BENDER, 2012). O aumento do potencial dos supercomputadores proporcionou a evolução da capacidade de previsão do tempo através de modelos numéricos, o que permite melhor resolução e menores aproximações numéricas nos modelos atmosféricos, além da melhor representação dos processos físicos nos modelos (AMBRIZZI; ARAUJO, 2014).

Os modelos numéricos de previsão do tempo são ferramentas de grande relevância no desenvolvimento tecnológico e científico. Portanto, faz-se necessário o acompanhamento do desempenho dos modelos e das parametrizações no estudo da dinâmica da atmosfera, sendo que, é nessa perspectiva que este trabalho se embasa, tendo como foco a utilização do modelo numérico WRF-Hydro.

## 2.3 Modelo WRF

O WRF é um sistema de modelagem atmosférica voltado para pesquisa e previsão numérica do tempo. Ele vem sendo adotado para pesquisas em universidades e laboratórios governamentais, por entidades governamentais e do setor privado para aplicações comerciais por indústria. O sistema, cuja utilização iniciou-se progressivamente por volta da

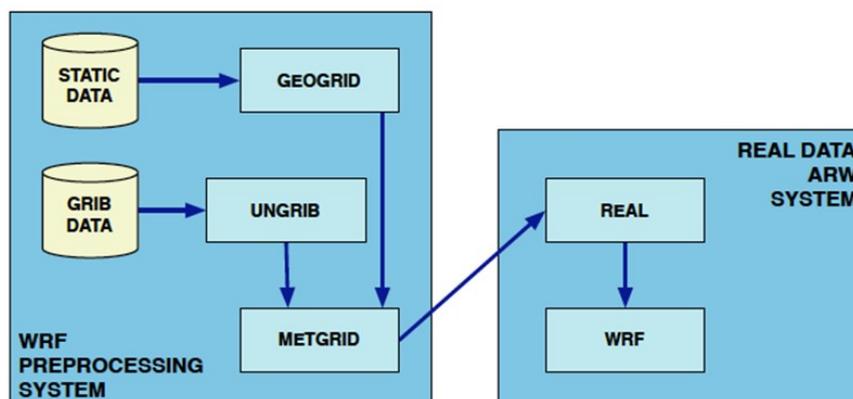
segunda metade da década de 1990, foi desenvolvido em parceria com NCAR e outros órgãos do país, como o NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), Força Aérea dos Estados Unidos e a Universidade de Oklahoma ([SKAMAROCK, 2008](#)). Nos anos seguintes, o uso do WRF foi sendo expandido, fornecendo recursos especializados para diversas aplicações no sistema terrestre, como química atmosférica, hidrologia e radiação. ([POWERS et al., 2017](#)) destacam que desde seu lançamento público inicial o WRF se tornou indiscutivelmente o modelo atmosférico mais usado do mundo.

O objetivo da concepção do modelo WRF é ser uma ferramenta de ponta na simulação atmosférica, cujo código é de domínio público e disponibilizado gratuitamente. Como resultado, o modelo tem sido amplamente utilizado em várias instituições de pesquisa no Brasil, como o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), a Universidade de São Paulo (USP) e o Centro Universitário SENAI CIMATEC. Muitos dos estudos desenvolvidos com o modelo WRF se concentram na modelagem numérica aplicada à atmosfera, e isso tem sido possível graças à capacidade do modelo de selecionar as opções que melhor descrevem a meteorologia da região em análise.

O WRF em sua forma pura sem módulos, complementos ou acoplamento, se apresenta em duas opções: ARW (Advanced Research WRF) e NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model). A opção ARW é mais adequada para simulações atmosféricas de alta resolução, enquanto a opção NMM é mais adequada para simulações de larga escala em mesoescala, neste trabalho estamos considerando o WRF-ARW como base do acoplamento para o WRF-Hydro Coupled.

O WRF-ARW é composto dos seguintes componentes principais: WPS, ARW e pós-processamento. A Figura 2.4 ilustra os componentes principais do WRF.

Figura 2.4: Esquema simplificado da arquitetura e fluxo de dados do modelo WRF



Fonte: ([SKAMAROCK, 2008](#))

A Figura 2.4 demonstra uma representação esquemática do fluxo de informações do modelo WRF, incluindo o WRF Preprocessing System (WPS). Este sistema é composto por três programas distintos, nomeadamente o Geogrid, Ungrib e Metgrid que desempenham a tarefa de pré-processamento e preparação das condições iniciais e de contorno para a simulação atmosférica. O Geogrid, um dos programas do conjunto, define os domínios da simulação com base nas especificações definidas pelo usuário no arquivo *namelist.wps*. Adicionalmente, este programa também cria arquivos estáticos dos dados terrestres por meio da interpolação de informações como dados de uso do solo, altitude do terreno e outras características geográficas. O Ungrib, por sua vez, realiza a leitura dos arquivos relacionados com as condições iniciais e de fronteira a serem usados no modelo (e.g. GFS, GDAS-FNL etc), enquanto o Metgrid é responsável pela interpolação dos dados meteorológicos convertidos para os domínios definidos pelo Geogrid, a fim de serem inseridos no programa principal, o Real.exe que é a etapa de preparação das condições iniciais (*wrfinput-d01*), no qual localiza-se o núcleo dinâmico do modelo (SKAMAROCK, 2008).

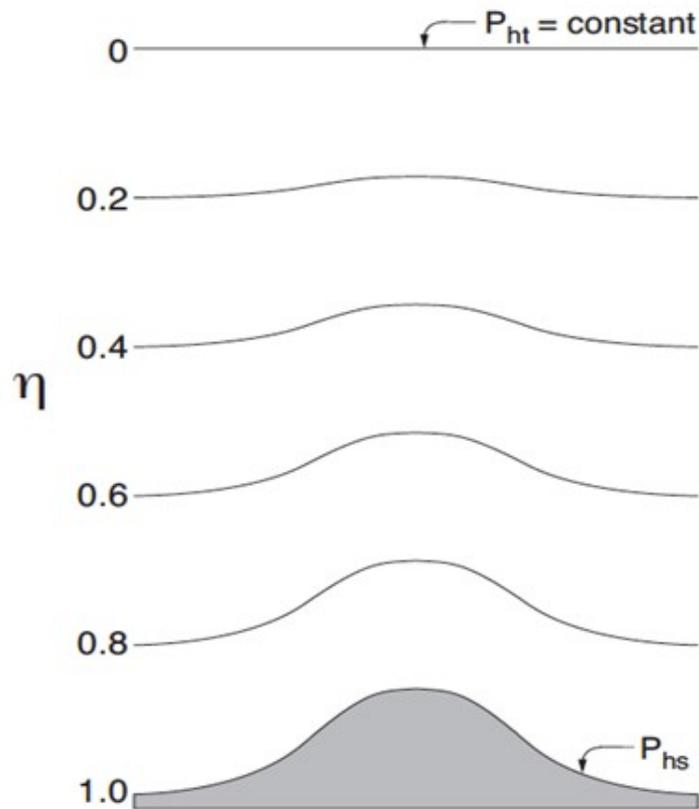
Os dados utilizados no modelo WRF são divididos em duas categorias distintas. A primeira categoria é composta por dados estáticos, que são fornecidos pelo United States Geological Survey (USGS) e possuem resolução de 10', 5', 2' e 30". A segunda categoria é composta por dados meteorológicos, que são provenientes de previsões, análises ou reanálises de modelos globais de previsão numérica. Exemplos de tais modelos incluem o Global Forecast System (GFS) do NCEP que apresenta uma resolução horizontal de  $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$  e uma resolução temporal de 6 horas em 6 horas.

O processamento principal do modelo WRF é conduzido pelo núcleo ARW, que é responsável pela resolução da dinâmica e das parametrizações físicas. Esse núcleo é composto pelos programas 'Real' e 'WRF' que é capaz de resolver as equações de Euler não-hidrostáticas e compressíveis em uma ampla gama de escalas, desde alguns metros até milhares de quilômetros. As equações são formuladas utilizando um sistema de coordenadas de pressão vertical que segue o relevo em níveis próximos à superfície e alcança a fronteira superior do modelo, definida como coordenada  $\eta$  (eta) (SKAMAROCK, 2008).

$$\eta = \frac{(P - P_{top})}{(P_o - P_{top})}$$

Considerando  $P$  a variável de pressão em um determinado nível  $\eta$  (eta), a pressão  $P_{top}$  no contexto do topo do perfil atmosférico e a pressão na superfície  $P_o$ . Na Figura 2.5 é demonstrado o sistema de coordenadas verticais de pressão.

Figura 2.5: Coordenada vertical



Fonte: (SKAMAROCK, 2008)

No sistema de coordenadas verticais de massa, o parâmetro  $\eta$  varia de 1 na superfície até 0 (zero) no topo do domínio vertical do modelo.

Para simular a atmosfera, o WRF-ARW utiliza equações que representam de forma realística diversos processos físicos. No entanto, a atmosfera apresenta características não lineares e caóticas que tornam impossível a resolução analítica dessas equações. Por essa razão, métodos numéricos são aplicados para a realização dos cálculos necessários (LORENZ, 1963).

A utilização de soluções numéricas implica em erros adicionais ao sistema. Para solucionar problemas em modelos numéricos, é necessário realizar a discretização do espaço e do tempo. Este procedimento consiste em distribuir pontos específicos em uma grade sobre a região de interesse, e realizar a solução em cada nível vertical a cada passo de tempo Kitagawa et al. (2022). As propriedades conservativas do fluxo são representadas no WRF-ARW pelas equações de Euler não hidrostáticas. Essas equações são formuladas em um sistema de coordenadas verticais de pressão hidrostática. Laprise (1992). Sendo assim, as equações na forma diferencial são:

- Equações de conservação do Movimento;

$$\partial_t U + (\nabla V u) - \partial_x(p\phi_\eta) + \partial_\eta(p\phi_x) = F_U$$

$$\partial_t V + (\nabla V y) - \partial_y(p\phi_\eta) + \partial_\eta(p\phi_y) = F_V$$

$$\partial_t W + (\nabla V w) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_W$$

- Equação de conservação da Energia (Termodinâmica);

$$\partial_t \theta + (\nabla \theta) = F_e$$

- Equação de conservação da Massa (Continuidade);

$$\partial_t \mu + (\nabla V) = 0$$

- Equação geopotencial;

$$\partial_t \phi + \mu^{-1}[(V \nabla_\phi) - gW] = 0$$

- Equação do Estado Termodinâmico.

$$p = p_0 \left( \frac{R_d \phi}{p_0 \alpha} \right)^y$$

Sendo que  $\mu v = (U, V, W)$ ,  $\theta = \mu\theta$  e  $v = (u, v, w)$  são as componentes das velocidades covariantes nas direções horizontal, transversal e vertical, os termos  $(F_U, F_V, F_W, F)$  representam as forçantes inerentes, segundo a física do modelo, mistura turbulenta, projeções esféricas e rotação da terra.  $\theta$  representa temperatura potencial,  $\phi = gz$  é o geopotencial,  $p$  é o parâmetro que representa a pressão,  $\alpha = \rho^{-1}$  o indica o inverso da densidade ou volume específico,  $y = \frac{c_p}{c_v}$  é a razão entre calores específicos para o ar seco,  $R_d$  é a constante para o ar seco e  $p_0$  a pressão de referência (tipicamente de  $10^5 Pa$ ). Além disso, deve-se ter em mente que WRF considera o efeito da força de Coriolis e a inclusão da umidade do ar na equação de Euler.

A representação dos processos de subgrade ou processos físicos de pequena escala são realizados através de esquemas de parametrizações e esse fato é em decorrência da impossibilidade de representar esses processos adequadamente através de equações dinâmicas em um modelo que utilize métodos numéricos, como em [Kitagawa et al. \(2022\)](#) Nesses esquemas são desenvolvidas fórmulas simplificadas para incluir os termos associados aos fluxos turbulentos de momento, calor e umidade que aparecem devido à integração das equações e substituem os modelos teóricos mais complexos. As parametrizações são implementadas em módulos separados e subdivide-se em: microfísica, radiação atmosférica, camada superficial, Modelo Solo-Superfície, Camada Limite Planetária (CLP) e parametrização Cumulus [Skamarock \(2008\)](#). No interior de cada um desses módulos de parametrização,

existem outros subconjuntos de parametrizações para resolver os processos de forma implícita. A utilização de parametrizações é um procedimento complexo e estas interagem entre si, ou seja, qualquer alteração em uma dessas parametrizações afetará todas as outras, interferindo diretamente em toda simulação. Portanto, na aplicação de qualquer tipo de parametrização é imprescindível realizar uma análise do processo como um todo para verificar quais são as parametrizações que representam mais adequadamente a região em que se pretende realizar a simulação.

Os esquemas de parametrização da física dos modelos interagem de modo não linear com o núcleo dinâmico. Esses esquemas de parametrizações de microfísica utilizam processos resolvidos de forma explícita para o vapor de água, nuvem e precipitações. Assim, a parametrização considera os processos de nuvem, gelo e água, além dos impactos de aerossóis no desenvolvimento de nuvens e precipitação. Os aerossóis são classificados em aerossóis higroscópicos e não higroscópicos.

As parametrizações de cumulus são responsáveis por representar os efeitos de escala de sub-grade para nuvens rasas e convectivas, levando em conta os fluxos verticais devido aos movimentos ascendentes, descendentes e compensatórios fora das nuvens em escalas não resolvidas pela grade do modelo. A parametrização de cumulus é geralmente aplicada em escalas espaciais maiores, com espaçamento de grade em torno de 5 km ou mais, devido ao fato de que esses esquemas são baseados em equações empíricas que dependem do tamanho e intensidade das nuvens, e podem variar significativamente em escalas menores do que 5 km. No entanto, em escalas menores, as nuvens cumulus individuais podem ser resolvidas diretamente pelos modelos numéricos de previsão do tempo, o que torna desnecessário o uso da parametrização de cumulus ([AMIRUDIN et al., 2022](#)).

Os processos atmosféricos, como turbulência e microfísica das nuvens, adquirem maior relevância em escalas menores e devem ser tratados de forma explícita pelos modelos numéricos. Cabe ressaltar que o esquema de cumulus é relevante para a produção de precipitação de nuvens convectivas e por sua vez é um input meteorológico importante para a modelagem hidrológica do WRF-Hydro.

Através dos esquemas de parametrização da camada limite superficial são determinadas as velocidades de atrito e os coeficientes de troca que possibilitam o cálculo do gradiente de temperatura da superfície e dos fluxos de umidade nos modelos de solo-superfície e da turbulência superficial no esquema da camada limite planetária. Os fluxos de superfície neste trabalho foram calculados tomando como base a Teoria da Similaridade [Monin e Obukhov \(1954\)](#). O esquema 'Eta Similarity', também, inclui um esquema de condensação parcial para obter maior acurácia na previsão das precipitações.

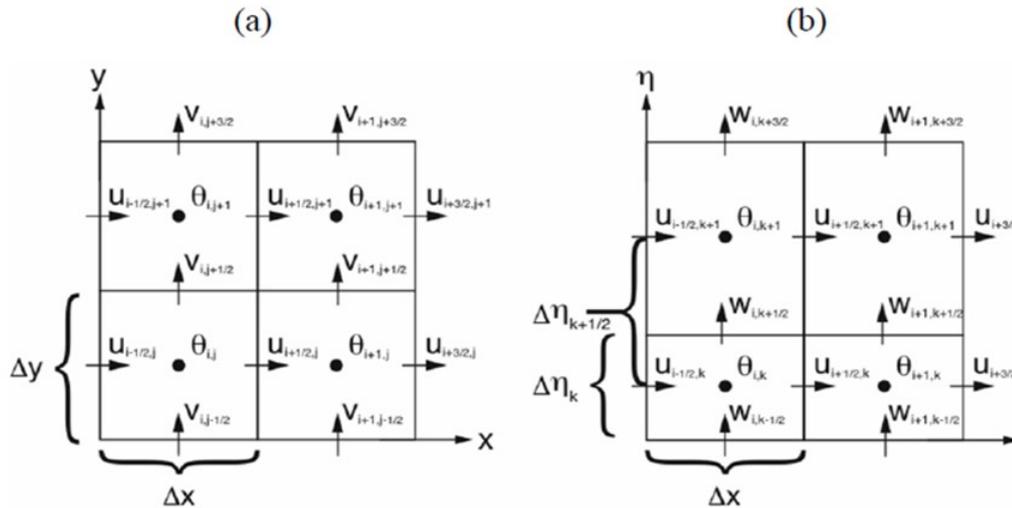
A partir da parametrização da CLP pode-se determinar os perfis de fluxo na camada limite

convectiva e na camada estável, além disso possibilitam identificar tendências atmosféricas de temperatura, umidade e momento em toda a coluna atmosférica (Arakawa e Lamb (1977); (SKAMAROCK, 2008)).

Na parametrização da superfície do solo reúne-se os dados atmosféricos obtidos pelo esquema da camada superficial, de precipitação pelos esquemas microfísicos e convectivos e de radiação pelo esquema de radiação Skamarock (2008). Neste trabalho, o esquema utilizado foi o modelo de solo-superfície Noah LSM (Land Surface Model) de quatro camadas em que se considera a zona radicular, evapotranspiração, drenagem do solo e escoamento superficial, e ainda inclui as categorias de vegetação, fração e textura do solo. Esse esquema permite obter os fluxos de calor sensível e latente para o esquema de CLP, conforme (SKAMAROCK, 2008).

O sistema de grade do modelo é a grade alternada do tipo C de Arakawa Arakawa e Lamb (1977) para discretização das variáveis espacial. Nesse tipo de grade as variáveis termodinâmicas e de umidade são determinadas no mesmo ponto de grade, enquanto as componentes horizontais de velocidade do vento  $u$  e  $v$  são normais (perpendiculares) às respectivas células da grade, conforme ilustrado na Figura 2.6.

Figura 2.6: Grade do tipo C de Arakawa para componente horizontal (a) e componente vertical (b)



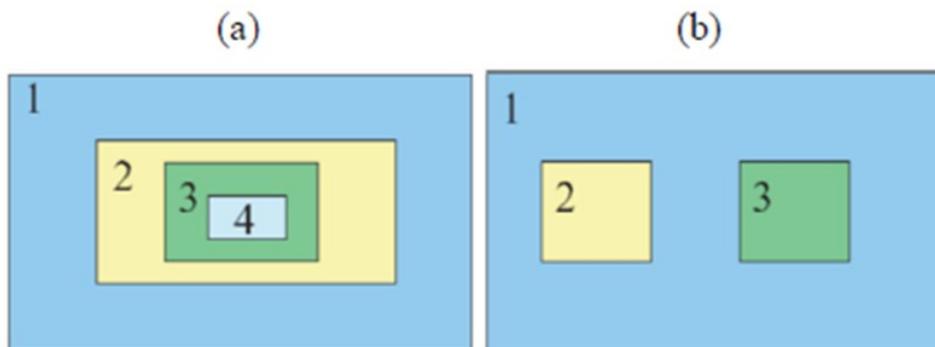
Fonte: (SKAMAROCK, 2008)

Por simplicidade, adota-se o comprimento dos pontos de grade  $\Delta x$  e  $\Delta y$  como constantes na formulação do modelo, e  $\Delta \eta$  representa o espaçamento entre dois níveis verticais (SKAMAROCK, 2008). Durante a simulação ocorre a interpolação das malhas ao longo das camadas verticais. A integração temporal do modelo é realizada através do esquema Runge-Kutta de 3ª ordem para ondas de baixa frequência e para ondas acústicas de alta frequência o esquema de integração é executado em pequenos passos de tempo a fim de

manter a estabilidade numérica.

O WRF-ARW permite a interação entre grades ou aninhamento horizontal de grades, possibilitando a resolução espacial ser focada sobre a região de interesse através da inserção de um ou mais domínios internos no domínio da simulação. A interação entre os domínios pode ser unidirecional (*one-way*) e bidirecional (*two-way*). Nas duas possibilidades, as condições de contorno da grade menor (domínio interno e malha fina) são interpoladas partindo da previsão gerada pela grade maior (domínio externo e malha grossa). A Figura 2.7, pode-se observar a interação e interpolação entre as grades  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ ;  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 3$ . Na integração do sistema unidirecional (*1-way*), a troca de informações realiza-se no sentido do domínio maior para o domínio menor e na integração bidirecional (*2-way*), ocorre a troca de informações entre os domínios em ambos os sentidos.

Figura 2.7: Aninhamento de grades permitidos pelo modelo WRF em (a) e (b)



Fonte: (SKAMAROCK, 2008)

Depois de realizada a etapa da interpolação e o equilíbrio dinâmico vertical dos dados, o ‘*real*’ encaminha os dados resultantes para o ‘*WRF*’ que executa, ou seja, processa os dados do modelo. Finalmente, durante a etapa de pós-processamento o *ARWpost* gera um arquivo (*formato NetCDF*) que converte as saídas do modelo. Existem diversas ferramentas que podem ser utilizadas para realizar o pós-processamento e algumas delas são gratuitas, tais como: *Python*, *VERDI*, *Grads* etc. Além dessas, há outras ferramentas que demandam a obtenção de licença de uso como o *ESRI* e o *ArcGIS*.

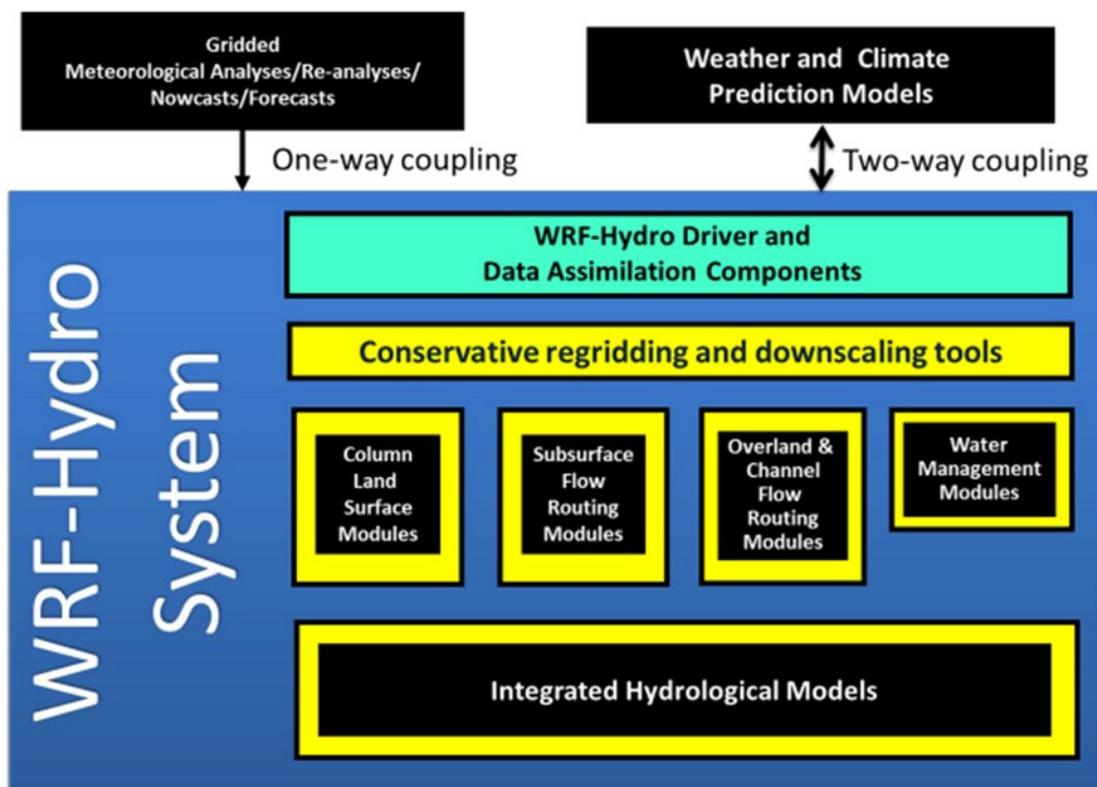
## 2.4 Modelo WRF-Hydro

O módulo de modelagem hidrológica do modelo WRF, chamado sistema WRF-Hydro, representa o estado da arte no que diz respeito aos recursos hídricos, o qual proporciona um acoplamento entre um modelo atmosférico e um modelo hidrológico. O sistema WRF-Hydro foi desenvolvido pelo NCAR em parceria com a NASA para modelar e simular

chuvas, gerenciamento de reservatórios e previsão de enchentes que permitem aos usuários criar, salvar e comparar cenários futuros. Maiores detalhes quando a estrutura numérica e computacional do modelo pode ser obtida no documento técnico publicado pelo NCAR (GOCHIS et al., 2018).

A extensão hidrológica do WRF (WRF-Hydro) desenvolvida para facilitar representações melhoradas de processos hidrológicos e terrestres relaciona-se com a redistribuição espacial de águas superficiais, subterrâneas e de canal através da superfície terrestre e facilita o acoplamento de modelos hidrológicos com modelos atmosféricos. Assim, o WRF-Hydro é essencialmente um grupo de módulos e funções que tratam da comunicação de informações entre os componentes da atmosfera e conjuntos de componentes de hidrologia da superfície terrestre em uma resolução espacial bastante alta (normalmente 1 km ou menos) usando uma variedade de abordagens baseadas na física. Ele pode ser executado de modo autônomo ou acoplado a um modelo atmosférico (GOCHIS et al., 2018).

Figura 2.8: Esquema generalizado da arquitetura WRF-Hydro

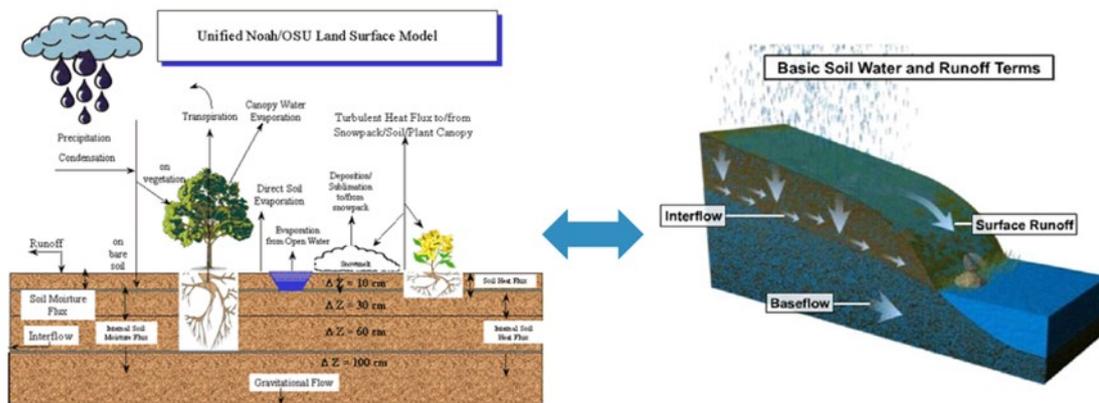


Fonte: (GOCHIS et al., 2020)

A Figura 2.8, apresenta esquematicamente, o sistema WRF-Hydro onde há uma arquitetura de acoplamento entre modelos meteorológicos e climáticos e modelos hidrológicos terrestres e sistemas de assimilação de dados terrestres, possuindo atributos para muitos processos hidrológicos terrestres típicos, como escoamento superficial, fluxo de canal, fluxo

de lago/reservatório, fluxo subsuperficial e trocas terra-atmosfera. E, sendo executado em modo autônomo, o WRF-Hydro lê os dados meteorológicos necessários para realizar cálculos de modelo de superfície terrestre e contém as rotinas necessárias para fazer isso. Por outro lado, sendo executado em um modo acoplado com um modelo atmosférico, os dados de forçamento meteorológico são fornecidos pelo modelo atmosférico com uma frequência ditada pelo intervalo de tempo do modelo da superfície terrestre especificado.

Figura 2.9: Fluxo hidrológico WRF-Hydro



Fonte: (GOCHIS et al., 2020)

Conforme vemos na Figura 2.9 a modelagem hidro meteorológica requer robustez para ser capaz de caracterizar a hidrologia da atmosfera superficial da Terra, inclusive onde a disponibilidade e as medições dos dados fundamentais para a compreensão da dinâmica de uma bacia hidrográfica possam até ser obtidos através de simulações. Haja visto, os resultados obtidos através da aplicação do modelo WRF-Hydro, a nível mundial, em estudos que realizam a previsão e simulação de inundações, eventos severos de precipitações provocado por furacões, simulações de fluxo em corpos d'água, umidade do solo, precipitação evapotranspiração e ainda estudos das condições hidro meteorológicas, tanto em regiões áridas quanto em regiões úmidas.

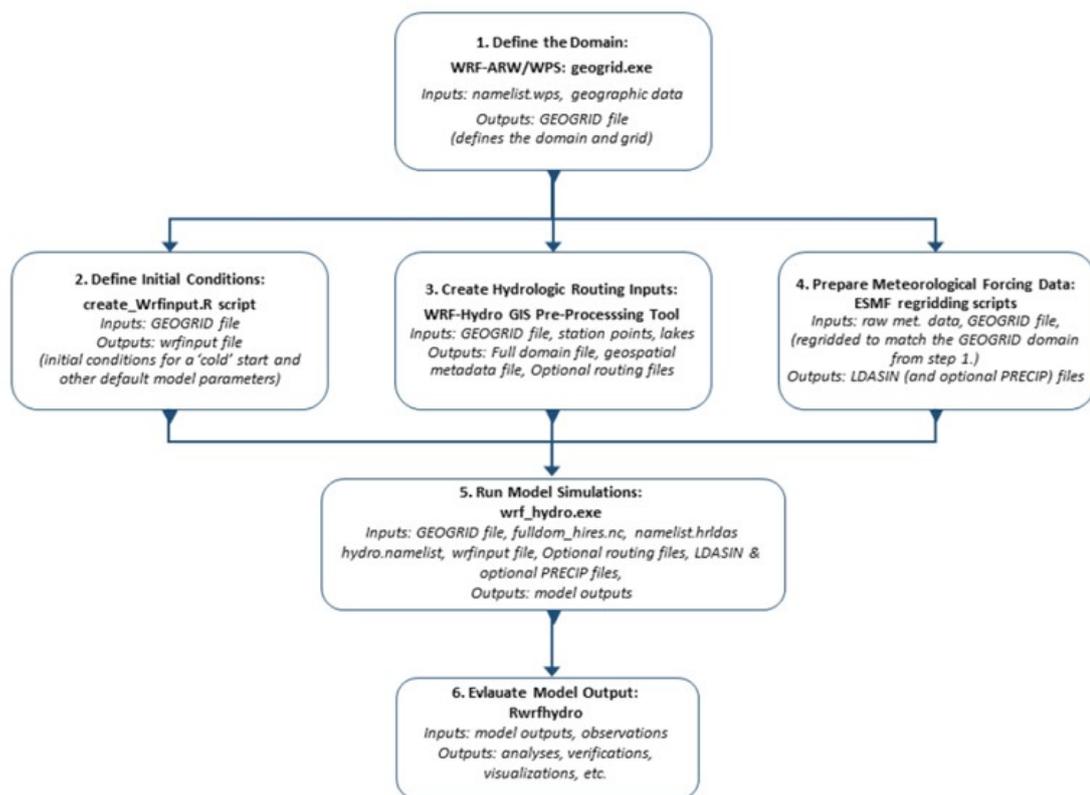
Na 2.10, está exposto o fluxo de execução do WRF-Hydro, geralmente é composto por etapas que incluem:

- Preparação de dados: esta etapa envolve a preparação dos dados de entrada necessários para o modelo, incluindo dados de topografia, dados de uso da terra, dados de precipitação e outros dados de forçamento atmosférico;
- Preparação do domínio: nesta etapa, o usuário define o domínio do modelo e seleciona as grades do modelo a serem usadas para simular os processos hidrológicos;
- Execução do modelo atmosférico WRF: nesta etapa, o modelo atmosférico WRF é

executado para gerar a previsão do tempo. O modelo WRF simula os processos atmosféricos que influenciam a precipitação, a evapotranspiração e outros fluxos hidrológicos;

- Execução do modelo hidrológico WRF-Hydro: nesta etapa, o modelo hidrológico WRF-Hydro é executado usando as saídas do modelo WRF como entrada. O modelo WRF-Hydro simula os processos hidrológicos, incluindo o escoamento superficial, escoamento subterrâneo, fluxos de base e interações com o modelo de transporte de sedimentos;
- Pós-processamento dos resultados: nesta etapa, os resultados do modelo são processados e visualizados. Isso pode incluir a geração de mapas de precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial, escoamento subterrâneo e outras variáveis hidrológicas.

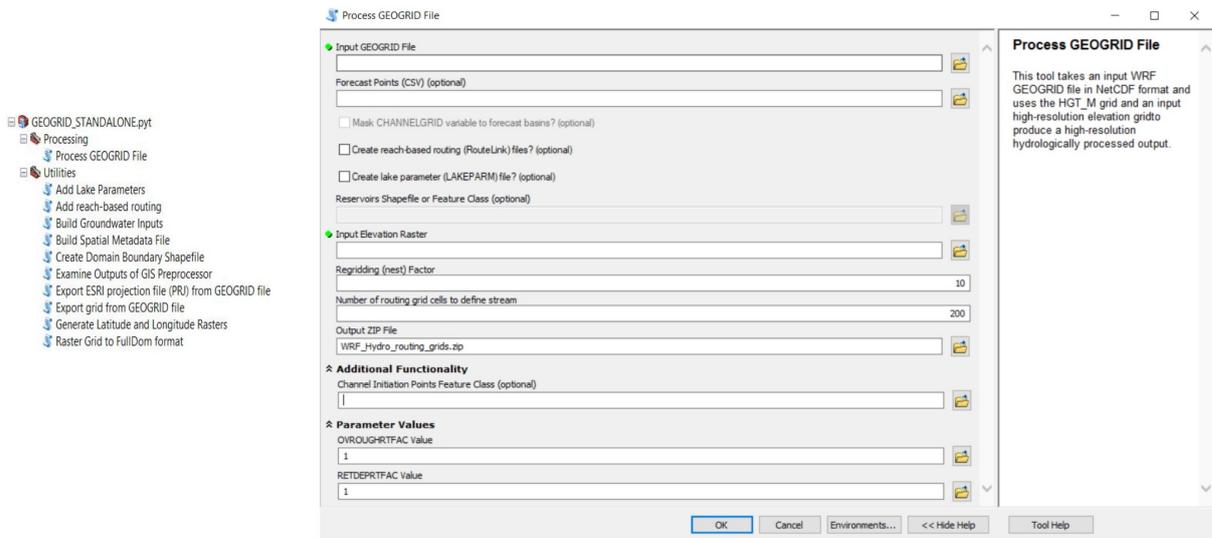
Figura 2.10: Fluxo de execução do WRF-Hydro



Fonte: Adaptado (GOCHIS et al., 2020)

Na terceira etapa, temos a fase de pré-processamento realizada no ESRI ArcGIS, onde são inseridos os dados de elevação digital, dados medidos das estações meteorológicas, arquivos de Geogrid gerados no WPS, dados de redimensionamento de grade, número de células que definem um fluxo hídrico e parâmetros hidrológicos específicos, conforme consta na Figura 2.11.

Figura 2.11: Pré-processamento WRF-Hydro

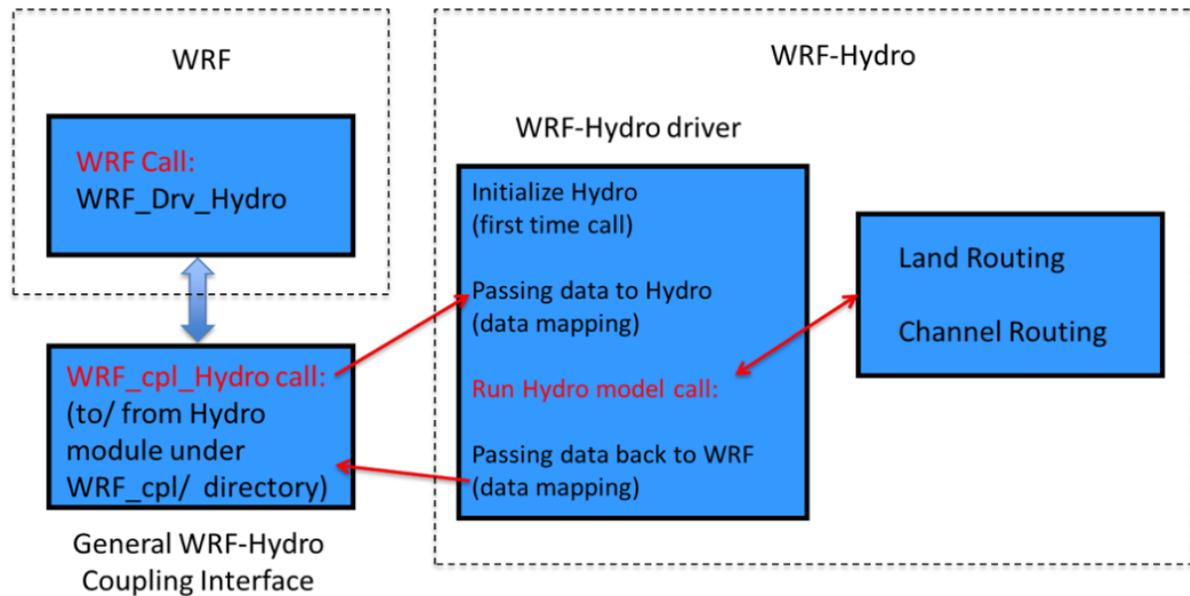


Fonte: Adaptado (GOCHIS et al., 2018)

Não obstante a estes fatos, o fluxo de execução do WRF-Hydro pode variar dependendo do objetivo da simulação, dos dados disponíveis e dos recursos computacionais disponíveis. Além disso, a calibração e validação do modelo são etapas cruciais para garantir a precisão dos resultados e devem ser realizadas antes da aplicação do modelo em estudos ou aplicações práticas.

Uma tendência crescente no uso de sistemas de modelagem hidro meteorológica unidirecional ou bidirecional indica a importância de ferramentas integradas de modelagem atmosférica, geológica e hidrológica. Estudos típicos utilizam o modelo WRF e modelos hidrológicos, como o modelo WRF-Hydro. Devido à arquitetura robusta, o sistema WRF-Hydro é de última geração em modelagem hidro meteorológica, seja no modo desacoplado ou acoplado. A Figura 2.12 mostra a representação de como os modelos são integrados.

Figura 2.12: Estrutura do sistema WRF-Hydro dado os aspectos físicos relacionados à meteorologia e o tipo de acoplamento.



Fonte: Adaptado (GOCHIS et al., 2020)

Após o pré-processamento com WRF, como mostrado na Figura 2.12, os arquivos intermediários necessários para o processamento de dados com ArcGIS são obtidos. Notavelmente, o ArcGIS também foi desenvolvido para a caracterização de sistemas de drenagem (redes de córregos, bacias hidrográficas, características de várzea) e integração de modelos. A estrutura do ArcGIS possui extensibilidade através de ferramentas compostas de módulos ou scripts escritos em Python (linguagem de programação de alto nível) e é integrável ao módulo central do ArcGIS. O ArcGIS é um pacote de software comercial para o desenvolvimento e manipulação de informações vetoriais e matriciais para o uso e gerenciamento de bases temáticas. O ArcGIS fornece um ambiente GIS (Geographic Information System) com uma gama de ferramentas de forma integrada e boa usabilidade de software. O geoprocessamento pode ser entendido como a vinculação técnica e conceitual de ferramentas para captura, armazenamento e processamento de dados, bem como a apresentação de informações espaciais georreferenciadas.

O kit de ferramentas de pré-processamento WRF-Hydro GIS foi projetado pela NCAR (RAFIEEINASAB et al., 2020) para facilitar o processo de derivação de arquivos de entrada e parâmetros de produtos de dados geoespaciais comumente disponíveis, como modelos de elevação digital, uso e ocupação da terra, metadados geoespaciais para suportar o georreferenciamento de arquivos de saída do modelo e arquivos de forma para ajudar a visualizar componentes do modelo.

As ferramentas de pré-processamento WRF-Hydro GIS foram projetadas para funcionar

como uma caixa de ferramentas Python adicional no software ArcGIS ESRI. Os requisitos específicos do sistema operacional e do software estão cobertos pela documentação completa do kit de ferramentas de pré-processamento WRF-Hydro GIS (SAMPSON; GOCHIS, 2018).

Como mencionado, trabalhar com o sistema WRF-Hydro requer uma série de etapas que podem apresentar alguma complexidade para pesquisadores de diferentes áreas, mas que são fundamentais no estudo dos aspectos hidrológicos de uma bacia hidrológica. Informações sobre o estudo da água são necessárias para a tomada de decisão em diversos estudos, muitas vezes escassos, impedindo a adequada gestão dos recursos hídricos (MOREIRA; SILVA; SILVA, 2010).

## 2.5 *Trabalhos correlatos*

Este tópico comenta trabalhos relacionados à modelagem de variáveis hidro meteorológicas como precipitação, fluxo e nível utilizando o modelo WRF-Hydro em diversos locais no mundo nos último cinco anos. No entanto, já não se encontra muitos trabalhos com aplicação no Brasil. Até a divulgação desta dissertação, foram levantados apenas três trabalhos no Brasil; Júnior et al. (2020), White et al. (2019) e Souza et al. (2019) não obstante existam poucos estudos cujo foco são regiões tropicais ou de latitude mais baixas. Além disso, a simulação de previsão do tempo em regiões tropicais é desafiadora, pois são regiões que possuem características convectivas intensas, mudando o estado da atmosfera rapidamente, além de sofrerem constante influência das brisas marítimas e dos movimentos locais e de mesoescala ((KITAGAWA et al., 2018); (HARIPRASAD et al., 2014); (SURUSSAVADEE, 2017)).

Dentre os trabalhos com o WRF-Hydro ao redor do mundo destacam-se ((GALANAKI et al., 2021); (KIM et al., 2021); (DUBEY et al., 2021); (LIU et al., 2021); (ABBASZADEH; GAVAHI; MORADKHANI, 2020); (LAHMERS; CASTRO; HAZENBERG, 2020); (LI et al., 2020);(SUN et al., 2020); (FERSCH et al., 2020)).

Em Galanaki et al. (2021) implementa-se o WRF-Hydro com o objetivo de investigar o potencial do modelo hidrometeorológico acoplado na previsão operacional de inundações e precipitação na bacia de Sarantapotamos e Rafina localizadas na região de Atenas na Grécia. Simulações com o WRF também foram executadas, no intuito de comparar os dois sistemas. Os resultados mostram uma tendência de melhorar ligeiramente a precipitação simulada com o modelo sob o acoplamento atmosférico-hidrológico em comparação com a precipitação produzida pela versão apenas atmosférica do modelo WRF. Além disso, também se observou que o sistema WRF-Hydro foi capaz de produzir a vazão observada durante os episódios de cheia, demonstrando a capacidade do modelo para previsões

operacionais de inundação.

Em [Kim et al. \(2021\)](#) avalia-se o impacto do aumento da resolução da modelagem hidrológica, calibração de parâmetros do modelo para a modelagem e previsão de enchentes na área de Dallas-Fort Worth nos EUA, usando o WRF-Hydro. O domínio do modelo compreende 3 bacias hidrográficas. Os resultados mostram que uma resolução de pelo menos 250 m para o modelo foi necessária para delinear pequenas bacias e, portanto, capturar a chuva com precisão aceitável. Os resultados gerais também indicam que, na ausência de resolução específica e calibração de parâmetros de roteamento de canal, uma resolução de 250 m para ambos os *LSMs* (Land Surface models) e de roteamento é uma boa escolha em termos de desempenho e requisitos computacionais.

Em [Dubey et al. \(2021\)](#), estima-se a vazão do rio Brahmaputra localizado entre a Índia e Bangladesh para o período de 2013 a 2019. O modelo WRF-Hydro foi configurado usando dados meteorológicos simulados pelo modelo WRF e dados pluviométricos GSMaP (Global Satellite Mapping of Precipitation) sobre o rio Brahmaputra. A série temporal de vazão simulada foi comparada com dados medidos, no qual verificou-se que o modelo teve desempenho estatisticamente adequado com um  $R^2$  de 0,89.

Em [Liu et al. \(2021\)](#), foi testado diferentes esquemas de combinação de parametrizações do WRF-Hydro em regiões semiúmidas e semiáridas no norte da China para simular eventos típicos de tempestades de 24 horas e fornecer uma referência para calibração e aplicação do sistema de modelagem.

A partir da análise de títulos e resumos, selecionou-se trabalhos publicados após o ano 2015, uma vez que o WRF-Hydro foi lançado pela primeira vez para a comunidade em 2013. [Powers et al. \(2017\)](#). Os estudos se concentram na América do Norte, Ásia e Europa. As pesquisas selecionadas foram realizadas na América do Norte, bacias hidrográficas no continente asiático e no continente europeu. Alguns artigos fazem análise comparativa de estudos em regiões da África com Europa, América do Sul (Argentina) e o outro utiliza o WRF-Hydro na bacia hidrográfica do Taquari-Antas/RS, localizada na região Sul do Brasil.

Os artigos em que a região de estudo se encontra na Ásia estão relacionados com simulações de eventos extremos de chuva em que a maioria provocou inundações ou enchentes.

Em [Givati et al. \(2016\)](#) aplicaram o modelo WRF e sua versão Hydro, além de um modelo regional para avaliar as vantagens e limitações para previsão de inundações na bacia de Ayalon, no centro de Israel.

Em [Silver et al. \(2017\)](#), em sua pesquisa, propuseram uma metodologia sistemática para

obter uma calibração aplicável na previsão de inundação com WRF-Hydro em regiões áridas com característica semelhante a partes de MATOPIBA.

Em [Ryu et al. \(2017\)](#), [Silver et al. \(2017\)](#) e [Ozkaya e Akyurek \(2019\)](#) também fazem estudos com o *WRF-Hydro* na previsão de inundações ou enchentes em bacias da Coréia do Sul, Turquia, Israel e Jordânia.

Em [Zhang et al. \(2019\)](#) aplicaram o WRF-Hydro na Bacia do rio Heihe, que é uma bacia fluvial de clima árido e semiárido no noroeste da China, comparando os resultados das simulações de modelos com e sem acoplamento para o período de 3 anos consecutivos, 2008 a 2010, onde o efeito do fluxo lateral de água terrestre nas interações terra-atmosfera é avaliado com uma análise conjunta do balanço da água atmosférico-terrestre.

Em [Liu et al. \(2021\)](#), apresentaram trabalhos realizados em regiões com climas semelhantes ao MATOPIBA e testaram os principais parâmetros para simulação de chuvas e vazões no WRF-Hydro em áreas semiúmidas e semiáridas do norte da China.

Em [Hunt e Menon \(2020\)](#) utilizam de simulações do WRF-Hydro para explorar os principais fatores por trás das inundações no estado indiano Kerala em agosto de 2018.

Em [Sun et al. \(2020\)](#) avaliam o desempenho do modelo para simulação de inundações numa bacia do centro-oeste da China.

A maioria das publicações que tiveram seus estudos desenvolvidos na Europa também executa as simulações do WRF-Hydro em eventos de chuva intensa, como:

Em [Verri et al. \(2017\)](#), [Galanaki et al. \(2021\)](#) e [Li et al. \(2020\)](#) que trabalharam com eventos de inundação na Itália, Grécia e Noruega respectivamente.

Em outros trabalhos desenvolvidos no continente europeu, são realizadas associações entre o WRF somente atmosférico com o WRF-Hydro.

Em [Senatore et al. \(2015\)](#), utilizando um período maior, aplicou-se o WRF-Hydro para uma simulação de três anos na Bacia do Rio Crati, no sul da Itália, onde precipitação, escoamento, umidade do solo, drenagem profunda, e os fluxos de calor da superfície da terra foram comparados entre simulações WRF e WRF-Hydro e validados adicionalmente com observações terrestres.

Em [Arnault et al. \(2018\)](#) utilizam as duas versões aplicadas na Europa central entre abril e outubro de 2008 para investigar a sensibilidade da precipitação à incerteza na representação do fluxo de água terrestre.

Em [Rummler et al. \(2019\)](#) e [Arnault et al. \(2019\)](#), também utilizam as duas versões, o primeiro durante três meses no verão de 2005 no sul da Itália e o segundo num período de 40 meses numa bacia nas partes alemã e austríaca de uma bacia hidrográfica.

Em [Fersch et al. \(2020\)](#) analisou a capacidade do WRF-Hydro em relação ao WRF clássico, para reproduzir o ciclo regional da água em uma região que abrange duas bacias hidrográficas de médio porte, localizada no sul do estado da Baviera, na Alemanha num período de seis meses.

Nas pesquisas desenvolvidas em território norte americano, também há os que são realizados no contexto de eventos extremos, alguns com intensidade maior dos que já relatados, como:

Em [Majidzadeh et al. \(2017\)](#), que analisaram fluxos hidrológicos pelo WRF-Hydro após os furacões na Carolina do Sul em 2015 e 2016.

Em [Lin et al. \(2018a\)](#) que realizaram um estudo de caso para simular as inundações ribeirinhas devido o furacão Ike, que atingiu a costa do Golfo do Texas em 2008. E, em [Lin et al. \(2018b\)](#), na região dos Estados Unidos, fez uma simulação num período maior, de quatro anos, avaliando uma estrutura de modelagem hidrológica com o WRF-Hydro nas variáveis evapotranspiração, escoamento superficial e fluxo sobre o Texas de janeiro de 2008 a dezembro de 2011, sendo que essa ideia tem aproximações com os objetivos deste trabalho.

Em [Xue et al. \(2018\)](#) também aplicam o módulo hidrológico do WRF num período extenso, de 1979 a 2014, para investigar a tendência hidro climática que abrange três bacias do sudoeste da Louisiana.

Em [Somos-Valenzuela e Palmer \(2018\)](#) apresentam a aplicação da estrutura WRF-Hydro para estimar mudanças nos recursos de água em 37 anos no Nordeste dos EUA.

Em [Lahmers, Castro e Hazenberg \(2020\)](#), em trabalho realizado em clima semiárido, avaliaram pelo WRF-Hydro, os impactos que o escoamento superficial tem nas interações superfície-atmosfera e convecção em uma simulação atmosférica acoplada, executada para as temporadas de verão de 2017 e 2018 na região central do Arizona.

Nos estudos desenvolvidos na África, dois artigos fazem uma relação entre o WRF somente atmosférico com o WRF-Hydro.

Em [Arnault et al. \(2016\)](#) focam no processo de infiltração, escoamento e fluxo superficial numa simulação de um ano na bacia hidrográfica de Sissili na África Ocidental.

Em [Kerandi et al. \(2018\)](#) investigaram sobre os balanços hídricos atmosféricos-terrestres através da aplicação do WRF e do WRF-Hydro totalmente acoplado na bacia do alto rio Tana, localizada na África Oriental.

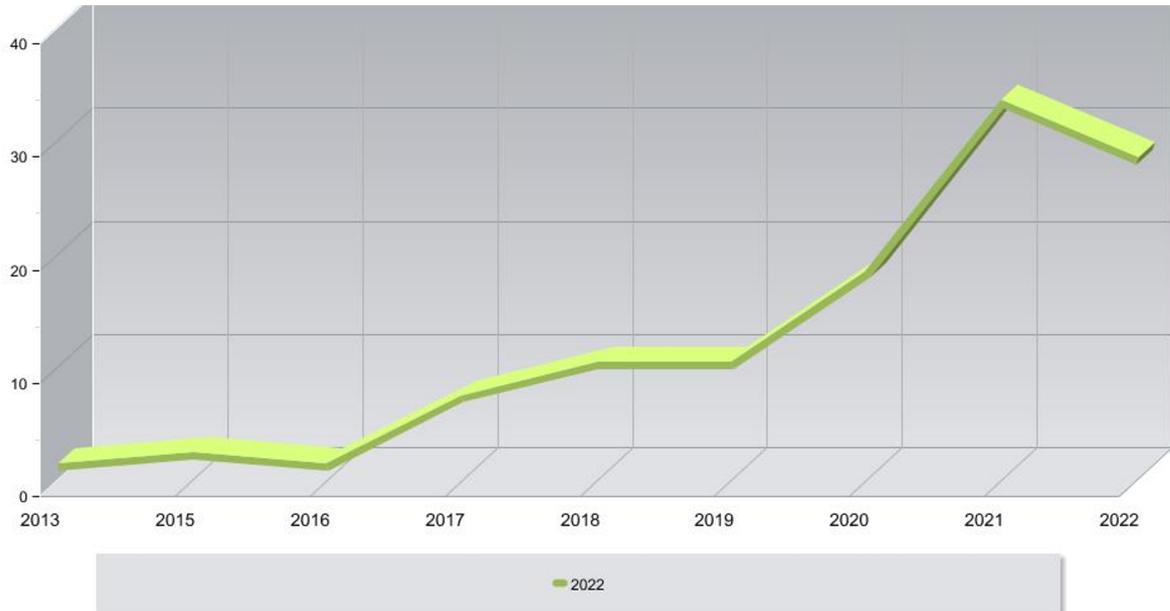
Em [Naabil et al. \(2017\)](#) realizam simulações de 1999 a 2003 e exploram o potencial do WRF-Hydro no modo totalmente acoplado para avaliar os recursos hídricos da bacia do Tono na África Ocidental, cuja proposta é semelhante a ideia deste projeto. Os autores analisaram o desempenho do modelo, com base em dados observados, em relação a estimativa de precipitação, fluxo, temperatura, evaporação e nível da barragem existente na bacia. Eles consideram que com a avaliação da capacidade do modelo hidrológico de simular adequadamente os fluxos dos rios, o WRF-Hydro serviria como uma ferramenta para estimar os fluxos históricos e futuros desses rios para apoiar a gestão dos recursos hídricos da barragem.

Em [Souza et al. \(2019\)](#), aplicaram o módulo hidrológico do WRF durante o mês de janeiro de 2010 na bacia hidrográfica do Taquari-Antas, localizada Rio Grande do Sul para avaliar dados de precipitação, temperatura, umidade, vazão, dentre outros.

Apesar de ser uma ferramenta importante para o estudo de processos hidrológicos, a literatura científica dedicada ao WRF-Hydro ainda é limitada, em comparação com outros modelos hidrológicos como o Soil and Water Assessment Tool (SWAT) e o Variable Infiltration Capacity (VIC). Isso pode ser atribuído à complexidade do modelo e ao fato de que a integração entre os modelos WRF e WRF-Hydro ainda não é totalmente compreendida pelos pesquisadores.

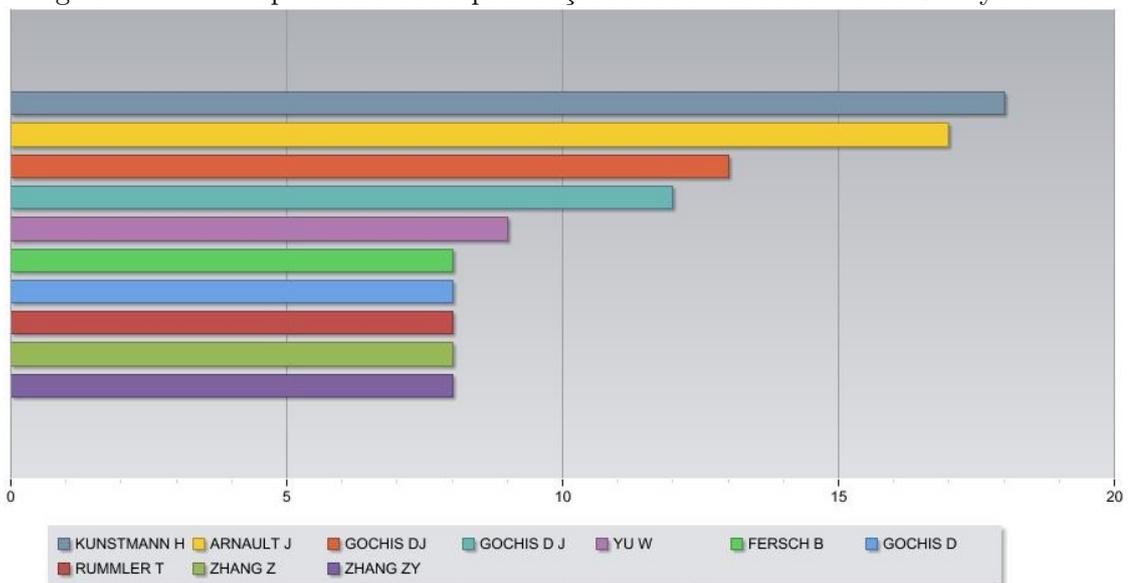
No entanto, de acordo com a [Figura 2.13](#), [Figura 2.14](#) e [Figura 2.15](#), há uma tendência crescente de publicações sobre o *WRF-Hydro* nos últimos anos. Isso pode ser atribuído ao aumento da conscientização sobre as mudanças climáticas e a necessidade de modelar com mais precisão os processos hidrológicos em bacias hidrográficas. Além disso, a crescente disponibilidade de dados e recursos computacionais tornou mais fácil a utilização do modelo WRF-Hydro para simulações em escala regional e continental.

Figura 2.13: Tendência de publicações acadêmicas sobre o WRF-Hydro



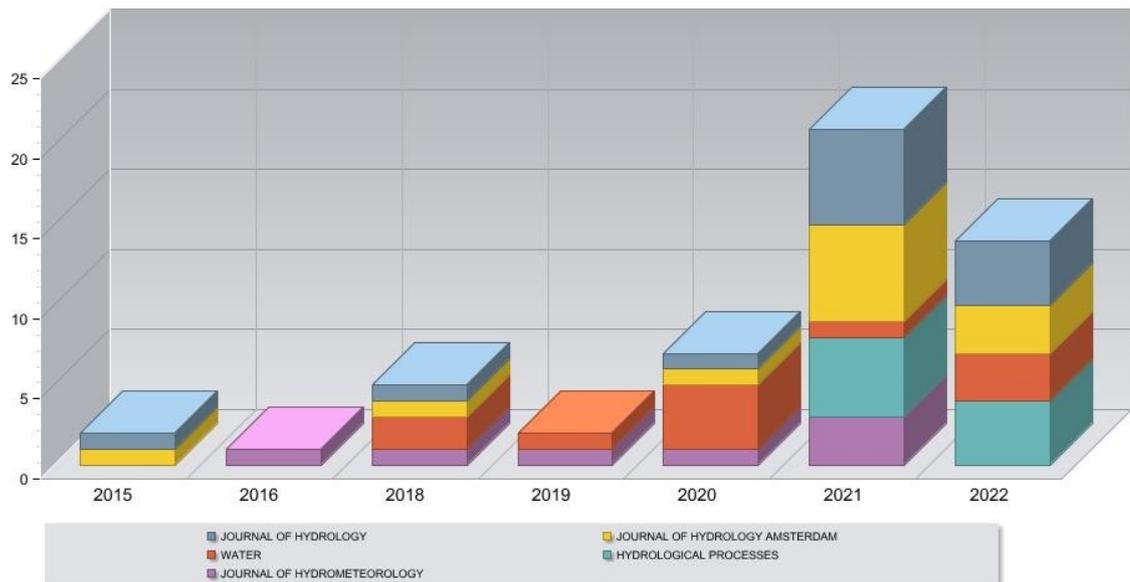
Fonte: Produto de Pesquisa

Figura 2.14: Principais autores de publicações acadêmicas sobre o WRF-Hydro



Fonte: Produto de Pesquisa

Figura 2.15: Histórico anual de publicações acadêmicas sobre o WRF-Hydro das principais instituições sobre o tema



Fonte: Produto de Pesquisa

Espera-se que, com o tempo, o número de publicações sobre o WRF-Hydro continue a crescer à medida que mais pesquisadores se familiarizam com o modelo e desenvolvem novas aplicações. No entanto, é importante destacar que o uso do WRF-Hydro ainda apresenta desafios, incluindo a necessidade de mais dados de observação de alta resolução e qualidade para calibração e validação, bem como a complexidade computacional do modelo. A superação desses desafios pode ajudar a aumentar ainda mais a utilização do modelo WRF-Hydro na modelagem hidrológica e previsão de eventos extremos.

---

## Materiais e Métodos

---

No presente estudo, realizou-se a análise cruzada de vazão e precipitação, técnica empregada em hidrologia para investigar a relação entre a precipitação e a vazão em uma bacia hidrográfica. Esta técnica envolve a correlação das séries temporais de precipitação e vazão, o que permite identificar padrões e tendências na relação entre essas variáveis (TOTH, 2013).

Para fazer essa análise, os resultados de precipitação da simulação foram comparados com os dados diários das estações meteorológicas e com os dados do produto MERGE (Rozante et al., 2010), que consiste em combinar a precipitação observada com estimativa de precipitação por satélite, esses dados foram obtidos por meio do CPTEC. O produto MERGE é um banco de dados criado pelo CPTEC/INPE, que contém informações diárias de precipitação em toda a América do Sul e fornece uma cobertura uniforme da região. Como as estações meteorológicas são irregulares em termos de cobertura espacial, podem ter lacunas em suas séries temporais de dados, assim como seu número é insuficiente, o que justifica o uso do *MERGE*.

Para avaliação do desempenho do modelo na simulação de vazão foram utilizados indicadores estatísticos. São eles: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), a raiz do erro quadrático médio (RMSE), o erro de viés (Bias) e o coeficiente de correlação ( $r$ ). Estes indicadores são amplamente recomendados na literatura científica, conforme apontado por ((ZHANG et al., 2012); (LIU et al., 2021)).

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), é um indicador que compara a variabilidade dos dados simulados em relação aos dados observados, tendo como base a média das observações. Já a raiz do erro quadrático médio (RMSE) é uma medida da diferença entre os valores observados e simulados, considerando o quadrado dos erros. Bem como o erro de viés (Bias) é uma medida de tendência central que indica se as estimativas do modelo são superestimadas ou subestimadas em relação aos valores observados. Por sua vez o coeficiente de correlação ( $r$ ) é um índice estatístico que mede o grau de associação linear entre dois conjuntos de dados.

### 3.1 Área de estudo

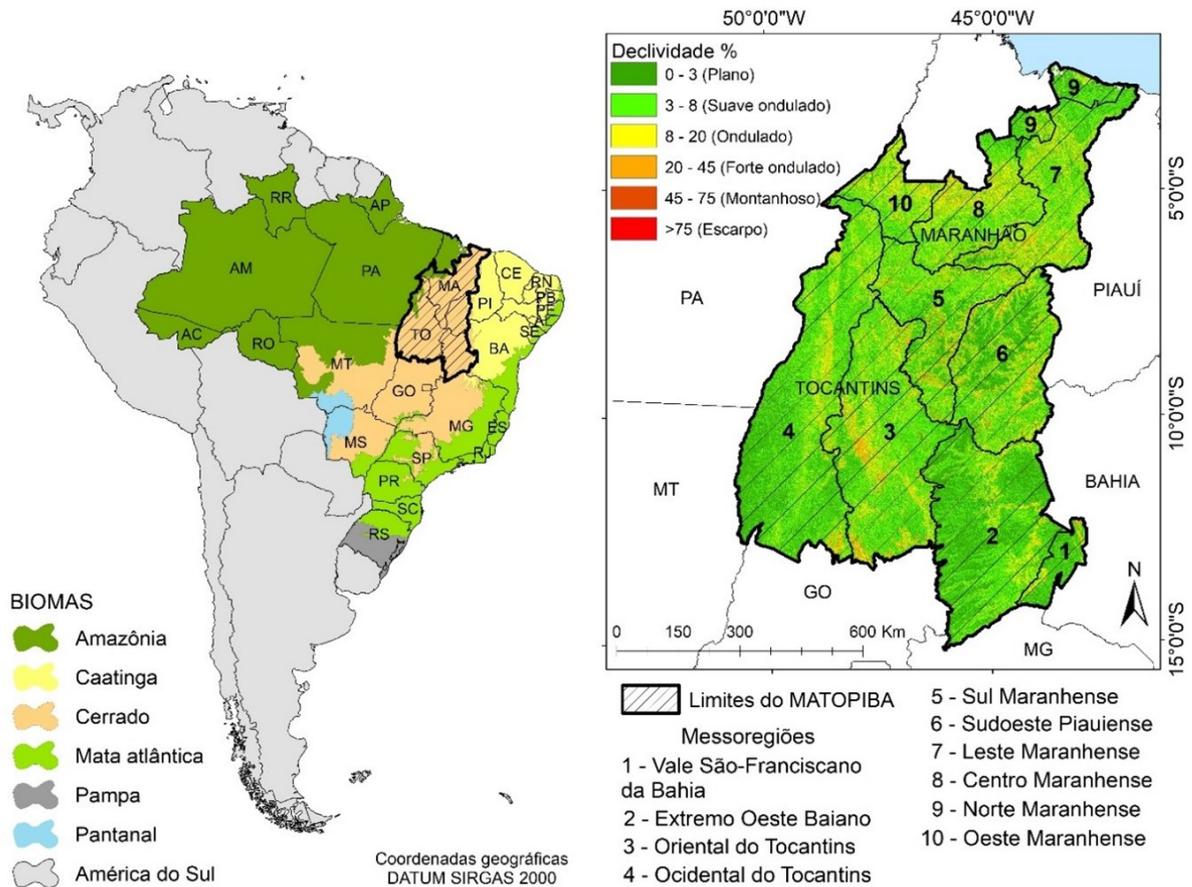
Na região do MATOPIBA com característica de polo agrícola hodierno, foram criadas e legalmente atribuídas nos últimos 20 anos uma quantidade extremamente relevante de

unidades de conservação, terras indígenas, áreas quilombolas, projetos de regularização fundiária e assentamentos de reestruturação agrária (MIRANDA; MAGALHÃES; CARVALHO, 2014).

Essa nova fronteira agrícola, região do MATOPIBA, apresenta uma dinâmica diferenciada com extraordinária ampliação dos níveis de produção agropecuários em comparação com a média nacional. Dessa forma, possui grande relevância econômica regional e nacional. Os quatro estados que a compõem poderão produzir aproximadamente 25,4 milhões de toneladas de grãos em 2027/28, segundo projeções do Ministério da Agricultura em 2018, utilizando aproximadamente 88.000 km<sup>2</sup> de área plantada conforme [Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento \(2018\)](#). Embora o resultado positivo no âmbito socioeconômico, essa projeção da expansão agrícola certamente ocorrerá com a necessária supressão de parte da cobertura vegetal na região e, em consequência, afetará a regulação dos ciclos climáticos regional. Além disso, essas políticas públicas de incentivo à expansão de novas fronteiras agrícola e políticas de redução do desmatamento no bioma amazônico, entre 1985 e 2017, já provocaram perda efetiva de cobertura vegetal natural (contabilizando a formação florestal e formação de savana) de aproximadamente 94.000 km<sup>2</sup>, correspondente a uma taxa média anual de desmatamento de 2.900 km<sup>2</sup> /ano em toda esta região.

A delimitação territorial do MATOPIBA abrange 10 mesorregiões e 31 microrregiões geográficas do IBGE, reúne 337 municípios e uma área total de 73.173.485 ha. Aproximadamente a região é composta pela seguinte repartição 33% no Maranhão, 38% no Tocantins, 11% no Piauí e 18% na Bahia, conforme [Miranda, Magalhães e Carvalho \(2014\)](#). A [Figura 3.1](#) apresenta a delimitação territorial da região do MATOPIBA, cuja maioria do território é composto de cerrado (91%), inclusive esse foi um dos critérios utilizados para a delimitação territorial, onde o restante da região pertence aos biomas da Amazônia (7,3%) e Caatinga (1,7%).

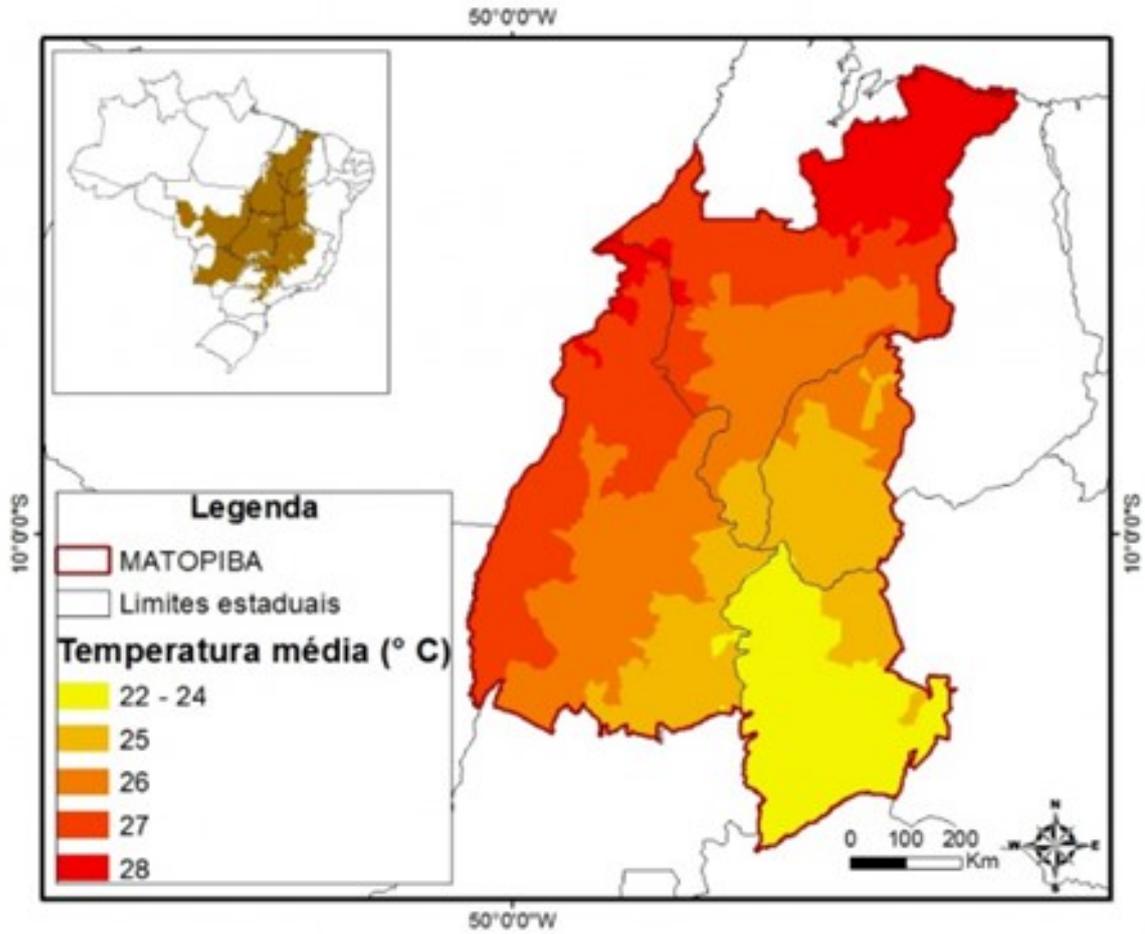
Figura 3.1: Delimitação territorial do MATOPIBA e suas mesorregiões, situado entre norte e o nordeste do Brasil.



Fonte: (LIMA et al., 2020)

Baseado na classificação de Köppen-Geiger (ALVARES et al., 2013), a área é caracterizada por três zonas climáticas, sendo elas: tropical do tipo **Aw** com características de temperaturas elevadas durante todo o ano e chuvas concentradas em apenas alguns meses, tropical do tipo **Af** caracterizado por temperaturas elevadas e chuvas bem distribuídas ao longo do ano, assim como equatorial do tipo **Am** que é caracterizado por temperaturas elevadas e chuvas abundantes ao longo do ano. Na extensão central do território do MATOPIBA predomina o clima tropical semiúmido do tipo **As**, com temperaturas médias acima de 18 °C em todos os meses do ano e períodos de seca entre 4 e 5 meses. Já o limite leste é caracterizado por um clima semiárido do tipo **BSh**, com baixa umidade e precipitação (6 meses secos) e temperaturas elevadas (acima de 18 °C em todos os meses do ano), conforme ilustrado na Figura 3.1, (GARCIA et al., 2018).

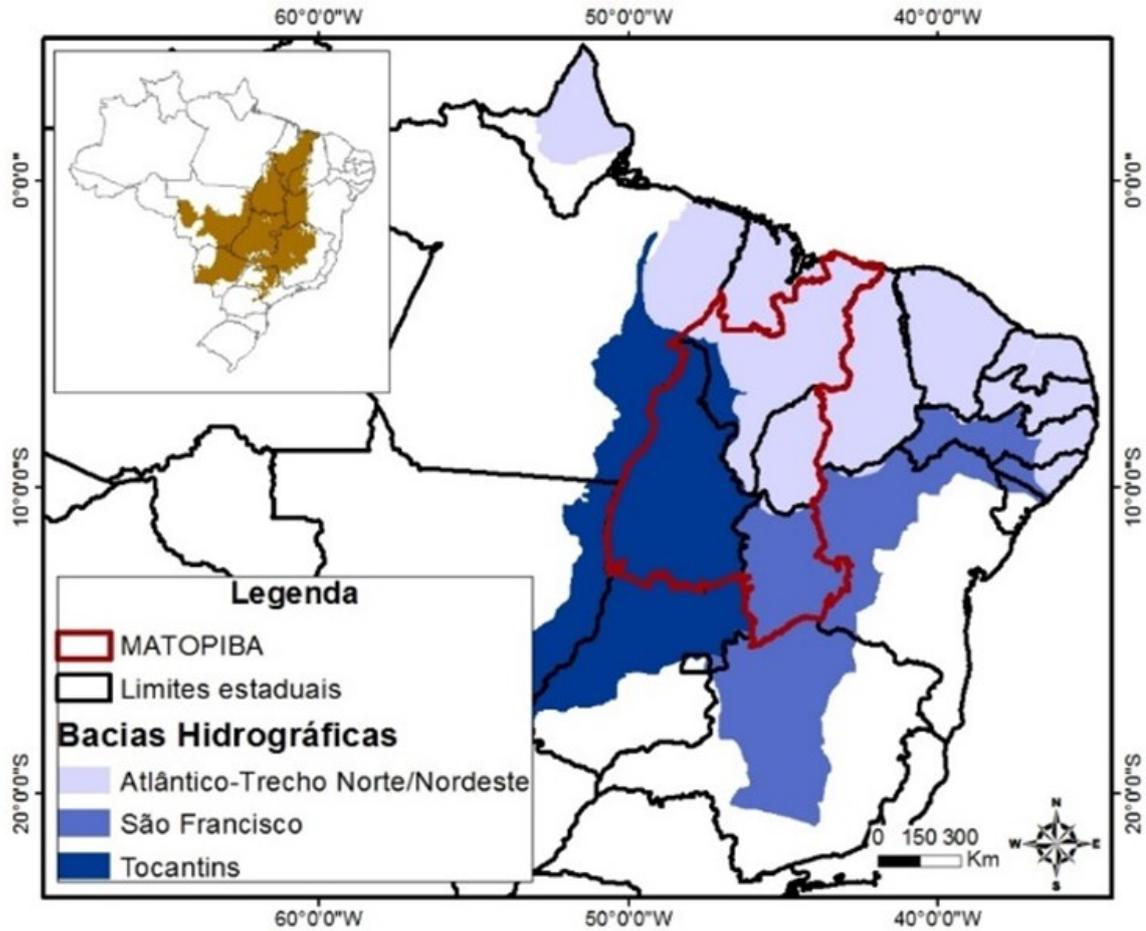
Figura 3.2: Temperatura média no MATOPIBA.



Fonte: (GARCIA et al., 2018)

A região do MATOPIBA pertence a três das bacias hidrográficas, demonstradas na Figura 3.1, Bacia do Rio Tocantins (43%), Bacia do Atlântico-Trecho Norte/Nordeste (40%) e Bacia do Rio São Francisco (17%).

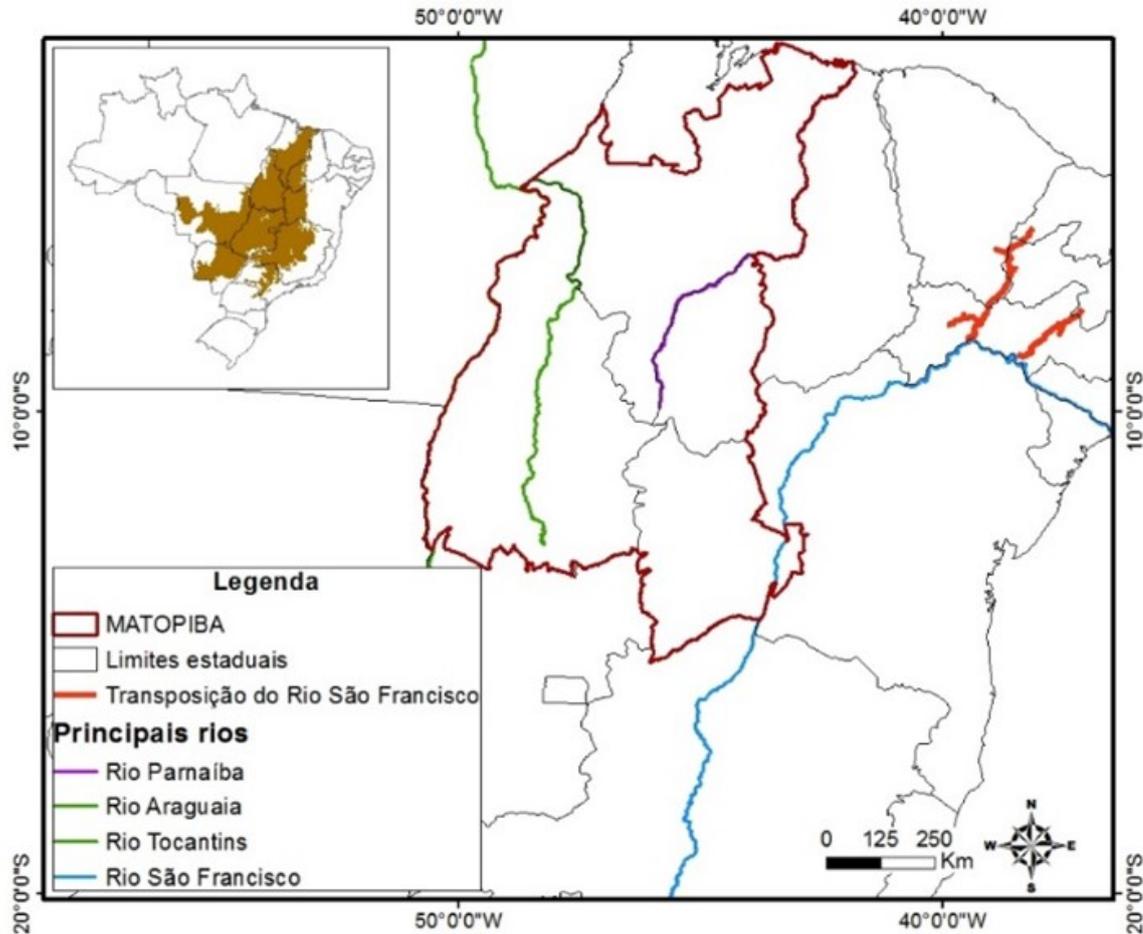
Figura 3.3: Principais Bacias do MATOPIBA.



Fonte: (GARCIA et al., 2018)

Nessas Bacias correm os principais rios da região Araguaia, Tocantins, São Francisco, Parnaíba, Itapicuru, Mearim, Gurupi e Pindaré, destacando-se entre eles os 4 primeiros citados, conforme é apresentado Figura 3.1 (GARCIA et al., 2018).

Figura 3.4: Principais Rios do MATOPIBA.



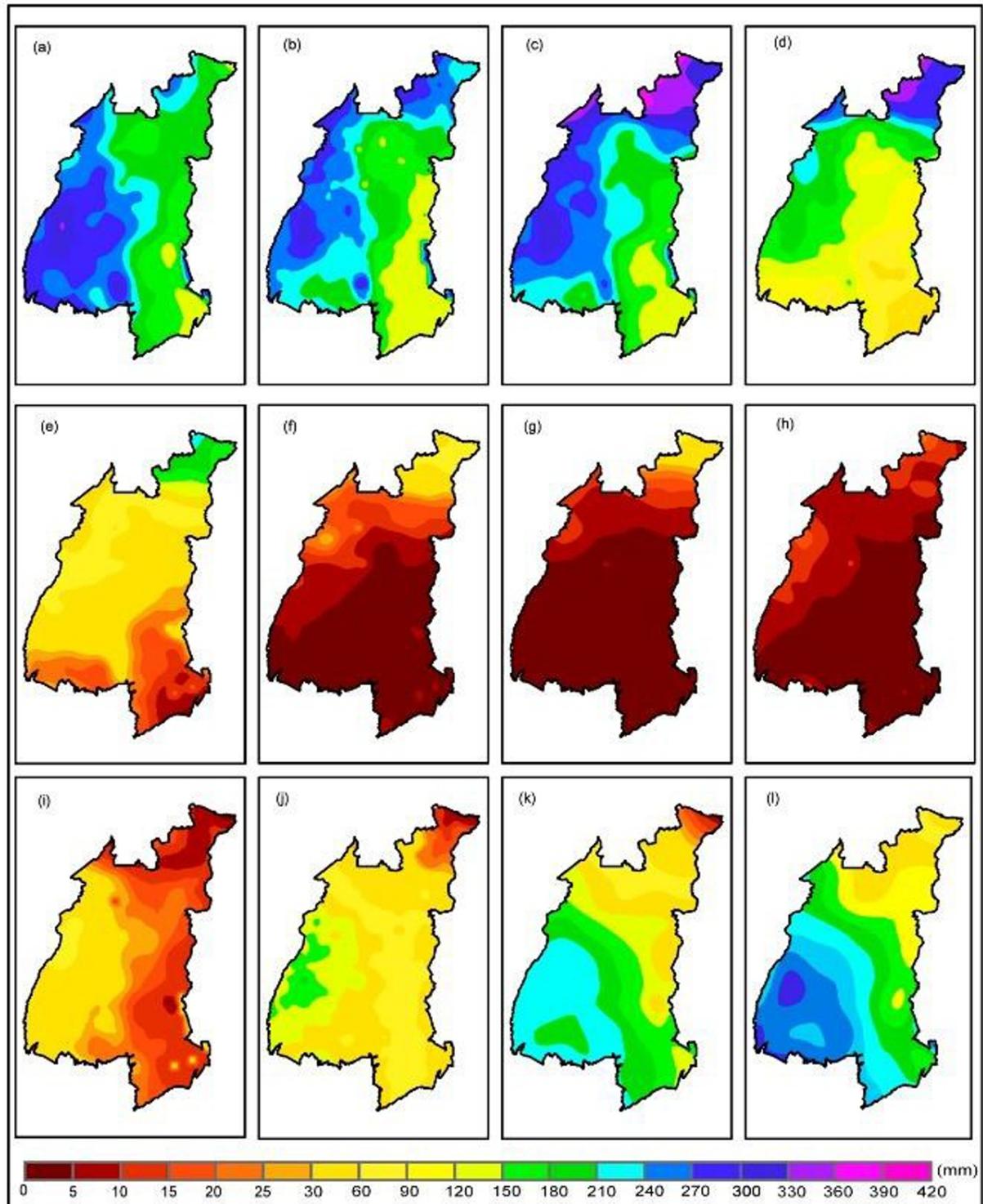
Fonte: (GARCIA et al., 2018)

A precipitação é um componente importante para o objeto deste trabalho na análise comparativa da vazão medida nas estações fluviais, localizadas na área delimitada do estudo. A Figura 3.5 mostra a distribuição de chuvas na região do MATOPIBA, foi obtida do conjunto de dados levantados pelo projeto de pesquisa desenvolvido conjuntamente pela Universidade do Texas (EUA) e a Universidade Federal do Espírito Santo (Brasil), série temporal (diária) da precipitação (mm) observada entre 1980 e 2013, no Brasil (foi extraída a região do MATOPIBA), cuja base de dados está disponível no site: <https://utexas.box.com/Xavier-et-al-IJOC-DATA>.

Em seu trabalho, Spyrides (2020) afirma que a ocorrência do período de transição entre os anos estiagem e anos chuvosos na região do MATOPIBA é influenciada pelos gradientes de temperaturas do Atlântico Sul determinando a abrangência espacial dos volumes de chuva. Além disso, outros fenômenos como a *Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)* modulada pela Temperatura da Superfície do Mar no Atlântico Tropical, ocorrência de *Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS)* de maior intensidade e por Complexos Convectivos de Mesoescala que são as formações e deslocamentos no sentido norte da

Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), além de sistemas frontais.

Figura 3.5: Distribuição de chuvas no MATOPIBA.



Fonte: (SPYRIDES, 2020)

Considerando um cenário climatológico representado na Figura 3.5, temos o período chuvoso que se inicia em outubro e apresenta um nível médio de 87 mm. A ocorrência de

precipitações, no setor norte da região são menores e inferiores a 25 mm; no lado centro-sul as chuvas variam de 30 a 150 mm, os menores valores ocorrem no sul do Maranhão, sudeste do Piauí e no lado oeste da Bahia; a concentração dos maiores volumes de chuva localiza-se na faixa oeste do MATOPIBA, alcançando parte do Tocantins, sendo que os valores médios são acima dos volumes de 150 mm, conforme Figura 3.5j.

Em novembro Figura 3.5k a média acumulada da precipitação é de 157mm, sendo que, conforme Spyrides (2020). As taxas maiores se concentram nas porções sudoeste (extremo oeste baiano) e leste (grande parte do estado do Tocantins) com média entre 150 e 270 mm e esses valores decrescem em direção ao norte da região, com registros entre 5 e 90mm.

Em dezembro Figura 3.5l observa-se uma expansão da precipitação com valores superiores a 240mm na porção oeste da região; na área norte o acumulado de precipitação não excede a 120mm; no sul da região (extremo oeste da Bahia) a precipitação ocorre principalmente entre os meses de novembro a fevereiro, associando à ocorrência da ZCAS na sua orientação sudeste-nordeste, e as trajetórias comumente observadas dos sistemas frontais ((CHAVES; CAVALCANTI, 2001); (KOUSKY, 1979)).

Os volumes médios de precipitação maiores estão concentram janeiro Figura 3.5a, fevereiro Figura 3.5b e março Figura 3.5c com 225 mm, 206 mm e 234 mm. Nesse trimestre chuvoso, março possui a maior média acumulada, por volta de 234 mm e, também, o valor máximo total de precipitação, com 380 mm.

Baseado nestas análises, pode-se concluir que desde o período de 1980/2013, há indícios de alterações nos padrões climatológicos da precipitação, principalmente nos anos onde o ENSO proporcionou uma maior ocorrência de meses chuvosos (ampliação da estação chuvosa), conforme Spyrides (2020). Dessa forma, essas observações são consistentes com os resultados de outros estudos sobre a região analisada. Haja visto que no centro-oeste e sudeste do MATOPIBA, onde ocorre ampliação do regime pluviométrico em janeiro e fevereiro (SPYRIDES, 2020).

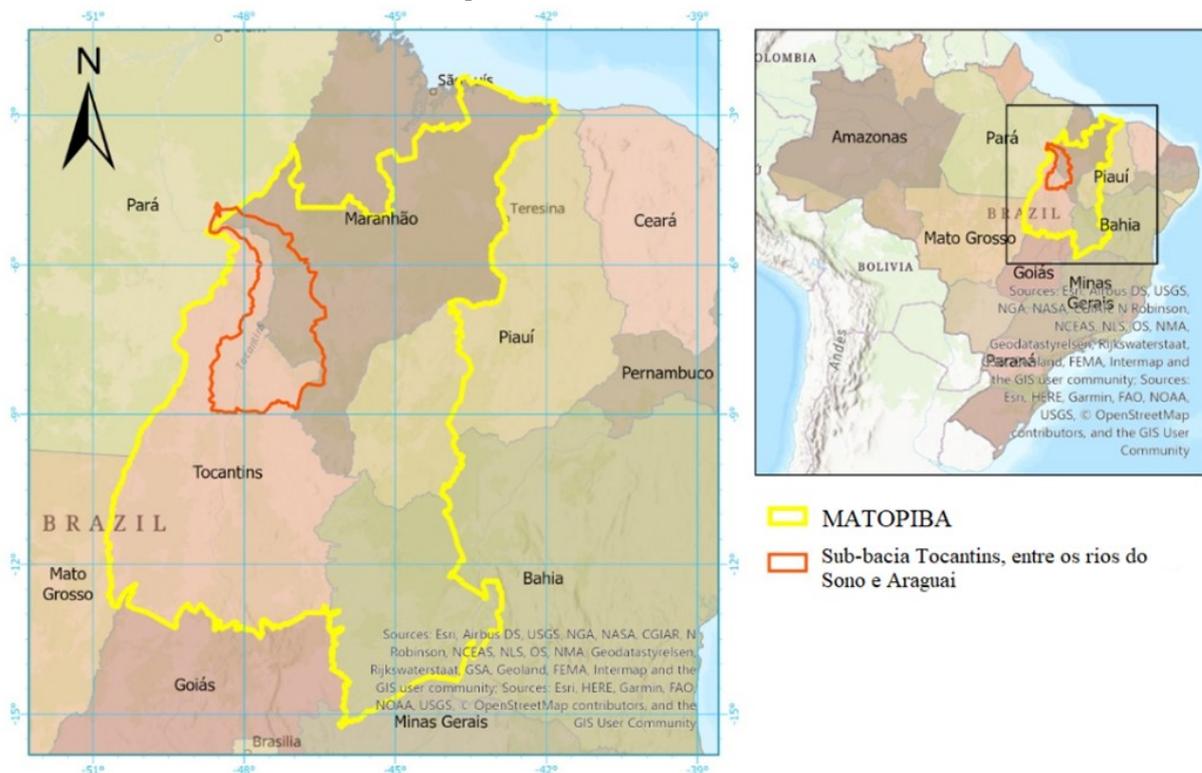
## 3.2 Domínios na área de estudo

Os estados que compõem a região do MATOPIBA possuem um grande volume de água doce disponível no Brasil, com destaque para as bacias do Atlântico Noroeste, Parnaíba, Tocantins-Araguaia e São Francisco. O estado do Maranhão está no nordeste do Brasil, e sua vegetação abrange a floresta amazônica, savana e caatinga. O Tocantins está localizado na porção central do Brasil, mas oficialmente faz parte da região norte, delimitada a oeste pelo Rio Araguaia e no centro pelo Rio Tocantins, com uma economia composta principalmente pela agricultura (Moreira, Santos e Silva (2013); Moreira, SILVA e Silva

(2010); Pitta, Vega e Barbosa (2017); Salomon (2020)). O Piauí está localizado no Nordeste do Brasil, e sua economia é focada na indústria (química, têxtil, bebidas, agricultura e pecuária). A Bahia também está na região Nordeste, e sua economia é composta por agricultura, indústria, mineração, turismo, energia (petróleo e gás e renováveis) e serviços ((MOREIRA; SANTOS; SILVA, 2013); (MOREIRA; SILVA; SILVA, 2010); (PITTA; VEGA; BARBOSA, 2017); (SALOMON, 2020)).

A bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia é a área de drenagem mais extensa, abrangendo 43% da região. Dentro dessa bacia, está localizada a sub-bacia do Tocantins, situada entre os rios Sono e Araguaia, que desempenha um papel importante no fluxo de água das bacias Tocantins-Araguaia e São Francisco. Portanto, compreender e ser capaz de prever o regime hidrológico das sub-bacias hidrográficas situadas no baixo rio Araguaia é essencial para a gestão adequada dos recursos hídricos Viola et al. (2012). A Figura 3.6 apresenta detalhes sobre a localização da região MATOPIBA e a sub-bacia em análise.

Figura 3.6: Área de estudo.



Fonte: (SILVA et al., 2023)

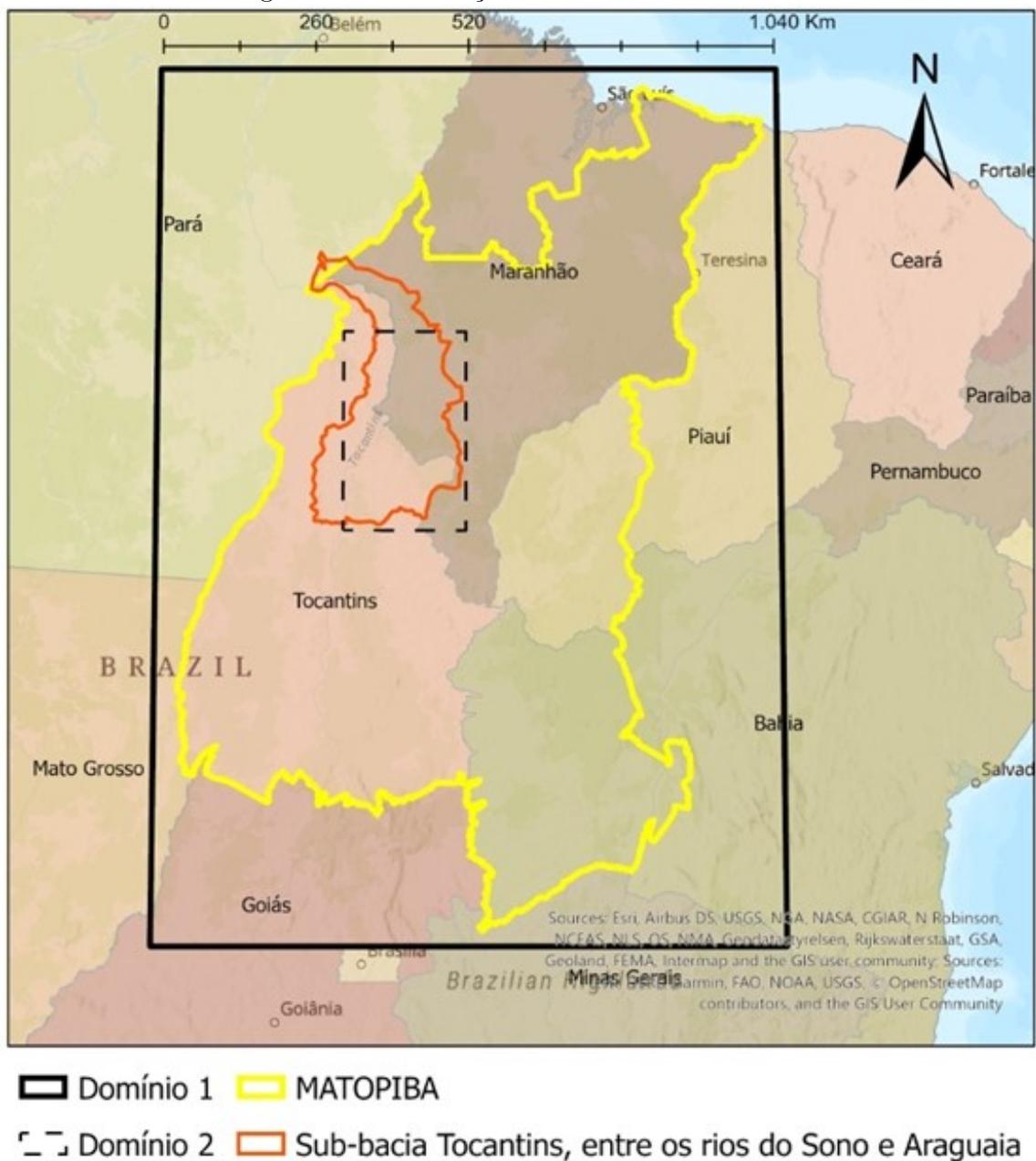
O cenário apresentado envolve uma região com grande qualidade agrícola que exige a exploração do uso da terra e dos recursos hídricos, e, por sua vez, as regiões adjacentes são habitadas por pessoas que compõem a força de trabalho da região; além disso, essas pessoas utilizam os recursos hídricos disponíveis na região. Por isso, avaliar a viabilidade de uma ferramenta de monitoramento e análise da previsibilidade hídrica para gerir esses

recursos e prever secas/enchentes é de extrema importância.

### 3.3 Modelagem com sistema WRF-Hydro

As simulações foram realizadas com o WRF-Hydro no modo acoplado para interpretar de forma genérica todo o processo e para análises iniciais de algumas saídas do modelo. A modelagem foi dividida em duas partes (meteorológica e hidrológica), o modelo meteorológico foi configurado em duas grades aninhadas, conforme a Figura 3.7.

Figura 3.7: Delimitação dos domínios aninhados.



Fonte: (SILVA et al., 2023)

A Figura 3.7, ilustra a delimitação da região do MATOPIBA com a configuração da modelagem meteorológica em domínios (D01 e D02) com resoluções de 9 km e 3 km respectivamente apresentada na Tabela 3.1. O modelo acoplado incluiu um modelo hidrológico de alta resolução e um modelo meteorológico em escala fina dentro de um único sistema. Isso reduz as incertezas associadas ao volume de distribuição espacial e precipitação, demonstrando potencial preditivo adequado para escoamento de superfície, previsão de fluxo e inundações.

Tabela 3.1: Configuração dos domínios

DOMÍNIO	D01	D02
Resolução horizontal	9 Km	3 Km
Número de células	100 x 107	97 x 115
Tamanho do domínio	900 x 963 Km	291 x 345 Km

Fonte: Produto da pesquisa

Uma visão geral das configurações espaciais utilizadas nas simulações realizadas é apresentada na Tabela 3.1. Sendo que a simulação foi realizada com inicialização às 12:00 (*UTC*) em 01 de janeiro de 2019, estendendo-se até às 12 *PM* (*UTC*) em 11 de junho de 2019 (3864 h de simulação). Esta simulação teve como objetivo gerar os dados preliminares necessários para o geoprocessamento na aplicação *ArcGIS*.

O domínio 1 abrange toda a região do MATOPIBA, Figura 3.7, enquanto o domínio 2, em que é feita a análise hidrológica, ocupa duas sub-bacias hidrográficas, Baixo Araguaia e Tocantins, entre os rios Sono e Araguaia, Figura 3.7, pertencentes a regiões com maiores índices de precipitação do MATOPIBA. Este trabalho utilizou o modelo WRF-Hydro (versão 5.2.1), que está totalmente acoplado com o WRF, e os resultados desta simulação se concentra no domínio aninhado de 3 km (Domínio 2). As grades de roteamento do terreno, foram interpoladas da resolução de grade de 3km para uma nova grade com alta resolução de 100 m, bem como as redes de canais, foram criadas usando a ferramenta WRF-Hydro Pre-processing Toolkit v5.1 no ambiente GIS (Sampson e Gochis (2018); Gochis et al. (2018)). Essa ferramenta permite a criação de campos em grades de roteamento de alta resolução, como direção do fluxo, fluxo subterrâneo e processos de roteamento de canais, que são necessários como dados de entrada para o modelo WRF-Hydro. As principais configurações hidrológicas, incluindo o módulo de escoamento superficial e subterrâneo, são ativadas para todos os domínios, enquanto o módulo de roteamento de canal é ativado apenas na sub-bacia em estudo (Domínio 2). Para calcular o escoamento de base da bacia, o modelo utilizado é baseado em bucket ((MANABE, 1969); (MILLY, 1994)).

Nas simulações acopladas WRF/WRF-Hydro, o modelo de superfície terrestre LSM Noah é selecionado. Esse modelo é responsável pelos processos hidrológicos da coluna, como infiltração do solo, evapotranspiração e movimento vertical da água no solo, e acumulação

de escoamento superficial e subterrâneo [Naabil et al. \(2017\)](#). Portanto, o Noah LSM fornece essas informações como input para os módulos de roteamento. A solução de desagregação-agregação de subgrade espacialmente ponderada ([Gochis e Chen \(2003\)](#)), é utilizada para coordenar o LSM com as grades de roteamento do terreno no WRF-Hydro ([WANG et al., 2021](#)).

No modelo WRF-Hydro são utilizados dados atmosféricos e de superfície para simular o ciclo hidrológico em uma determinada bacia hidrográfica e uma das características deste modelo é que ele pode ser calibrado usando dados observados de estações hidrológicas, como estações fluviométricas e pluviométricas, para ajustar os parâmetros do modelo e melhorar a precisão das simulações.

Os outputs gerados pelo modelo WRF-Hydro são influenciados pelas estações sinalizadas no modelo, através de suas respectivas coordenadas, ou seja, pelas estações hidrológicas utilizadas como dados de entrada para o modelo. A precisão dos resultados do modelo depende em grande parte da qualidade e quantidade dos dados coletados nessas estações. Quanto mais estações de qualidade e bem distribuídas na bacia hidrográfica, espera-se que o resultado gerado pelo modelo seja mais preciso.

Portanto, a seleção adequada das estações hidrológicas para a calibração do modelo é crucial para garantir a precisão dos outputs gerados pelo WRF-Hydro. A utilização dessas estações também permite a validação dos resultados simulados pelo modelo, uma vez que é possível comparar os dados observados com os dados simulados nas mesmas estações, assim como realizado neste trabalho.

Na Tabela [3.2](#) são apresentadas as informações das estações fluviais Itacajá (Código: 23150000), Jacaré (Código: 23230000) e Goiatins (Código: 23250000) são três das estações de monitoramento, que fornecem os dados de coordenadas, vazão e área de drenagem dos rios para este estudo, gerenciadas pela Agência Nacional de Águas (ANA) no estado do Tocantins, localizado na região norte do Brasil, sendo elas as utilizadas neste estudo.

A estação fluvial de Itacajá está localizada na Bacia do Rio Tocantins, próximo ao município de Itacajá, e é responsável pelo monitoramento das vazões no trecho das coordenadas, latitude -8,3917 e longitude -47,7653, do rio Manuel Alves Pequeno.

A estação fluvial de Jacaré está localizada na Bacia do Rio Tocantins, próximo do município de Goiatins, e é responsável pelo monitoramento das vazões no trecho das coordenadas, latitude -7,9633 e longitude -47,2611, do rio Vermelho.

Por fim, a estação fluvial de Goiatins está localizada na Bacia do Rio Tocantins, no município de Goiatins, e é responsável pelo monitoramento das vazões no trecho das

coordenadas, latitude -7,9633 e longitude -47,2611, do rio Manuel Alves Grande.

A operação destas estações é realizada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), o processo de avaliação da qualidade dos dados das estações é composto por análises de consistência e homogeneidade dos dados. A análise de consistência verifica se os dados estão coerentes com as regras físicas do processo hidrológico, como a verificação de valores mínimos e máximos aceitáveis para vazão e precipitação, a detecção de picos artificiais ou valores negativos e a identificação de falhas no registro de dados. Já a análise de homogeneidade avalia se houve mudanças significativas nas características do clima ou no ambiente em torno da estação, que possam afetar os dados. Essas mudanças podem incluir alterações na cobertura vegetal, mudanças na topografia ou urbanização da área ao redor da estação.

Tabela 3.2: Dados das Estações Analisadas

FID	5	12	15
Nome	Itacajá	Jacaré	Goiatins
Código	23150000	23230000	23250000
Latitude	-8,3917	-7,9633	-7,7078
Longitude	-47,7653	-47,2611	-47,3117
Bacia	Rio Tocantins	Rio Tocantins	Rio Tocantins
Rio	Manoel Alves Pequeno	Vermelho	Manoel Alves Grande
Estado	Tocantins (TO)	Tocantins (TO)	Tocantins (TO)
Município	Itacajá	Goiatins	Goiatins
Responsável	ANA	ANA	ANA
Operadora	CPRM-GO	CPRM-GO	CPRM-GO
Tipo	Fluviométrica	Fluviométrica	Fluviométrica
Área de drenagem (Km)	2800	4100	10100

Fonte: Produto da pesquisa

A Figura 3.3 mostra a localização das estações fluviométricas usadas no estudo, bem como o escoamento superficial no Domínio 2. O motivo técnico da escolha desta região dentro do MATOPIBA, foi em função dos rios em que o domínio abrange o início da rede de drenagem, o que influencia na característica da vazão do rio, assim como a consistência dos dados das estações para o período da simulação e respectiva consistência de chuvas na região.



Além do critério técnico de escolha da região, tem também o nível de impacto para a agricultura na região, que é uma das mais importantes produtoras de grãos do Brasil. A compreensão da dinâmica da precipitação na região do MATOPIBA é fundamental para o planejamento e a gestão de recursos hídricos e para a adaptação da agricultura às mudanças climáticas.

Considerando o escopo deste trabalho, as simulações realizadas poderá servir como referencial de informação para pesquisa futuras para avaliar o comportamento dos ciclos climáticos no próximo decênio compreendido entre 2018 e 2028, proporcionando subsídios às projeção da expansão da fronteira agrícola, possibilitando mitigar, quiçá, os impactos gerados pelos níveis de precipitação e vazão dos rios, oriundos de fatores antropogênicos.

### 3.4 Parametrizações físicas do Modelo WRF-Hydro

As simulações foram realizadas utilizando dados meteorológicos derivados do sistema global GDAS-FNL (Global Data Assimilation System - Final analysis) da agência NCEP, com resolução horizontal de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  e resolução temporal de 6 horas (GDAS, 2015).

Foi considerado como spin-up o período de 61 dias, referente aos meses de novembro e dezembro de 2018 respectivamente. O spin-up é um período inicial de uma simulação do modelo WRF-Hydro, no qual as condições iniciais do solo e das águas subterrâneas são ajustadas para que o modelo possa convergir para um equilíbrio hidrológico antes do início da simulação principal. A duração e as métricas de spin-up dependem das características da bacia hidrográfica e dos objetivos da simulação, no entanto ainda não há na literatura uma métrica clara para a definição do período adequado de spin-up, porém analisando os trabalhos sinalizados na revisão de literatura deste trabalho, há uma recorrência de utilização de 10 a 30 por cento do período da simulação, a exemplo disto temos o trabalho de (SENATORE et al., 2015).

Tabela 3.3: Parametrizações físicas utilizadas nas simulações do WRF-HYDRO

PARAMETRIZAÇÕES	ESQUEMA	REFERÊNCIA
Microfísica	WSM6	Hong et al. (2006)
Cúmulos	Grell-3D	Grell, 1993
Radiação de onda e curta	RRTMG	Iacono et al. (2008)
Camada Limite Planetária	MYNN 2.5	Nakanishi et al. (2006)
Camada Superficial	MYNN	Nakanishi e Niino (2006)
Land Surface	Unified Noah LSM	Tewari et al. (2004)

Fonte: Produto da pesquisa

As parametrizações físicas utilizadas nesta simulação, conforme Tabela 3.3, foram baseadas em (WANG et al., 2019) e (KITAGAWA et al., 2022), que utilizaram o WRF-Hydro e o WRF em regiões com características climáticas semelhantes à do MATOPIBA.

---

## Resultados e Discussão

---

Este estudo teve início em março de 2020, ocasião na qual o autor teve a oportunidade de estabelecer, em colaboração com seu orientador, um grupo de pesquisa multidisciplinar para investigações hidrometeorológicas. Desde então, foram realizados diversos avanços, tais como a compreensão da operação de modelos e sensoriamento remoto para simulações elementares, o desenvolvimento de conhecimento científico por meio da publicação de artigos, e a celebração de uma parceria de pesquisa sobre o modelo WRF-Hydro entre o SENAI CIMATEC e o NCAR, instituição responsável por seu desenvolvimento. Tais etapas foram essenciais para a realização do presente trabalho.

Os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos por meio do desenvolvimento da pesquisa, que teve como objetivo a simulação e análise dos ciclos de dados hidrometeorológicos observados e simulados durante um período de chuva intensa, ocorrido no primeiro semestre do ano de 2019, entre os meses de janeiro e junho. Nas simulações realizadas, foram representadas as interações entre a atmosfera, considerando a precipitação, e as águas superficiais, por meio da vazão dos rios. Dessa forma, foi possível obter informações comparativas sobre o comportamento do sistema hidrológico durante o período de chuva, permitindo uma análise das variações observadas nos ciclos de dados simulados em relação aos dados observados.

### *4.1 Resultados da simulação*

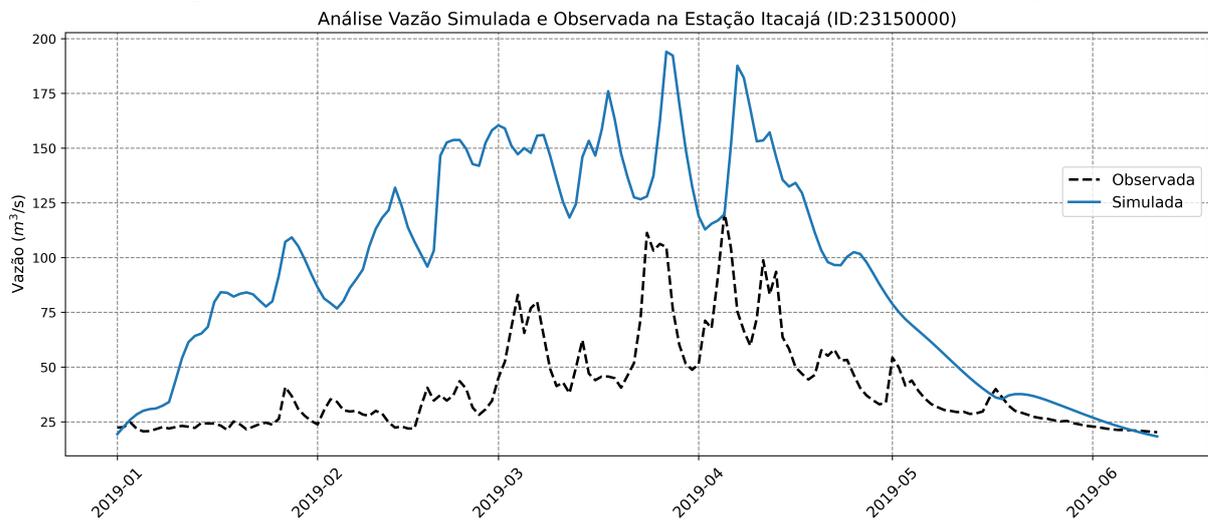
Os resultados das análises indicaram que os dados das estações Itacajá, Jacaré e Goiatins apresentam boa qualidade e consistência. Não foram encontrados problemas significativos de consistência nos dados, e as análises de homogeneidade indicaram que não houve mudanças significativas nas condições do ambiente ao redor das estações que possam ter afetado os dados. No entanto, é importante ressaltar que nenhuma estação hidrológica está completamente isenta de erros ou incertezas, e que a qualidade dos dados pode ser influenciada por vários fatores, incluindo a manutenção adequada dos equipamentos, a seleção adequada dos locais de medição e o registro adequado dos dados. Portanto, é recomendável que sejam realizadas avaliações periódicas da qualidade dos dados para garantir a confiabilidade das informações hidrológicas.

Os gráficos exibidos nas figuras seguintes permitem a caracterização da variabilidade dos fenômenos em séries temporais, e a comparação dos resultados das simulações do modelo com os dados observados.

Com o objetivo de avaliar o desempenho do modelo hidrológico e validar os resultados obtidos, foi demonstrado na Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3, o comparativo dos dados de vazão simulada e observada em ( $m^3/s$ ). Os gráficos permitem visualizar a distribuição dos valores de vazão simulada e observada no período estudado, bem como a relação entre esses valores ao longo do tempo. Por meio da análise visual desses dados, é possível verificar a aderência dos resultados simulados aos dados observados e identificar possíveis desvios entre eles.

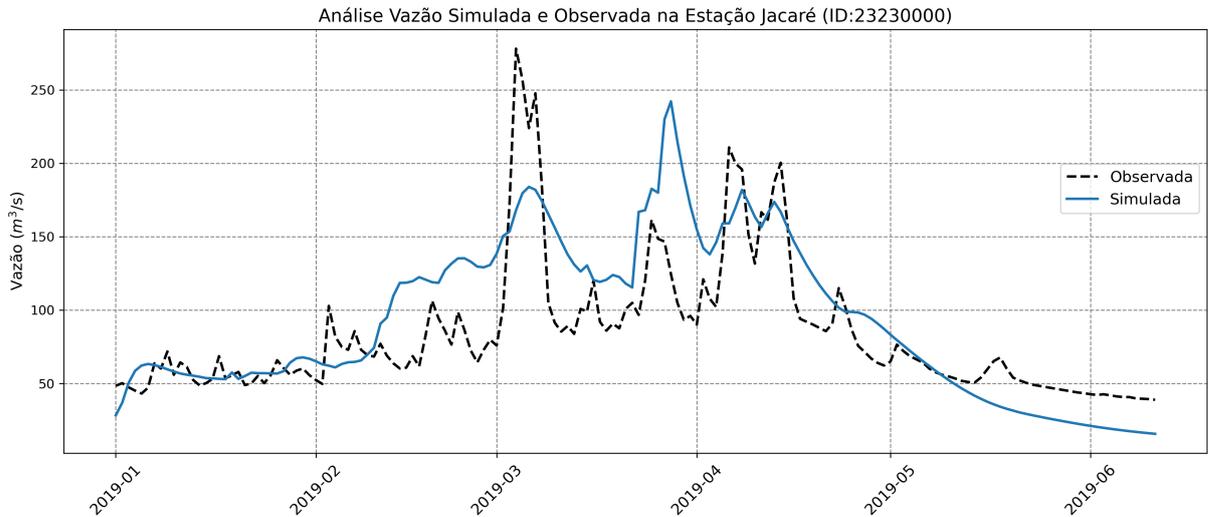
A simulação de vazão pode ser utilizada para prever a quantidade de água que fluirá em um determinado ponto em um sistema hidrológico. É uma ferramenta importante para a gestão dos recursos hídricos, podendo apoiar a tomada de decisões em relação ao uso da água e à prevenção de desastres naturais.

Figura 4.1: Análise de Vazão simulada e observada na Estação Itacajá



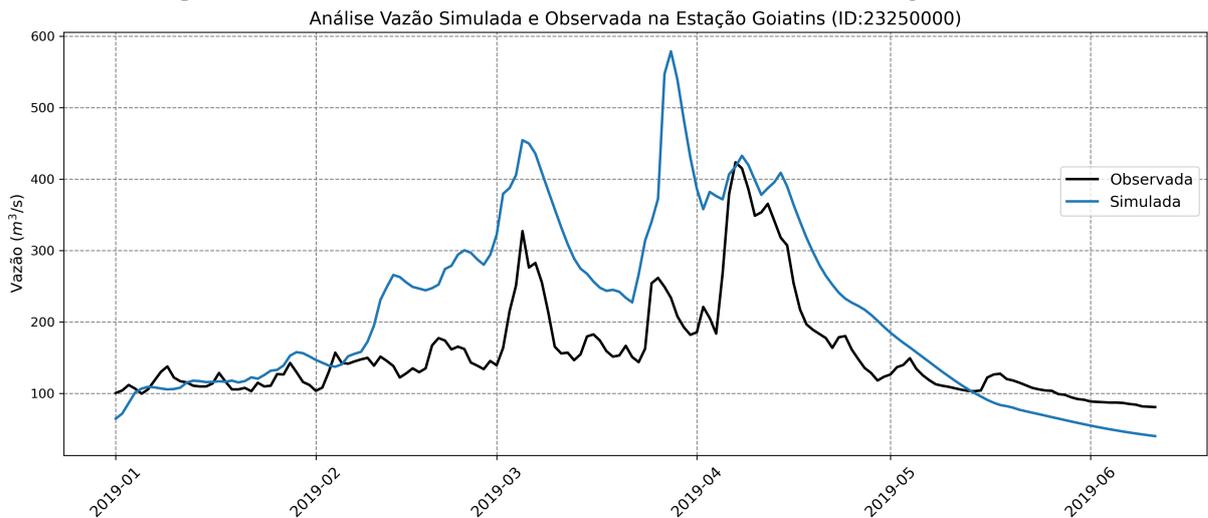
Fonte: Produto da pesquisa

Figura 4.2: Análise de Vazão simulada e observada na Estação Jacaré



Fonte: Produto da pesquisa

Figura 4.3: Análise de Vazão simulada e observada na Estação Goiatins

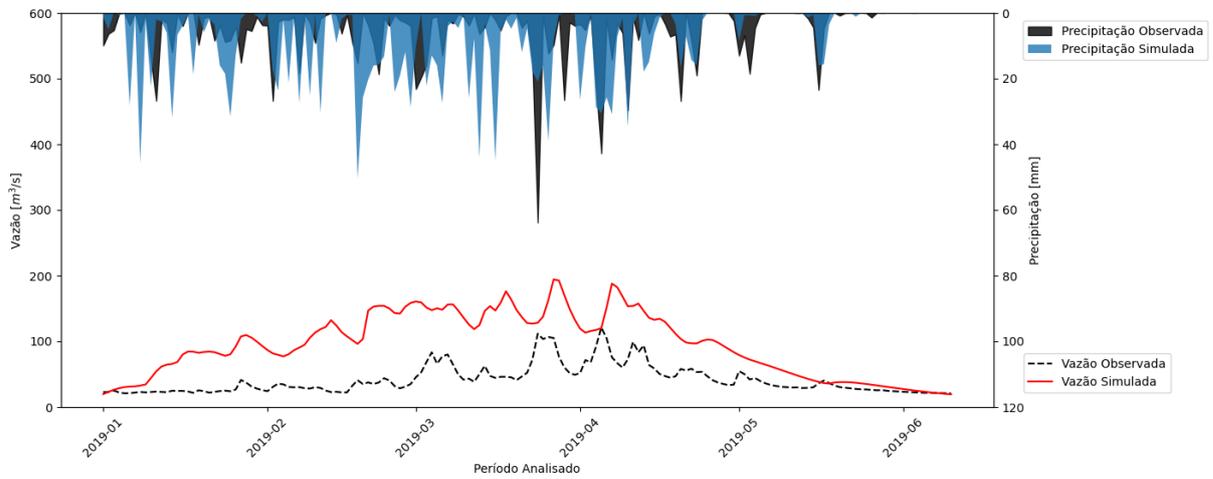


Fonte: Produto da pesquisa

Os gráficos exibidos na Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6 mostram as mesmas estações, porém agora integrando os resultados de vazão ( $m^3/s$ ), com os resultados de precipitação (mm) simulados pelo modelo WRF-Hydro e comparados aos dados observados de vazão pelas estações fluviométricas da ANA e dados de precipitação do produto MERGE CP-TEC, para as três localidades distribuídas ao longo da sub-bacia do rio Tocantins, entre os rios Sono e Araguaia.

Figura 4.4: Análise de Vazão/Precipitação simulada e observada na Estação Itacajá

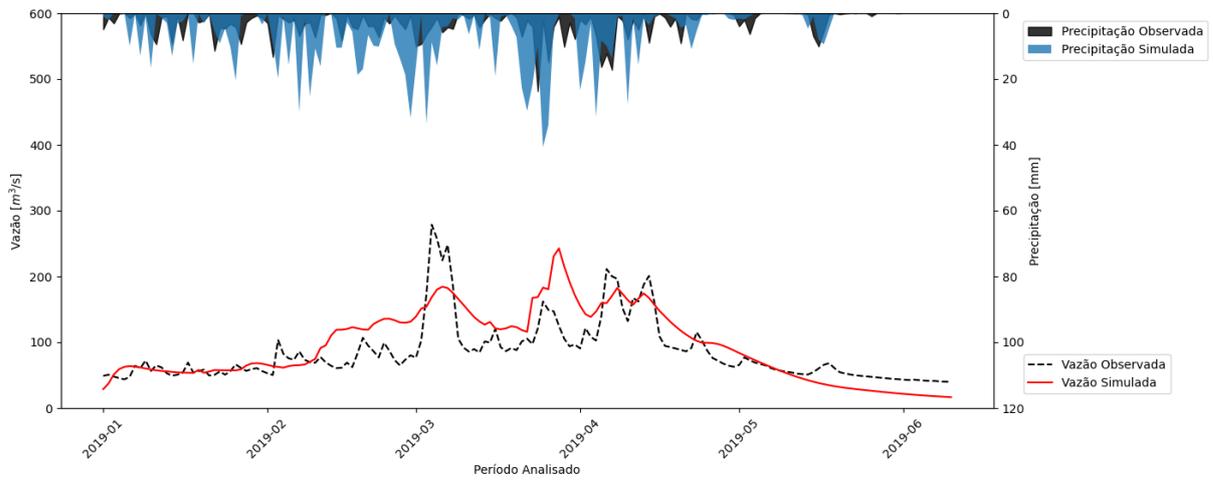
Análise Vazão/Precipitação Simulada e Observada na Estação Itacajá (ID:23150000)



Fonte: Produto da pesquisa

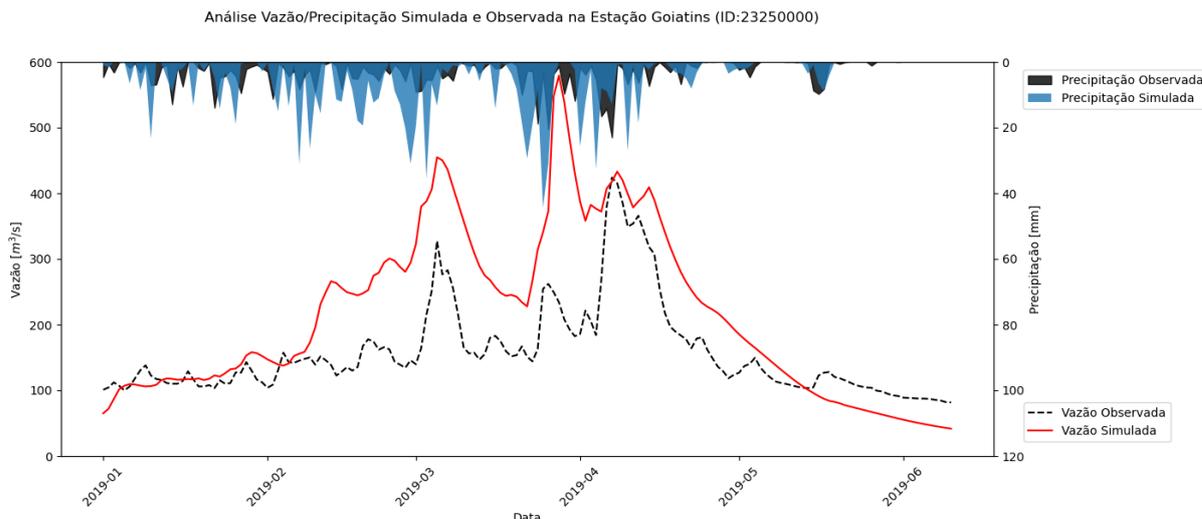
Figura 4.5: Análise de Vazão/Precipitação simulada e observada na Estação Jacaré

Análise Vazão/Precipitação Simulada e Observada na Estação Jacaré (ID:23230000)



Fonte: Produto da pesquisa

Figura 4.6: Análise de Vazão/Precipitação simulada e observada na Estação Goiatins



Fonte: Produto da pesquisa

Este tipo de gráfico, nos permite analisar a relação entre a vazão e a precipitação no contexto das estações selecionadas neste estudo. Considerando que a precipitação é a quantidade de chuva que cai em uma determinada área em um determinado período, enquanto a vazão se refere ao volume de água que flui em um rio em um determinado momento. A vazão é afetada pela precipitação, uma vez que a chuva pode aumentar o nível de água no rio e, portanto, aumentar a vazão.

Os indicadores estatísticos e seus respectivos valores, tais com: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), a raiz do erro quadrático médio (RMSE), o erro de viés (Bias) e o coeficiente de correlação ( $r$ ) utilizados para avaliar a simulação neste trabalho, são mostrados na Tabela 4.1. Os reforçam as argumentações referente a avaliação do desempenho do modelo na simulação de vazão, permitindo verificar a adequação dos dados da simulação em relação aos dados observados.

Tabela 4.1: Indicadores estatísticos da simulação

Estação	NSE	RMSE	BIAS	$r$
Itacajá	-2,81	54,29	49,29	0,62
Jacaré	-0,9	41,56	23,14	0,69
Goiatins	-0,26	94,91	78,19	0,78

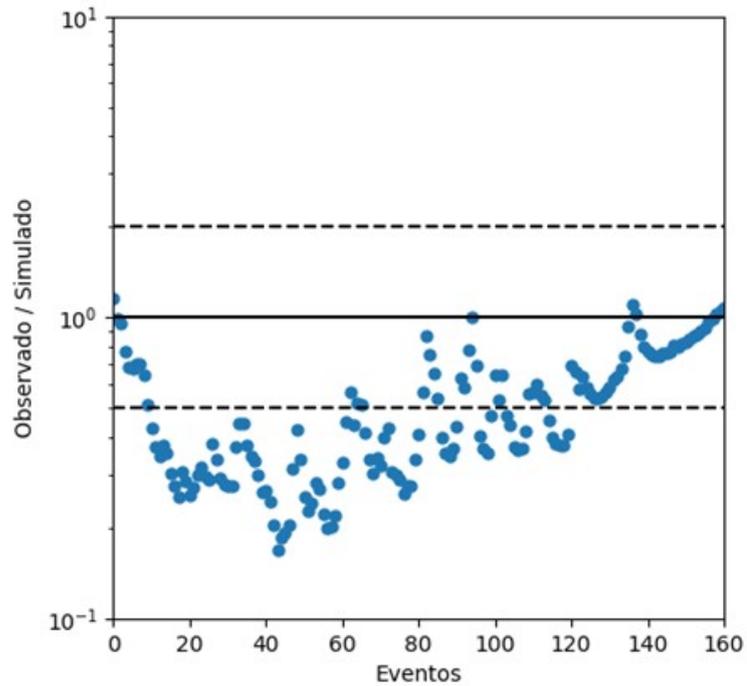
Fonte: Produto da pesquisa

Para melhor analisar os dados obtidos juntamente com os indicadores acima, representamos os eventos com gráficos de dispersão pois permite visualizar a variabilidade (dispersão) ou relação existente duas variáveis quantificáveis, ou seja, visualiza-se o quanto os dados estão espalhados em torno de determinado ponto (eixo) e melhor avalia-se sua

consistência e identifica-se possíveis padrões ou outliers nos eventos. OLIVEIRA (2006).

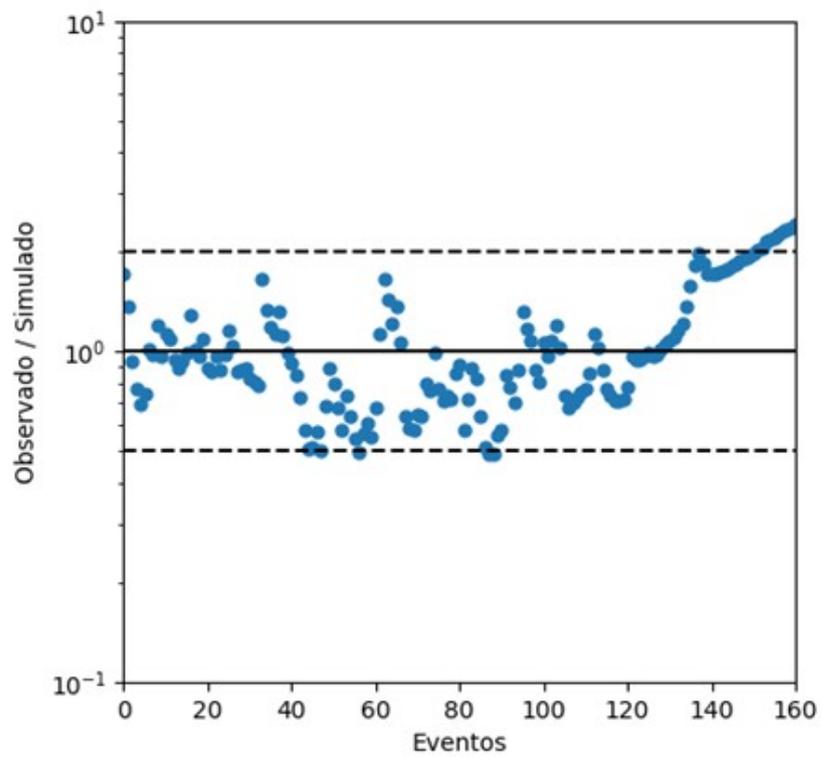
Nessa perspectiva, representamos a vazão observada/simulada em cada estação, na Figura 4.7, Figura 4.8 e Figura 4.9, respectivamente nas estações Itacajá, Jacaré e Goiatins. Sendo que o eixo horizontal representa a ocorrência do evento em análise e no eixo vertical

Figura 4.7: Dispersão da Vazão Observada/Simulada na Estação Itacajá



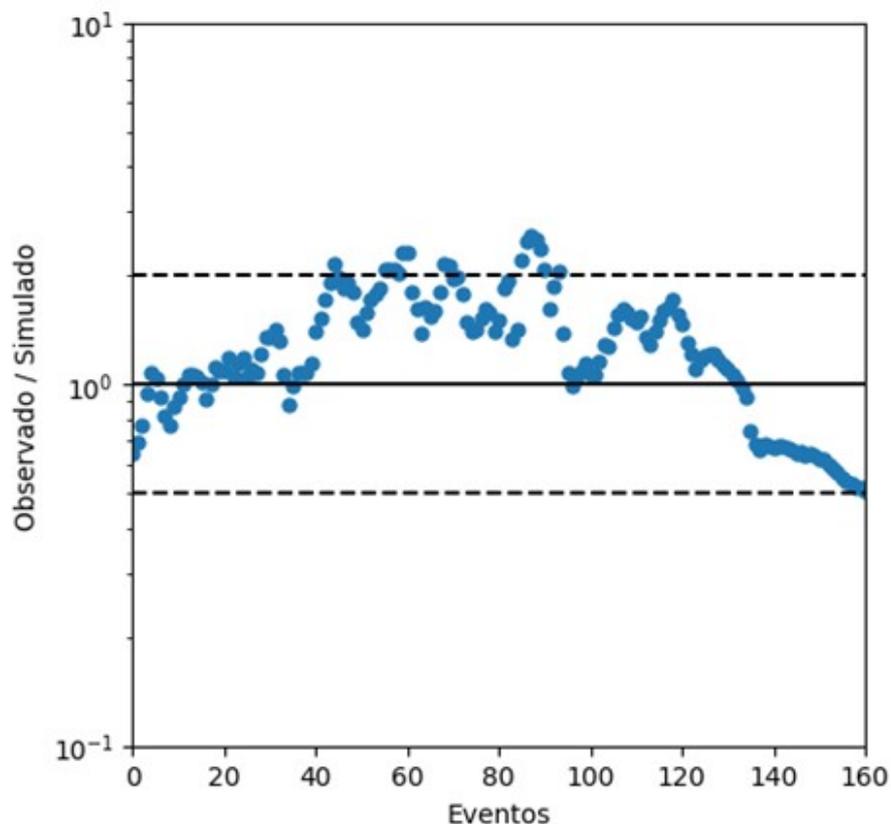
Fonte: Produto da pesquisa

Figura 4.8: Dispersão da Vazão Observada/Simulada na Estação Jacaré



Fonte: Produto da pesquisa

Figura 4.9: Dispersão da Vazão Observada/Simulada na Estação Goiatins



Fonte: Produto da pesquisa

Os gráficos de dispersão foram utilizados pois permitem visualizar a relação entre os dados simulados e observados com maior transparência, onde o eixo vertical do gráfico representa a relação entre a vazão observada e a vazão simulada. Dessa forma, quando a relação está próxima de 1, considerando 1 como a linha sólida nos gráficos, isso indica que a vazão simulada está próxima da vazão observada, indicando que o modelo pode ser eficaz para prever a vazão naquela estação. Quando a relação é maior que 1, isso significa que a vazão simulada é maior do que a vazão observada, o que pode indicar uma superestimação do modelo, ou seja, o modelo está prevendo uma vazão maior do que a vazão real. Por outro lado, quando a relação é menor que 1, isso indica que a vazão simulada é menor do que a vazão observada, o que pode indicar uma subestimação do modelo. Dessa forma, esse gráfico pode ser utilizado para avaliar a eficácia do modelo de simulação em prever a vazão na estação em questão. Ele também pode ser utilizado para identificar padrões na relação entre os dados observados e simulados, ajudando a entender melhor o comportamento hidrológico da área de estudo.

Diante disso, através da observação das Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 o modelo apresentou superestimação dos dados simulados em todas as estações. Todavia, através da análise dos gráficos de dispersão e dos indicadores estatísticos constata-se uma correlação conside-

rável entre as séries, sobretudo para as estações de Goiatins e Jacaré, que apresentam uma melhor aderência com as oscilações da vazão do rio Tocantins. Assim, os gráficos evidenciam que a ocorrência de precipitação impacta diretamente no aumento da vazão, sendo perceptível que os picos de vazão coincidem com os momentos de maior intensidade de precipitação. Nesse sentido, sugere-se que a precipitação simulada é superestimada na maioria dos períodos em comparação com a observada, o que pode ter contribuído para a superestimação da vazão simulada.

---

## Considerações Finais

---

### 5.1 Conclusões

O foco principal do estudo foi avaliar o desempenho do modelo WRF-Hydro totalmente acoplado, com base nos dados de vazão e precipitação da bacia Tocantins-Araguaia, localizada na região do MATOPIBA.

Os resultados obtidos através dos dados estatísticos apontam para uma correlação razoável entre os dados observados e simulados, pois estão acima de sessenta por cento nas três estações e indicam que os modelos hidrometeorológicos utilizados foram capazes de representar de forma adequada as interações de vazão.

Além disso, a análise dos dados permitiu identificar algumas fontes de incertezas associadas às simulações, como a variabilidade espacial das chuvas e a incerteza nos parâmetros do modelo utilizado. Essas incertezas podem ser melhor analisadas e aprimorar a modelagem hidrológica de forma a mitigar incertezas associadas às previsões hidrológicas, assim como no contexto das mudanças climáticas.

Os resultados indicam que os dados de vazão simulados apresentam uma superestimação em relação aos valores observados nas estações fluviométricas investigadas. A análise gráfica entre vazão e precipitação permitiu verificar a relação de aumento da vazão em períodos coincidentes com os picos de precipitação, sugerindo uma associação entre a superestimação dos dados de vazão simulados e a superestimação da precipitação simulada em relação à observada. Tais resultados são motivadores, pois evidenciam que a aplicação do sistema WRF-Hydro pode contribuir para o aprimoramento do gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos e, por consequência, promover a segurança hídrica. É importante ressaltar que, embora o modelo tenha sido desenvolvido com base nas premissas e variáveis físicas para a região *CONUS*, os resultados obtidos para a região brasileira, que apresenta características regionais específicas, aliado ao fato de não haver uma significativa calibração, sugerem a possibilidade de obtenção de resultados mais precisos caso o modelo seja calibrado para a região em questão. Portanto, os resultados demonstram que o sistema de modelagem WRF-Hydro totalmente acoplado apresenta uma tendência satisfatória em reproduzir os momentos de pico dos valores de vazão simulados em períodos de precipitação intensa, em relação aos observados.

## ***5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros***

O desenvolvimento deste estudo revela a existência de diversas oportunidades com perspectivas distintas para melhorar os resultados obtidos. Os próximos passos a serem considerados incluem a exploração de parametrizações de índices do modelo, que também contribuem para os valores de vazão, bem como a respectiva calibração do modelo para o ajuste de precipitação.

Além disso, outra perspectiva a ser considerada é a avaliação do comportamento dos ciclos hidrológicos na região do MATOPIBA em função da expansão das fronteiras agrícolas, juntamente com as correlações com eventos climáticos extremos em nível regional e nacional.

---

## Produção Técnica e Científica

---

Durante o desenvolvimento da presente dissertação, uma série de contribuições técnico-científicas foram realizadas. Estas contribuições não só reforçam o embasamento teórico e aplicado do estudo mas também representam avanços na área de hidrometeorologia, modelagem computacional e gestão de recursos hídricos. A seguir, apresenta-se um resumo das principais produções oriundas deste trabalho:

1. SILVA, D. G.; SILVA JUNIOR, J. R. D.; SOUZA, F. M. de; RAMOS, D. N. da S.; SILVA, A. R.; SANTOS, T. S. dos; MOREIRA, D. M. WRF-Hydro for Streamflow Simulation in the MATOPIBA Region within the Tocantins/Araguaia River Basin—Brazil: Implications for Water Resource Management. *Water*, v. 15, n. 22, art. 3902, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/22/3902>.
2. DANTAS DA SILVA JUNIOR, J. R.; PEDRUZZI, R.; MILANI DE SOUZA, F.; SILVA FERRAZ, P.; GUIMARÃES SILVA, D.; SACRAMENTO VIEIRA, C.; ROMERO DE MORAES, M.; GIOVANI SPERANDIO NASCIMENTO, E.; MARTINS MOREIRA, D. Feasibility analysis on the construction of a web solution for hydro-meteorological forecasting considering water body management and indicators for the SARS-COV-2 pandemic. *AI Perspectives*, v. 3, n. 1, p. 1–12, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/S42467-021-00011-0>.
3. SILVA, D. G.; VIEIRA, C. S.; JUNIOR, J. R. D. da S.; SOUZA, F. M. de; RAMOS, D. N. da S.; MOREIRA, D. M. Estudo da vazão na bacia dos rios Tocantins-Araguaia utilizando o modelo WRF-Hydro. *Anais do XXII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Bauru, 29 Nov. 2022. Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2022, p. 603–615.
4. GUIMARAES SILVA, D.; NUNES DA SILVA RAMOS, D.; MILANI DE SOUZA, F.; JUNIOR, J. R. D. da S.; KAORE LAGO KITAGAWA, Y.; MARTINS MOREIRA, D. SIMULAÇÃO DE PRECIPITAÇÃO USANDO O MODELO WRF-HYDRO NA REGIÃO DE MATOPIBA. *Blucher Engineering Proceedings*, v. 8, n. 4, p. 408–415, 2021. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/37030>.
5. GUIMARAES SILVA, D.; NUNES DA SILVA RAMOS, D.; MILANI DE SOUZA, F.; JUNIOR, J. R. D. da S.; KAORE LAGO KITAGAWA, Y.; MARTINS MOREIRA, D. Precipitation Simulation Using the WRF-Hydro Model in the Matopiba Region. *Journal of Bioengineering, Technologies and Health*, v. 5, n. 2. Disponível em: <http://www.jbth.com.br/index.php/JBTH/article/view/211/163>.

6. SACRAMENTO VIEIRA, C.; DANTAS DA SILVA JUNIOR, J. R.; GUIMARAES SILVA, D.; MILANI DE SOUZA, F.; NUNES DA SILVA RAMOS, D.; KAORE LAGO KITAGAWA, Y.; MARTINS MOREIRA, D. Modeling of an Extreme Flooding Event in the Amazon Basin Using the WRF-Hydro Model. *Journal of Bioengineering, Technologies and Health*, v. 5, n. 2, p. 123–129, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.34178/jbth.v5i2.210>.
7. SACRAMENTO VIEIRA, C.; DANTAS DA SILVA JUNIOR, J. R.; GUIMARAES SILVA, D.; MILANI DE SOUZA, F.; NUNES DA SILVA RAMOS, D.; KAORE LAGO KITAGAWA, Y.; MARTINS MOREIRA, D. MODELING OF AN EXTREME FLOODING EVENT IN THE AMAZON BASIN USING THE WRF-HYDRO MODEL. *Blucher Engineering Proceedings*, v. 8, n. 4, p. 400–407, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5151/SIINTEC2021-208770>.
8. SILVA JÚNIOR, J. R. D. da; SOUZA, F. M. de; SILVA, D. G.; FERRAZ, P. S.; MOARES, M. R. de; SCHÄFER, A. G.; NASCIMENTO, E. G. S.; MOREIRA, D. M. FEASIBILITY ANALYSIS ON THE CONSTRUCTION OF A SOLUTION FOR MONITORING AND HYDROMETEOROLOGICAL FORECASTING. *Blucher Engineering Proceedings*, p. 585–593, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5151/siintec2020-FEASIBILITYANALYSIS>.

Essas contribuições, incorporadas ao longo do processo de pesquisa, não apenas enriqueceram o conteúdo da dissertação mas também ofereceram contribuições para a ciência e tecnologia aplicadas à gestão de recursos hídricos, modelagem hidrológica e previsão hidrometeorológica. A integração destes trabalhos ressalta a relevância prática e teórica do estudo conduzido, reiterando seu impacto no campo de estudo e na sociedade como um todo.

---

## Referências Bibliográficas

---

- ABBASZADEH, P.; GAVAHI, K.; MORADKHANI, H. Multivariate remotely sensed and in-situ data assimilation for enhancing community wrf-hydro model forecasting. *Advances in Water Resources*, Elsevier, v. 145, p. 103721, 2020. [2.5](#)
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for brazil. *Meteorologische zeitschrift*, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. [3.1](#)
- AMBRIZZI, T.; ARAUJO, M. Base científica das mudanças climáticas: v. 1-primeiro relatório de avaliação nacional. 2014. [2.2](#)
- AMIRUDIN, A. A. et al. The importance of cumulus parameterization and resolution in simulating rainfall over peninsular malaysia. *Atmosphere*, MDPI, v. 13, n. 10, p. 1557, 2022. [2.3](#)
- ARAKAWA, A.; LAMB, V. R. Computational design of the basic dynamical processes of the ucla general circulation model. *General circulation models of the atmosphere*, Methods in computational Physics, v. 17, n. Supplement C, p. 173–265, 1977. [2.3](#)
- ARNAULT, J. et al. Precipitation sensitivity to the uncertainty of terrestrial water flow in wrf-hydro: An ensemble analysis for central europe. *Journal of Hydrometeorology*, American Meteorological Society, v. 19, n. 6, p. 1007–1025, 2018. [2.5](#)
- ARNAULT, J. et al. Role of runoff–infiltration partitioning and resolved overland flow on land-atmosphere feedbacks: A case study with the wrf-hydro coupled modeling system for west africa. *Journal of Hydrometeorology*, American Meteorological Society, v. 17, n. 5, p. 1489–1516, 2016. [2.5](#)
- ARNAULT, J. et al. A joint soil-vegetation-atmospheric water tagging procedure with wrf-hydro: Implementation and application to the case of precipitation partitioning in the upper danube river basin. *Water Resources Research*, Wiley Online Library, v. 55, n. 7, p. 6217–6243, 2019. [2.5](#)
- BARICHIVICH, J. et al. Recent intensification of amazon flooding extremes driven by strengthened walker circulation. *Science advances*, American Association for the Advancement of Science, v. 4, n. 9, p. eaat8785, 2018. [1](#)
- BENDER, F. D. *Verificação da Previsão do tempo em São Paulo com o modelo operacional WRF*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012. [2.2](#)
- BRANCO, M. d. S. L. C.; SAITO, C. H. Waterborne disaster prevention in brazil: Assessing the level of implementation of the hyogo framework for action. *DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE*, UNIV FEDERAL PARANA, EDITORA RUA JOAO NEGRAO 280, CURITIBA, PARANA, 80060 . . . , v. 42, p. 180–201, 2017. [2.1](#)
- CHAVES, R. R.; CAVALCANTI, I. F. A. Atmospheric circulation features associated with rainfall variability over southern northeast brazil. *Monthly Weather Review*, American Meteorological Society, v. 129, n. 10, p. 2614–2626, 2001. [3.1](#)

- DUBEY, A. K. et al. Flood modeling of a large transboundary river using wrf-hydro and microwave remote sensing. *Journal of Hydrology*, Elsevier, v. 598, p. 126391, 2021. [2.5](#)
- EDWARDS, P. N. History of climate modeling. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, Wiley Online Library, v. 2, n. 1, p. 128–139, 2011. [2.2](#)
- ERENO, D. Aguas controladas: sistema de gerenciamento de represas criado em são carlos atrai a atenção de empresas do brasil e do exterior. *PESQUISA FAPESP [Brasil]*, v. 83, p. 64–67, 2003. [2.1](#), [2.2](#)
- FERRARI, A. F. P. C. *Impacto das alterações climáticas no recurso solar em África*. Tese (Doutorado), 2018. [2.2](#)
- FERSCH, B. et al. High-resolution fully coupled atmospheric–hydrological modeling: a cross-compartment regional water and energy cycle evaluation. *Hydrology and Earth System Sciences*, Copernicus GmbH, v. 24, n. 5, p. 2457–2481, 2020. [2.5](#)
- GALANAKI, E.; LAGOUVARDOS, K.; KOTRONI, V.; GIANNAROS, T.; GIANNAROS, C. Implementation of wrf-hydro at two drainage basins in the region of attica, greece, for operational flood forecasting. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 21, n. 7, p. 1983–2000, 2021. [2.5](#)
- GARCIA, J. R. et al. O papel da dimensão ambiental na ocupação do matopiba. *Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia*, Théry, Hervé, n. 35, 2018. [3.1](#), [3.2](#), [3.3](#), [3.1](#), [3.4](#)
- GDAS, N. Fnl 0.25 degree global tropospheric analyses and forecast grids. *Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research; Computational and Information Systems Laboratory: Boulder, CO, USA*, 2015. [3.4](#)
- GIORGI, F.; JR, W. J. G. Regional dynamical downscaling and the cordex initiative. *Annual review of environment and resources*, Annual Reviews, v. 40, p. 467–490, 2015. [2.2](#), [2.3](#)
- GIVATI, A.; GOCHIS, D.; RUMMLER, T.; KUNSTMANN, H. Comparing one-way and two-way coupled hydrometeorological forecasting systems for flood forecasting in the mediterranean region. *Hydrology*, MDPI, v. 3, n. 2, p. 19, 2016. [2.5](#)
- GOCHIS, D. et al. The wrf-hydro modeling system technical description,(version 5.0). *NCAR Technical Note*, v. 107, 2018. [2.4](#), [2.11](#)
- GOCHIS, D. et al. Attributing landscape-scale land surface flux partitioning in a complex terrain, snow-dominated basin in the southern rocky mountains. In: *AGU Fall Meeting Abstracts*. [S.l.: s.n.], 2020. v. 2020, p. H128–14. [1](#), [2.8](#), [2.9](#), [2.10](#), [2.12](#)
- GOCHIS, D. J. et al. Multi-variate evaluation of the noaa national water model. In: *AGU Fall Meeting*. [S.l.: s.n.], 2018. [2.4](#), [3.3](#)
- GOCHIS, J.; CHEN, F. Hydrological enhancements to the community noah land surface model. 2003. [3.3](#)
- HARIPRASAD, K. et al. Numerical simulation and intercomparison of boundary layer structure with different pbl schemes in wrf using experimental observations at a tropical site. *Atmospheric Research*, Elsevier, v. 145, p. 27–44, 2014. [2.5](#)

- HAUPT, S. E.; JIMÉNEZ, P. A.; LEE, J. A.; KOSOVIĆ, B. Principles of meteorology and numerical weather prediction. In: *Renewable Energy Forecasting*. [S.l.]: Elsevier, 2017. p. 3–28. [2.2](#)
- HUNT, K. M.; MENON, A. The 2018 kerala floods: a climate change perspective. *Climate Dynamics*, Springer, v. 54, n. 3-4, p. 2433–2446, 2020. [2.5](#)
- JÚNIOR, J. R. D. da S. et al. Feasibility analysis on the construction of a solution for monitoring and hydrometeorological forecasting. *Blucher engineering proceedings*. Editora Blucher, São Paulo, p. 585–593, 2020. [2.5](#)
- JÚNIOR, J. R. Dantas da S. et al. Feasibility analysis on the construction of a web solution for hydrometeorological forecasting considering water body management and indicators for the sars-cov-2 pandemic. *AI Perspectives*, SpringerOpen, v. 3, n. 1, p. 1–12, 2021. [1](#)
- KERANDI, N. et al. Joint atmospheric-terrestrial water balances for east africa: a wrf-hydro case study for the upper tana river basin. *Theoretical and Applied Climatology*, Springer, v. 131, p. 1337–1355, 2018. [2.5](#)
- KIM, S. et al. High-resolution modeling and prediction of urban floods using wrf-hydro and data assimilation. *Journal of Hydrology*, Elsevier, v. 598, p. 126236, 2021. [2.5](#)
- KITAGAWA, Y. K. L. et al. Evaluation of the chemical transport of air pollutants in the metropolitan region of salvador, brazil. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, WIT Press, v. 230, p. 519–530, 2018. [2.5](#)
- KITAGAWA, Y. K. L. et al. Evaluation of the wrf-arw model during an extreme rainfall event: subtropical storm guará. *Atmósfera*, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, v. 35, n. 4, p. 651–672, 2022. [2.3](#), [3.4](#)
- KOUSKY, V. E. Frontal influences on northeast brazil. *Monthly Weather Review*, American Meteorological Society, v. 107, n. 9, p. 1140–1153, 1979. [3.1](#)
- LAHMERS, T. M.; CASTRO, C. L.; HAZENBERG, P. Effects of lateral flow on the convective environment in a coupled hydrometeorological modeling system in a semiarid environment. *Journal of Hydrometeorology*, American Meteorological Society, v. 21, n. 4, p. 615–642, 2020. [2.5](#)
- LAPRISE, R. The euler equations of motion with hydrostatic pressure as an independent variable. *Monthly weather review*, v. 120, n. 1, p. 197–207, 1992. [2.3](#)
- LI, L.; PONTOPPIDAN, M.; SOBOLOWSKI, S.; SENATORE, A. The impact of initial conditions on convection-permitting simulations of a flood event over complex mountainous terrain. *Hydrology and Earth System Sciences*, Copernicus GmbH, v. 24, n. 2, p. 771–791, 2020. [2.5](#)
- LIMA, T. P. et al. Dinâmica espaço temporal da cobertura da terra em uma bacia hidrográfica da região do matopiba, brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 43, n. 1, p. 162–170, 2020. [3.1](#)
- LIN, P. et al. Spatiotemporal evaluation of simulated evapotranspiration and streamflow over texas using the wrf-hydro-rapid modeling framework. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, Wiley Online Library, v. 54, n. 1, p. 40–54, 2018. [2.5](#)

- LIN, P. et al. Implementation of a vector-based river network routing scheme in the community wrf-hydro modeling framework for flood discharge simulation. *Environmental Modelling & Software*, Elsevier, v. 107, p. 1–11, 2018. [2.5](#)
- LIU, S.; WANG, J.; WEI, J.; WANG, H. Hydrological simulation evaluation with wrf-hydro in a large and highly complicated watershed: The xijiang river basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Elsevier, v. 38, p. 100943, 2021. [2.5](#), [3](#)
- LORENZ, E. N. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of atmospheric sciences*, v. 20, n. 2, p. 130–141, 1963. [2.3](#)
- MACIEL, J. S. C.; ALVES, L. G. S.; CORRÊA, B. G. D. S.; CARVALHO, I. M. R. D.; OLIVEIRA, M. A. Flood forecast in manaus, amazonas, brazil. *WIT Transactions on The Built Environment*, WIT Press, v. 194, p. 63–72, 2020. [1](#)
- MAJIDZADEH, H. et al. Extreme flooding mobilized dissolved organic matter from coastal forested wetlands. *Biogeochemistry*, Springer, v. 136, p. 293–309, 2017. [2.5](#)
- MANABE, S. Climate and the ocean circulation: I. the atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface. *Monthly weather review*, American Meteorological Society, v. 97, n. 11, p. 739–774, 1969. [3.3](#)
- MILLY, P. Climate, soil water storage, and the average annual water balance. *Water Resources Research*, Wiley Online Library, v. 30, n. 7, p. 2143–2156, 1994. [3.3](#)
- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Projeções do Agronegócio: Brasil 2017/18 a 2027/28 projeções de longo prazo*. Brasília: MAPA/ACE, 2018. 112 p. ISBN 978-85-7991-116-3. [3.1](#)
- MIRANDA, E. E. D.; MAGALHÃES, L. A.; CARVALHO, C. A. D. Proposta de delimitação territorial do matopiba. Campinas: Embrapa, 2014., 2014. [3.1](#)
- MONIN, A. S.; OBUKHOV, A. M. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR*, v. 151, n. 163, p. e187, 1954. [2.3](#)
- MOREIRA, M. C.; SANTOS, F. dos; SILVA, D. Inventário digital das estações fluviométricas e pluviométricas da bacia do rio grande. *Simpósio Bras Recur Hídricos*, v. 7, 2013. [3.2](#)
- MOREIRA, M. C.; SILVA, D. d.; SILVA, M. P. d. Atlas hidrológico da bacia hidrográfica do rio grande. *Barreiras: Gazeta Santa Cruz*, 2010. [2.4](#), [3.2](#)
- NAABIL, E.; LAMPTEY, B.; ARNAULT, J.; OLUFAYO, A.; KUNSTMANN, H. Water resources management using the wrf-hydro modeling system: Case-study of the tono dam in west africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Elsevier, v. 12, p. 196–209, 2017. [2.5](#), [3.3](#)
- OLIVEIRA, A. C. Implementação do modelo atmosférico wrf acoplado com o modelo hidrológico topmodel para a bacia de união da vitória. *Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia-Universidade Federal do Paraná. Curitiba*, 2006. [4.1](#)
- OZKAYA, A.; AKYUREK, Z. Evaluating the use of bias-corrected radar rainfall data in three flood events in samsun, turkey. *Natural Hazards*, Springer, v. 98, p. 643–674, 2019. [2.5](#)

- PITTA, F. T.; VEGA, G. C.; BARBOSA, S. Impactos da expansão do agronegócio no matopiba: comunidades e meio ambiente. *ActionAid, Rede Soc. Justiça e Direitos Humanos, Ford Found*, v. 82, 2017. 3.2
- POWERS, J. G. et al. The weather research and forecasting model: Overview, system efforts, and future directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, American Meteorological Society, v. 98, n. 8, p. 1717–1737, 2017. 2.3, 2.5
- RAFIEEINASAB, A. et al. Improved integrated flood prediction at coastal regions via one-way coupled wrf-hydro-adcirc. In: *AGU Fall Meeting Abstracts*. [S.l.: s.n.], 2020. v. 2020, p. H033–0011. 2.4
- RICHARDSON, L. Weather prediction by numerical processes, cambridge univ. P., London, 1922. 2.2
- RUDDIMAN, W. F. *Earth's Climate: past and future*. [S.l.]: Macmillan, 2001. 2.1
- RUMMLER, T.; ARNAULT, J.; GOCHIS, D.; KUNSTMANN, H. Role of lateral terrestrial water flow on the regional water cycle in a complex terrain region: Investigation with a fully coupled model system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 124, n. 2, p. 507–529, 2019. 1, 2.5
- RYU, Y. et al. Applying a coupled hydrometeorological simulation system to flash flood forecasting over the korean peninsula. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, Springer, v. 53, p. 421–430, 2017. 2.5
- SALAS, F. R. et al. Towards real-time continental scale streamflow simulation in continuous and discrete space. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, Wiley Online Library, v. 54, n. 1, p. 7–27, 2018. 1
- SALOMON, M. M. R. Quem disputa o matopiba? interesses e sustentabilidade na fronteira agrícola. 2020. 3.2
- SAMPAIO, G.; DIAS, P. L. da S. Evolução dos modelos climáticos e de previsão de tempo e clima. *Revista USP*, n. 103, p. 41–54, 2014. 2.2
- SAMPSON, K.; GOCHIS, D. Wrf hydro gis pre-processing tools, version 5.0, documentation. Boulder, CO: National Center for Atmospheric Research, Research Applications Laboratory, 2018. 2.4, 3.3
- SENATORE, A. et al. Fully coupled atmosphere-hydrology simulations for the central mediterranean: Impact of enhanced hydrological parameterization for short and long time scales. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, Wiley Online Library, v. 7, n. 4, p. 1693–1715, 2015. 2.5, 3.4
- SILVA, D. G. et al. Wrf-hydro for streamflow simulation in the matopiba region within the tocantins/araguaia river basin—brazil: Implications for water resource management. *Water*, v. 15, n. 22, p. 3902, 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4441/15/22/3902>>. 3.6, 3.7, 3.8
- SILVER, M.; KARNIELI, A.; GINAT, H.; MEIRI, E.; FREDJ, E. An innovative method for determining hydrological calibration parameters for the wrf-hydro model in arid regions. *Environmental modelling & software*, Elsevier, v. 91, p. 47–69, 2017. 1, 2.5

- SKAMAROCK, W. Coauthors, 2008: A description of the advanced research wrf version 3. ncar technical note tn-475+ str. *National Center for Atmospheric Research*. [Available online at <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/technote/v3\technote.pdf>], 2008. [2.3](#), [2.4](#), [2.3](#), [2.5](#), [2.3](#), [2.6](#), [2.3](#), [2.7](#)
- SOMOS-VALENZUELA, M. A.; PALMER, R. N. Use of wrf-hydro over the northeast of the us to estimate water budget tendencies in small watersheds. *Water*, MDPI, v. 10, n. 12, p. 1709, 2018. [1](#), [2.5](#)
- SOUZA, L. D. et al. Avaliação da previsibilidade do modelo wrf-hydro em modelagens hidrometeorológicas com diferentes resoluções na bacia do taquari-antas. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 12, n. 05, p. 1872–1890, 2019. [2.5](#)
- SPYRIDES, C. Caracterização da variabilidade da precipitação no matopiba, região produtora de soja. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 04, p. 1425–1441, 2020. [3.1](#), [3.5](#), [3.1](#)
- SUN, M. et al. Evaluation of flood prediction capability of the wrf-hydro model based on multiple forcing scenarios. *Water*, MDPI, v. 12, n. 3, p. 874, 2020. [1](#), [2.5](#)
- SURUSSAVADEE, C. Evaluation of wrf near-surface wind simulations in tropics employing different planetary boundary layer schemes. In: IEEE. *2017 8th International Renewable Energy Congress (IREC)*. [S.l.], 2017. p. 1–4. [2.5](#)
- TOTH, E. Catchment classification based on characterization of streamflow and precipitation time series. *Hydrology and Earth System Sciences*, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 17, n. 3, p. 1149–1159, 2013. [3](#)
- UNESCO, U. Water and climate change. *The United Nations World Water Development Report; UNESCO: Paris, France*, 2020. [1](#), [2.1](#)
- UNESCO, U. Water and climate change. *The United Nations World Water Development Report; UNESCO: Paris, France*, 2021. [1](#)
- UNESCO, U. Water and climate change. *The United Nations World Water Development Report; UNESCO: Paris, France*, 2022. [1](#)
- VARLAS, G. et al. A multi-platform hydrometeorological analysis of the flash flood event of 15 november 2017 in attica, greece. *Remote Sensing*, MDPI, v. 11, n. 1, p. 45, 2018. [1](#)
- VERRI, G. et al. A meteo-hydrological modeling system for the reconstruction of river runoff: the case of the ofanto river catchment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Copernicus GmbH, v. 17, n. 10, p. 1741–1761, 2017. [1](#), [2.5](#)
- VIOLA, M. R.; MELLO, C. R. de; GIONGO, M.; BESKOW, S.; SANTOS, A. F. dos. Modelagem hidrológica em uma sub-bacia hidrográfica do baixo rio araguaia, to. *Journal of Biotechnology and Biodiversity*, v. 3, n. 3, p. 38–47, 2012. [3.2](#)
- WANG, J. et al. A parallel workflow implementation for pest version 13.6 in high-performance computing for wrf-hydro version 5.0: a case study over the midwestern united states. *Geoscientific Model Development*, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 12, n. 8, p. 3523–3539, 2019. [3.4](#)

WANG, W.; LIU, J.; LI, C.; LIU, Y.; YU, F. Data assimilation for rainfall-runoff prediction based on coupled atmospheric-hydrologic systems with variable complexity. *Remote Sensing*, MDPI, v. 13, n. 4, p. 595, 2021. [3.3](#)

WERNER, M.; KRYZA, M.; PAGOWSKI, M.; GUZIKOWSKI, J. Assimilation of pm2.5 ground base observations to two chemical schemes in wrf-chem—the results for the winter and summer period. *Atmospheric environment*, Elsevier, v. 200, p. 178–189, 2019. [1](#)

WHITE, D. D. et al. Co-producing interdisciplinary knowledge and action for sustainable water governance: Lessons from the development of a water resources decision support system in pernambuco, brazil. *Global Challenges*, Wiley Online Library, v. 3, n. 4, p. 1800012, 2019. [1](#), [2.5](#)

XUE, Z. G. et al. Modeling hydroclimatic change in southwest louisiana rivers. *Water*, MDPI, v. 10, n. 5, p. 596, 2018. [2.5](#)

ZHANG, Y.; BOCQUET, M.; MALLET, V.; SEIGNEUR, C.; BAKLANOV, A. Real-time air quality forecasting, part i: History, techniques, and current status. *Atmospheric Environment*, Elsevier, v. 60, p. 632–655, 2012. [3](#)

ZHANG, Z.; ARNAULT, J.; WAGNER, S.; LAUX, P.; KUNSTMANN, H. Impact of lateral terrestrial water flow on land-atmosphere interactions in the heihe river basin in china: Fully coupled modeling and precipitation recycling analysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 124, n. 15, p. 8401–8423, 2019. [2.5](#)

*ANÁLISE DE VAZÃO E PRECIPITAÇÃO NA  
BACIA TOCANTINS-ARAGUAIA UTILIZANDO O  
MODELO WRF-HYDRO*

José Roberto Dantas da Silva Júnior

Salvador, Março de 2023.