



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROENERGIA DIGITAL**

FREDERICO PIRES PINTO

**MODELAGEM PREDITIVA DA PRECIPITAÇÃO HÍDRICA COM ALGORITMOS DE
SÉRIES TEMPORAIS NA BACIA DO RIO FORMOSO (TO): SUBSÍDIOS PARA A
GESTÃO HÍDRICA NO CONTEXTO DA AGROENERGIA DIGITAL**

**Palmas, TO
2025**

FREDERICO PIRES PINTO

**MODELAGEM PREDITIVA DA PRECIPITAÇÃO HÍDRICA COM ALGORITMOS DE
SÉRIES TEMPORAIS NA BACIA DO RIO FORMOSO (TO): SUBSÍDIOS PARA A
GESTÃO HÍDRICA NO CONTEXTO DA AGROENERGIA DIGITAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agroenergia Digital (PPGAD) da Universidade Federal do Tocantins (UFT), como requisito para a obtenção do título de Mestre em Agroenergia Digital, vinculada à Linha de Pesquisa II: Bioprocessos para Obtenção de Biocombustíveis

Orientador: Dr. Guilherme Benko de Siqueira

**Palmas, TO
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

P659m Pinto, Frederico Pires.

Modelagem preditiva da precipitação hídrica com algoritmos de séries temporais na Bacia do Rio Formoso (To): subsídios para a gestão hídrica no contexto da agroenergia digital. / Frederico Pires Pinto. – Palmas, TO, 2025.

106 f.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) em Agroenergia, 2025.

Orientador: Guilherme Benko de Siqueira

1. Modelagem preditiva. 2. Previsão precipitação. 3. SARIMA. 4. Séries temporais. I. Título

CDD 333.7

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Frederico Pires Pinto

Modelagem Preditiva da Precipitação Hídrica com Algoritmos de Séries Temporais na Bacia do Rio Formoso (TO): Subsídios para a Gestão Hídrica no Contexto da Agroenergia Digital

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agroenergia Digital (PPGAD). Foi avaliado para a obtenção do título de Mestre em Agroenergia Digital e aprovado em sua forma final pela Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: _____ / _____ / _____

Banca Examinadora:

Prof.. Dr. Guilherme Benko de Siqueira, UFT
Orientador

Prof^a Dr^a Ana Beatriz Garcia Faitarone, UFT
Examinador interno

Prof. Dr. Eduardo Ferreira Ribeiro, UFSC
Examinador externo

Dedico este trabalho àqueles que acreditam na força da ciência como instrumento de transformação social, especialmente aos agricultores, pesquisadores e gestores que enfrentam, diariamente, os desafios da escassez hídrica. Que este estudo possa contribuir, ainda que modestamente, para um futuro mais sustentável e inteligente no uso da água e da energia, pilares essenciais da agroenergia digital no Brasil.

AGRADECIMENTOS

Deus, por me conceder forças nos momentos de incerteza, serenidade diante dos desafios e a graça de concluir mais esta etapa ímpar da minha jornada.

À minha família, meu alicerce. Em especial, à minha esposa Priscilla Oliveira Nunes, pelo amor, apoio incondicional e compreensão em todos os momentos, vocês fez toda a diferença para que eu não desistisse. Aos meus filhos, Paulo Guida Pinto e Augusto Oliveira Pinto, por serem minha maior motivação e inspiração diária, vocês me motivam a continuar sempre!

À Universidade Federal do Tocantins (UFT), pelo espaço acadêmico de excelência, pela infraestrutura oferecida e pelo compromisso com a formação científica e profissional.

Aos colegas de mestrado, pela troca de experiências, companheirismo e pelas valiosas contribuições durante essa caminhada. Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agroenergia Digital, pelo conhecimento compartilhado e pela dedicação ao ensino, vocês são inspiração de como um profissional deve proceder.

Ao meu orientador, Dr. Guilherme Benko de Siqueira, minha mais profunda gratidão. Sua confiança inabalável neste trabalho foi decisiva para que eu prosseguisse mesmo diante das dúvidas e resistências enfrentadas. Quando muitos não acreditaram na viabilidade e importância desta pesquisa, sua orientação firme, sensível e comprometida foi essencial. Obrigado por sua paciência, dedicação incansável, empatia e por enxergar o potencial deste estudo desde o início. Sua contribuição foi não apenas acadêmica, mas também humana, e foi fundamental para que eu chegassem até aqui.

Ao professor Dr. Eduardo Ferreira Ribeiro, pela leitura atenta, pelas sugestões construtivas e pela generosa contribuição científica, minha imensa gratidão. Gratidão à professora Dra. Ana Beatriz Garcia Faitarone pelas palavras de incentivo, pela disponibilidade e por aceitar o convite para compor a banca examinadora.

Aos colegas de trabalho, profissionais da área e agricultores da região da Bacia do Rio Formoso, que, com suas vivências, saberes e desafios diários, inspiraram e enriqueceram esta pesquisa. Que este trabalho possa, de alguma forma, contribuir para o desenvolvimento sustentável e para a melhoria da gestão dos recursos hídricos em seus territórios. A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, o meu mais sincero agradecimento.

“Prever a chuva é mais do que antecipar o tempo: é garantir um amanhã para quem planta, para todo ser vivente e para quem transforma água em energia e esperança.”

Autor desconhecido

RESUMO

A gestão eficiente da água e o aproveitamento sustentável de resíduos agrícolas são desafios centrais para o avanço da bioenergia e da produção de biocombustíveis de segunda geração (2G). Esta dissertação aplicou modelos estatísticos de séries temporais, com foco no SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average), para prever a precipitação hídrica na Bacia do Rio Formoso (TO), utilizando dados do Projeto GAN. Entre as configurações testadas, o SARIMA(0,1,1)(0,1,1)₁₂ apresentou o melhor desempenho, com menores valores de AIC e BIC, resíduos sem autocorrelação e métricas de erro (MAPE e RMSE) dentro dos padrões aceitos. O modelo demonstrou alta capacidade preditiva, captando tendências e sazonalidades anuais da precipitação e fornecendo subsídios confiáveis para o planejamento hídrico e agroenergético. A integração das previsões de chuva com a logística de aproveitamento de resíduos agrícolas evidenciou benefícios diretos ao setor produtivo, otimizando armazenamento, transporte e processamento de biomassa, com ganhos de eficiência energética, redução de custos e maior rentabilidade ao produtor rural. Cientificamente, o estudo reforça a relevância da Agroenergia Digital e da modelagem preditiva na gestão climática. Na prática, oferece uma ferramenta estratégica para tomada de decisão no campo, conectando ciência, tecnologia e produção sustentável. Conclui-se que o uso de modelos estatísticos avançados com dados locais fortalece políticas de sustentabilidade e amplia a competitividade da bioenergia regional, abrindo caminho para novas pesquisas integrando previsão climática e gestão de resíduos agroenergéticos.

Palavras-chave: Modelagem preditiva. Previsão precipitação. SARIMA. Séries temporais.

ABSTRACT

Efficient water management and the sustainable use of agricultural residues are central challenges for the advancement of bioenergy and second-generation (2G) biofuel production. This dissertation applied time-series statistical models, focusing on SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average), to forecast rainfall in the Formoso River Basin (Tocantins State), using data from the GAN Project. Among the tested configurations, SARIMA(0,1,1)(0,1,1)₁₂ presented the best performance, with the lowest AIC and BIC values, residuals without autocorrelation, and error metrics (MAPE and RMSE) within accepted standards. The model demonstrated high predictive capacity, capturing annual rainfall trends and seasonality, providing reliable information for water and agroenergy planning. The integration of rainfall forecasts with agricultural waste management logistics demonstrated direct benefits to the production sector, optimizing biomass storage, transportation, and processing, resulting in energy efficiency gains, cost reductions, and increased profitability for rural producers. Scientifically, the study reinforces the relevance of Digital Agroenergy and predictive modeling in climate management. In practice, it offers a strategic tool for decision-making in the field, connecting science, technology, and sustainable production. The conclusion is that the use of advanced statistical models with local data strengthens sustainability policies and increases the competitiveness of regional bioenergy, paving the way for new research integrating climate forecasting and agroenergy waste management.

Keywords: Predictive modeling. Precipitation forecast. SARIMA. Time series.

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Propostas de Validação do Modelo SARIMA e sua Aplicação em Estratégias de Gestão Hídrica	44
Quadro 2 - Etapas metodológicas para previsão de precipitação e gestão de recursos hídricos na bacia do Rio Formoso.....	48
Quadro 3 - Procedimentos Metodológicos x Modelos/Parâmetros Utilizados (pontos positivos e melhorias).....	49
Quadro 4 - Políticas públicas relacionadas à gestão hídrica e agroenergia na Bacia do Rio Formoso.....	85
Quadro 5 - Análise SWOT da Modelagem Preditiva SARIMA aplicada à Bacia do Rio Formoso	88
Tabela 1 – Busca inicial da literatura.....	39
Tabela 2 - Resumo artigos selecionados bases de dados SCOPUS e WoS	39
Tabela 3 - Estratégias de busca nas bases de dados Scopus.....	42
Tabela 4 - Estratégias de busca nas bases de dados Web of Science.....	42
Tabela 5 - Comparativo entre modelos ARIMA, SARIMA e Holt-Winters aplicados à precipitação da Bacia do Rio Formoso (2012–2016).	66
Tabela 6 - Frequência mensal de ocorrência de chuva na Bacia do Rio Formoso (TO) 2012 – 2016.	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma metodológico da pesquisa.....	23
Figura 2 - Plataforma GAN	32
Figura 3 - Estações cadastradas no GAN	33
Figura 4 - Série Histórica Formoso do Araguaia	34
Figura 5 - Disponibilidade de dados - Formoso do Araguaia (2012-2018)	34
Figura 6 - Série Histórica Fazenda Alto Formoso.....	35
Figura 7 - Fluxograma PRISMA – revisão sistemática	38
Figura 8 - Fluxograma estratégico para a Evolução da modelagem preditiva.....	92

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resumo percentual resultados encontrados após inserção de restrições	40
Gráfico 2 - Precipitação mensal SARIMA 2012 – 2016.....	56
Gráfico 3 - Precipitação mensal 2012 – 2016 e Previsão 2017 modelo SAMIRA (1,1,1)(1,1,1)12	57
Gráfico 4 - Precipitação mensal 2012 – 2016 e Previsão 2017 modelo SAMIRA (0,1,1)(0,1,1)12	59
Gráfico 5 - Precipitação mensal ARIMA 2012 – 2016.....	60
Gráfico 6 - Precipitação mensal 2012 – 2016 e Previsão 2017 modelo AMIRA (1,1,1)	61
Gráfico 7 - Precipitação mensal 2012 – 2016 e Previsão 2017 modelo AMIRA (0,1,1)	62
Gráfico 8 - Comparação: Previsão ARIMA(1,1,1) vs Real (2017)	67
Gráfico 9 - Comparação: Previsão ARIMA(0,1,1) vs Real (2017)	68
Gráfico 10 - Comparação: Previsão SARIMA(0,1,1)(0,1,1)12 vs Real (2017).....	69
Gráfico 11 - Comparação: Previsão SARIMA(1,1,1)(1,1,1)12 vs Real (2017).....	70
Gráfico 12 - Comparação: Previsão Holt-Winters vs Real (2017)	71
Gráfico 13 - Comparação de previsões 2017 com dados reais.....	72
Gráfico 14 - Comparativo (linha Observado vs. ARIMA vs. SARIMA vs. Holt-Winters	73
Gráfico 15 - Frequência de meses com ocorrência de chuva por ano 2012 – 2016.	81
Gráfico 16 - Distribuição percentual da precipitação anual (2012-2016).....	82
Gráfico 17 - Densidade de chuva anual na Bacia do Rio Formoso (2012–2016).....	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BEN	Balanço Energético Nacional
CNN	<i>Convolutional Neural Network</i> (Rede Neural Convolucional)
DWT	<i>Discrete Wavelet Transform</i> (Transformada Wavelet Discreta)
ENSO	<i>El Niño–Southern Oscillation</i> (Oscilação Sul-El Niño)
GAN	Grupo de Análise de Normalidade (plataforma Weka)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	International Energy Agency (Agência Internacional de Energia)
IRENA	International Renewable Energy Agency (Agência Internacional para Energias Renováveis)
LSTM	Long Short-Term Memory (Memória de Longo e Curto Prazo)
MATOPIBA	Região composta pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia
PNRH	Plano Nacional de Recursos Hídricos
PPGAD	Programa de Pós-Graduação em Agroenergia Digital
SARIMA	Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average
SCOPUS	Base de Dados Científicos da Elsevier
UFT	Universidade Federal do Tocantins
WOS	Web of Science
WEKA	Waikato Environment for Knowledge Analysis (plataforma de mineração de dados)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Problema de pesquisa.....	18
1.1.1 Hipótese	19
1.1.2 Delimitação do escopo	19
1.1.3 Justificativa	20
1.2 Objetivos	22
1.2.1 Objetivo geral	22
1.2.2 Objetivos específicos.....	22
2 METODOLOGIA	23
2.1 Objeto do estudo	25
2.1.1 Tendência e variabilidade de precipitação.....	25
2.1.2 Modelagem de precipitação com técnicas de aprendizado de máquina	27
2.1.3 Aplicação em Bacias de clima tropical e uso agrícola	29
2.1.4 Estudos que fundamentam a abordagem da dissertação	29
2.2 Caracterização do estudo.....	31
2.3 Critérios de seleção dos trabalhos analisados	36
2.3.1 Revisão sistemática da literatura.....	37
2.4 Análise qualitativa e quantitativa	46
2.5 Correspondência entre objetivos e procedimentos metodológicos.....	48
2.6 Fundamentação sobre alterações climáticas e modelagem preditiva	50
2.6.1 Estudos correlatos aplicados à modelagem preditiva hidroclimática.....	52
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
3.1 Processamento dos dados de precipitação e modelagem SARIMA.....	55
3.2 Processamento dos dados de precipitação e modelagem ARIMA	59
3.3 Validação dos Modelos.....	63
3.3.1 Modelo ARIMA (1,1,1)	64
3.3.2 Modelo ARIMA (0,1,1)	64
3.3.3 Modelo SARIMA (1,1,1)(1,1,1)12	65
3.3.4 Modelo SARIMA (0,1,1)(0,1,1)12	65
3.3.5 Modelo Holt-Winters	65
3.3.6 Síntese comparativa dos modelos	66
3.3.7 Análise do coeficiente de determinação (R^2) e capacidade preditiva dos modelos	74

3.3.8 Comparação sazonal e inferência preditiva – outubro e novembro.....	75
3.3.9 Análise comparativa e interpretação dos resultados	76
3.3.10 Justificativa para a escolha do modelo SARIMA em detrimento do Holt–Winters	77
3.4 Análise descritiva da precipitação hídrica	78
3.5 Aplicabilidade dos resultados às políticas públicas.....	84
4 PERSPECTIVAS FUTURAS.....	88
4.1 Aplicabilidade da modelagem preditiva na agroenergia digital: conexões com biocombustíveis, irrigação e zoneamento	91
5 CONCLUSÕES	95
REFERÊNCIAS.....	97

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial à vida, ao equilíbrio dos ecossistemas e ao desenvolvimento das atividades produtivas, especialmente a agricultura irrigada e a geração de energia (ARAÚJO *et al.*, 2025).

No Brasil, a gestão dos recursos hídricos ganhou destaque com a instituição da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), por meio da Lei nº 9.433/1997, que estabelece a água como bem de domínio público, dotado de valor econômico e gerido de forma descentralizada, participativa e integrada (BRASIL, 1997). Entretanto, a escassez hídrica em determinadas regiões, agravada pela intensificação das atividades humanas e pelas mudanças climáticas, exige a adoção de tecnologias que permitam antever cenários e mitigar impactos (ANA, 2020; BRASIL, 2024).

A modelagem preditiva da precipitação hídrica surge como uma estratégia fundamental nesse contexto, pois possibilita o monitoramento e a antecipação de eventos extremos, como secas e enchentes. A Bacia do Rio Formoso, localizada no sul do estado do Tocantins, destaca-se como uma área de grande relevância agroambiental, marcada por intensa atividade agrícola e demanda crescente por recursos hídricos (BARROS, 2023; CARVALHO *et al.*, 2022).

A expansão da agricultura irrigada, sobretudo das culturas de arroz e soja, tem comprometido a disponibilidade de água e contribuído para processos de degradação ambiental (GUARDA, 2020; BORGES *et al.*, 2022).

Diante da alta variabilidade climática do Cerrado, conforme destacam Anache (2017) e Nascimento *et al.* (2021), a adoção de métodos capazes de prever padrões pluviométricos se torna vital para a sustentabilidade da gestão hídrica. É nesse cenário que os algoritmos de séries temporais, como o modelo *Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average* (SARIMA) se mostram promissores, especialmente por sua capacidade de capturar padrões sazonais recorrentes nas séries de dados meteorológicos (FERRÃO, 2024; SALVIANO *et al.*, 2021). Estudos anteriores já demonstraram sua eficácia em regiões com características similares, como Santa Maria (FACCO *et al.*, 2020) e o semiárido nordestino (COSTA *et al.*, 2020).

Além do modelo estatístico SARIMA, outras abordagens baseadas em inteligência artificial, como as redes neurais LSTM, também têm se destacado na previsão de chuvas com alta acurácia (ANOCHI, 2015; LEITE *et al.*, 2021). No entanto, a escolha por modelos mais interpretáveis e adequados ao tipo de série analisada é

essencial para garantir robustez e aplicabilidade dos resultados. Para esta pesquisa, foram utilizados dados reais extraídos da plataforma Gestão de Alto Nível dos Recursos Hídricos (GAN), desenvolvida pela Universidade Federal do Tocantins (UFT), que coleta e disponibiliza informações ambientais da Bacia do Rio Formoso, como precipitação, vazão e nível dos rios.

Assim, este estudo tem por objetivo aplicar a modelagem preditiva da precipitação hídrica por meio do modelo *Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average* (SARIMA), utilizando rotinas computacionais desenvolvidas em Python, com apoio das bibliotecas Pandas, NumPy, Matplotlib e Statsmodels. A proposta envolve o processamento de dados históricos de precipitação coletados na Bacia do Rio Formoso (TO), com vistas a construir séries temporais consistentes e realizar previsões com base em padrões sazonais identificados.

Além da modelagem SARIMA, foi aplicada a modelagem *AutoRegressive Integrated Moving Average* (ARIMA) com o objetivo de realizar uma análise comparativa entre modelos com e sem componente sazonal, a partir dos dados históricos de precipitação da Bacia do Rio Formoso (TO). Para isso, foi desenvolvida uma rotina computacional em Python, utilizando as bibliotecas Pandas, NumPy, Matplotlib e Statsmodels, que possibilitou o tratamento, organização, visualização e modelagem da série temporal correspondente ao período de 2012 a 2017.

O processo iniciou-se com a leitura automatizada de arquivos no formato .xlsx, nos quais os valores faltantes ou inválidos foram substituídos por zero e convertidos para formato numérico. Em seguida, as somas mensais de precipitação foram agregadas em uma série temporal contínua de 72 observações mensais. Esta série foi utilizada para ajustar um modelo ARIMA com parâmetros (1,1,1), contemplando um termo autorregressivo, uma diferenciação de primeira ordem e um termo de média móvel.

Após o ajuste do modelo, foram geradas previsões para os 12 meses subsequentes, acompanhadas de intervalos de confiança, permitindo a análise da incerteza associada às estimativas. A série histórica e as projeções foram visualizadas graficamente, evidenciando o comportamento geral da precipitação mensal ao longo do tempo.

Embora o modelo ARIMA tenha se mostrado eficiente em captar tendências e variações gerais, seus resultados indicaram limitações na representação de padrões sazonais, característicos de regiões com clima tropical sazonal como o Tocantins.

Nesse sentido, sua aplicação contribuiu como modelo de referência, permitindo contrastar seu desempenho com o modelo SARIMA, que se demonstrou mais adequado para representar ciclos anuais de precipitação.

A adoção conjunta de ambos os modelos reforça a robustez da abordagem preditiva e amplia o potencial de uso dessas ferramentas para o planejamento estratégico da gestão hídrica, especialmente em regiões que enfrentam desafios crescentes relacionados à variabilidade climática, ao uso intensivo da água e à expansão agroenergética.

O foco do trabalho está em gerar subsídios científicos e operacionais que fortaleçam a gestão hídrica regional, articulando ciência de dados, sustentabilidade e inovação tecnológica, especialmente no contexto da agroenergia digital. Alinhado aos princípios da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Tocantins (GOVERNO DO TOCANTINS, 2020; CHIESA *et al.*, 2021; CBHTO, 2024), este estudo busca contribuir para uma governança mais eficiente, participativa e resiliente dos recursos hídricos, com impactos diretos na segurança hídrica e na produção agroenergética em regiões estratégicas do Brasil.

1.1 Problema de pesquisa

A gestão eficiente dos recursos hídricos em regiões de alta variabilidade climática, como o Cerrado tocantinense, depende da capacidade de antecipar eventos extremos por meio de previsões meteorológicas confiáveis. No entanto, observa-se uma lacuna na aplicação prática de modelos preditivos robustos que considerem as especificidades hidrológicas e climáticas da Bacia do Rio Formoso. Com destaque para os seguintes pontos (CARVALHO *et al.*, 2022; SILVA; GONÇALVES, 2024):

1. Como prever com precisão a precipitação hídrica na Bacia do Rio Formoso, considerando sua sazonalidade e variabilidade climática, utilizando algoritmos de séries temporais?
2. Em que medida a aplicação de modelos preditivos pode contribuir para a gestão sustentável dos recursos hídricos, mitigando os impactos de secas e enchentes na região?

1.1.1 Hipótese

As hipóteses de pesquisa formuladas para guiar este estudo são:

1. A **utilização de algoritmos preditivos baseados em séries temporais** como os modelos ARIMA e SARIMA, são eficazes na previsão da precipitação hídrica na Bacia do Rio Formoso (TO). Espera-se que o modelo ARIMA apresente bom desempenho na captação de tendências gerais, enquanto o modelo SARIMA se destaque pela capacidade de incorporar padrões sazonais e climáticos característicos da região, resultando em previsões mais precisas em cenários de variação cíclica (FERRÃO, 2024; SALVIANO *et al.*, 2021).
2. A **aplicação de modelos preditivos** contribui para a tomada de decisões mais eficazes na gestão hídrica da bacia, reduzindo os impactos de eventos climáticos extremos sobre o abastecimento de água e a produção agroenergética local (CÂMARA *et al.*, 2016; ZHOU *et al.*, 2021).

1.1.2 Delimitação do escopo

Este estudo concentra-se na **Bacia do Rio Formoso**, localizada no estado do Tocantins, uma região caracterizada por elevada variabilidade climática e crescente demanda por recursos hídricos, sobretudo em função da intensificação da agricultura irrigada. Com base em dados históricos de precipitação obtidos a partir da plataforma **GAN** (ARAÚJO *et al.*, 2025), o trabalho aplica os modelos estatísticos SARIMA e ARIMA, com o objetivo de prever o comportamento da precipitação no período de 2012 a 2016. O modelo **SARIMA** destaca-se por sua capacidade de captar padrões sazonais e tendências climáticas típicas da região (FERRÃO, 2024; SALVIANO *et al.*, 2021), enquanto o **ARIMA** é utilizado como modelo de comparação, por não considerar sazonalidade explicitamente.

A implementação e validação dos modelos foram realizadas por meio de rotinas computacionais desenvolvidas em Python, utilizando as bibliotecas Pandas, NumPy, Matplotlib e Statsmodels, e executadas na plataforma Google Colaboratory. Essa abordagem proporcionou um ambiente eficiente para o tratamento dos dados, ajuste dos modelos, geração de previsões e visualização gráfica dos resultados.

Importante destacar que este trabalho delimita-se exclusivamente à previsão da precipitação pluviométrica, não abrangendo outras variáveis hidrológicas, como vazão, qualidade da água ou umidade do solo. Essa delimitação reforça o foco e a profundidade metodológica da pesquisa, contribuindo para a construção de subsídios científicos aplicáveis à gestão hídrica local e à formulação de políticas públicas no contexto da agroenergia.

1.1.3 Justificativa

A transformação digital tem revolucionado o monitoramento ambiental e a gestão dos recursos hídricos, tornando-se um diferencial competitivo e socialmente relevante para instituições e territórios que investem em inovação. Estudos recentes demonstram a eficiência da integração entre dados de satélite, como os provenientes do Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) e do Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) e algoritmos de aprendizado de máquina na previsão de eventos hidrológicos extremos, especialmente em bacias com baixa densidade de monitoramento (IDOWU *et al.*, 2025).

O sensor MODIS permite o acompanhamento contínuo e multiespectral da superfície terrestre, sendo amplamente utilizado na análise da cobertura vegetal, da temperatura e da precipitação. Já o TRMM, fruto da cooperação entre NASA e JAXA, fornece dados de alta precisão sobre chuvas tropicais, um ativo estratégico para estudos climáticos e hidrológicos em regiões como o Tocantins.

As modelagens preditivas que combinam sensores de micro-ondas passivos, o Flood Warning Decision Support System (FwDET) e o Modelo Digital de Elevação MERIT (DEM MERIT) evidenciam a viabilidade de soluções tecnológicas alternativas e acessíveis para a gestão hídrica em regiões tropicais (IDOWU *et al.*, 2025). Complementarmente, Qian *et al.* (2023) destacam que o uso de redes neurais profundas e modelos híbridos vem ampliando a precisão das previsões hidrológicas, abrindo caminho para ferramentas públicas de apoio à tomada de decisão.

Nesse contexto, o presente estudo diferencia-se ao desenvolver mais uma ferramenta à disposição do público em geral, voltada à previsão da precipitação mensal na Bacia do Rio Formoso (TO). Baseada em modelos estatísticos de séries temporais (ARIMA e SARIMA), essa ferramenta não se limita ao campo acadêmico: ela foi projetada para funcionar de forma prática, dinâmica e participativa, podendo

ser alimentada continuamente com dados reais e ajustada conforme novas informações se tornem disponíveis. Assim, o modelo transforma-se em um instrumento vivo e funcional, acessível a pesquisadores, produtores rurais, gestores públicos e cidadãos interessados no monitoramento climático regional.

A modelagem foi implementada em ambiente Python, utilizando bibliotecas robustas (Pandas, NumPy, Matplotlib e Statsmodels) no Google Colaboratory, o que garante automação, reproduzibilidade e agilidade no tratamento de dados obtidos pela plataforma GAN. O modelo SARIMA, ao incorporar padrões sazonais, mostra-se especialmente eficaz para regiões com regime pluviométrico cíclico, como o Tocantins (FERRÃO, 2024; SALVIANO *et al.*, 2021). O ARIMA foi utilizado como comparação, possibilitando avaliar o desempenho em cenários sem sazonalidade explícita. Estudos de Pereira *et al.* (2024) e Liu *et al.* (2024) reforçam a eficácia desses modelos em previsões mesmo em contextos com dados limitados.

A previsão de chuvas é um elemento estratégico para a segurança hídrica, o planejamento agrícola e o desenvolvimento da agroenergia, especialmente em bacias de forte vocação produtiva, como a do Rio Formoso. Antecipar padrões de precipitação significa reduzir riscos, otimizar a irrigação e promover o uso racional da água, pilares essenciais para a sustentabilidade econômica e ambiental do Tocantins (ZHOU *et al.*, 2021; ANACHE, 2017).

Embora o estudo reconheça o avanço de tecnologias como redes neurais profundas e modelos híbridos, a escolha pelos modelos ARIMA e SARIMA reforça a clareza e a aplicabilidade dos resultados, com foco na implementação prática e no acesso público ao conhecimento científico. A proposta está alinhada às diretrizes da Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997) e do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Tocantins (GOVERNO DO TOCANTINS, 2020; ANA, 2020), oferecendo uma ferramenta inovadora, gratuita e funcional que transforma dados em inteligência aplicada ao território.

Em síntese, o trabalho consolida-se como uma solução tecnológica inclusiva e funcional, capaz de transformar dados científicos em benefícios concretos para a sociedade, fortalecendo o protagonismo do Tocantins como referência em agroenergia digital e gestão hídrica inteligente.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Aplicar modelos estatísticos preditivos baseados em séries temporais, especificamente os modelos ARIMA e SARIMA, utilizando dados históricos de precipitação hídrica da Bacia do Rio Formoso (TO), com o objetivo de identificar padrões sazonais e tendências climáticas. A proposta visa subsidiar a gestão dos recursos hídricos na região, contribuindo para uma tomada de decisão mais eficiente frente à variabilidade climática e aos riscos de eventos extremos, como secas e enchentes.

1.2.2 Objetivos específicos

- Coletar, tratar e organizar os dados históricos de precipitação disponíveis para a Bacia do Rio Formoso, a partir de plataformas como a GAN.
- Implementar e ajustar modelos estatísticos de séries temporais (ARIMA e SARIMA) por meio da linguagem Python, utilizando bibliotecas como Pandas, NumPy, Matplotlib e Statsmodels, no ambiente Google Colaboratory.
- Validar os modelos preditivos com base em dados reais de precipitação, analisando métricas de desempenho (RMSE e MAE) para avaliar sua precisão e aplicabilidade regional.
- Analisar o potencial das previsões na formulação de estratégias de gestão hídrica, propondo medidas que contribuam para a mitigação dos impactos de eventos hidrológicos extremos na região

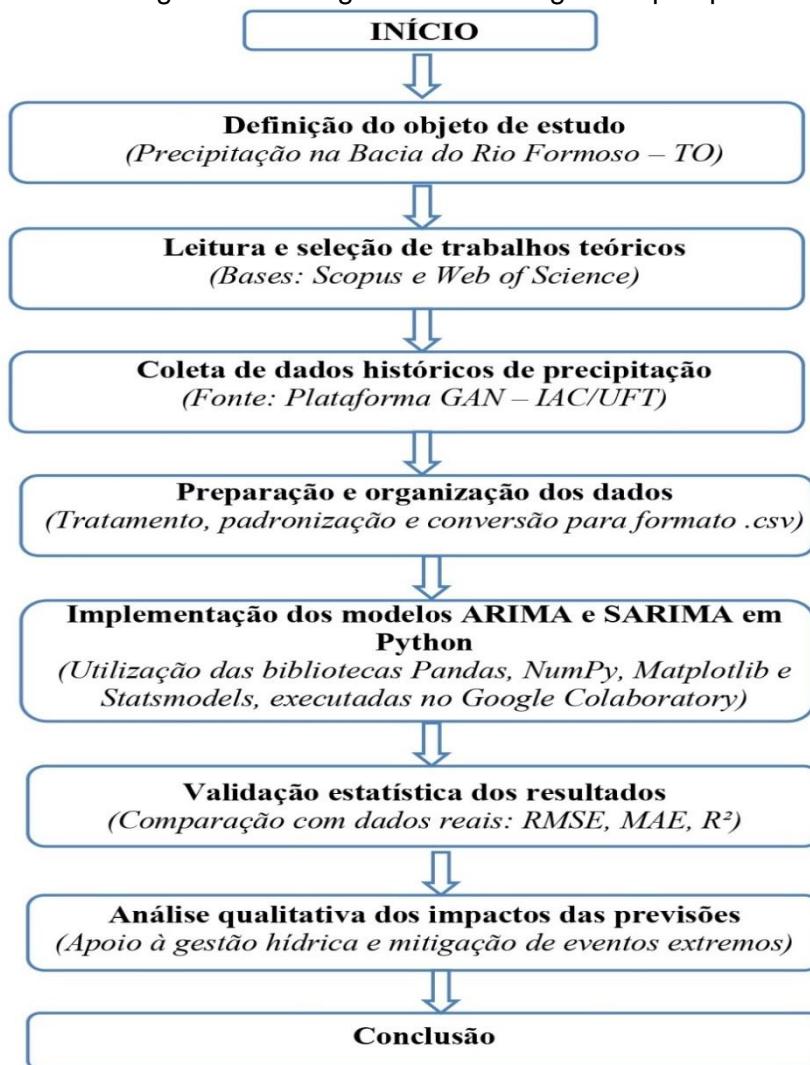
2 METODOLOGIA

Esta seção descreve os procedimentos metodológicos adotados para a realização da pesquisa, desde a definição do objeto de estudo até a seleção dos dados e implementação dos modelos preditivos.

A integração entre dados de precipitação, modelagem estatística, e inteligência artificial permite a construção de cenários hidrológicos futuros com maior precisão, fundamental para o planejamento do uso da água em sistemas de produção de biomassa e biocombustíveis.

A seguir, o fluxograma da metodologia aplicada na dissertação, com as principais etapas descritas de forma clara e lógica, facilitando a visualização do processo de pesquisa adotado no estudo:

Figura 1 - Fluxograma metodológico da pesquisa



Fonte: Elaboração própria (2025).

A Figura 1 apresenta o delineamento metodológico adotado nesta pesquisa, estruturado em etapas sequenciais que orientam o processo de previsão de precipitação na Bacia do Rio Formoso, localizada no estado do Tocantins. O fluxo metodológico proposto combina fundamentos teóricos e procedimentos computacionais, com foco na modelagem estatística de séries temporais.

O processo inicia-se com a definição do objeto de estudo, centrado na análise da variabilidade pluviométrica da região e na necessidade de aprimorar os mecanismos de gestão hídrica frente aos desafios da variabilidade climática e da expansão da agricultura irrigada.

Em seguida, realiza-se uma revisão bibliográfica sistemática com base em trabalhos disponíveis nas plataformas Scopus e Web of Science, com o objetivo de embasar a escolha dos modelos estatísticos e contextualizar a aplicação da modelagem preditiva em bacias hidrográficas com características similares.

A terceira etapa consiste na coleta dos dados históricos de precipitação, obtidos por meio da plataforma GAN (Gestão Ambiental e Novas Tecnologias), mantida pelo Instituto de Atenção às Cidades (IAC/UFT). Após a coleta, os dados passam por um processo de preparação e organização, com formatação e conversão para arquivos .csv, adequados à estrutura de entrada dos modelos desenvolvidos em Python.

Na sequência, ocorre a implementação dos modelos ARIMA e SARIMA, por meio de rotinas computacionais em Python, utilizando as bibliotecas Pandas, NumPy, Matplotlib e Statsmodels, com execução no ambiente Google Colaboratory. Essa etapa inclui o ajuste dos parâmetros dos modelos, a geração das previsões e a visualização gráfica dos resultados.

A etapa seguinte corresponde à validação estatística dos modelos preditivos, com base em métricas consolidadas como o *Root Mean Square Error* (RMSE), o *Mean Absolute Error* (MAE) e o coeficiente de determinação (R^2), a partir da comparação entre os valores previstos e os dados reais observados.

Por fim, realiza-se uma análise qualitativa dos impactos das previsões, considerando suas implicações para a gestão dos recursos hídricos, especialmente no que se refere à antecipação e mitigação de eventos extremos, como secas ou enchentes. Esse delineamento metodológico permite uma abordagem integrada, transparente e replicável, com potencial de aplicação em outras bacias hidrográficas

inseridas em contextos semelhantes de risco climático e pressão sobre os recursos hídricos.

2.1 Objeto do estudo

O objeto deste estudo é a precipitação hídrica na Bacia do Rio Formoso, localizada no sul do estado do Tocantins, uma região de elevada importância estratégica para a agricultura irrigada e para a sustentabilidade dos recursos hídricos. Inserida no bioma Cerrado, a bacia apresenta alta variabilidade climática e vem sendo submetida a uma crescente pressão pelo uso da água, em especial devido à expansão da produção agroenergética e do agronegócio (BARROS, 2023; BORGES *et al.*, 2022).

Neste contexto, a pesquisa concentra-se na modelagem preditiva da precipitação com o uso de modelos estatísticos de séries temporais, em especial o SARIMA e, de forma complementar, o ARIMA, com o objetivo de antecipar eventos pluviométricos e fornecer subsídios técnicos para o planejamento hídrico e agrícola da região. A modelagem foi implementada por meio de rotinas em Python, utilizando as bibliotecas Pandas, NumPy, Matplotlib e Statsmodels, com execução no ambiente Google Colaboratory. Os dados utilizados foram obtidos na plataforma GAN (Gestão de Alto Nível dos Recursos Hídricos), desenvolvida pela Universidade Federal do Tocantins (UFT).

A aplicação de modelos como ARIMA e SARIMA no contexto hidrológico tem sido amplamente reconhecida na literatura científica, especialmente em regiões tropicais onde há intensa atividade agrícola e escassez de dados em campo. Tais abordagens permitem identificar padrões climáticos, detectar anomalias e prever eventos extremos, contribuindo significativamente para políticas de segurança hídrica e para o uso racional da água na produção agroenergética (LIU *et al.*, 2024; ZHANG *et al.*, 2023; SANTOS *et al.*, 2024).

2.1.1 *Tendência e Variabilidade de Precipitação*

Estudos de longo prazo evidenciam a importância de analisar tendências e variações temporais e espaciais da precipitação, sobretudo em bacias hidrográficas

tropicais, onde a variabilidade climática é mais acentuada. Srivastava *et al.* (2021), por exemplo, investigaram 116 anos de dados pluviométricos na Bacia do Rio Kosi (Índia), identificando tendências decrescentes significativas por meio do teste de Mann-Kendall e do estimador de Sen. De forma complementar, Abebe *et al.* (2022) aplicaram a Transformada Discreta de Wavelet (DWT) associada a métodos estatísticos para detectar ciclos e periodicidades na Bacia do Nilo Azul. Tais metodologias ressaltam a relevância da análise estrutural das séries temporais como etapa essencial à modelagem adotada neste estudo.

No contexto da previsão de extremos hidrológicos, Almikaeel *et al.* (2022) utilizaram técnicas de aprendizado de máquina para prever secas hidrológicas no Rio Gidra, evidenciando o potencial de modelagens baseadas em séries temporais na detecção de padrões críticos de precipitação. Embora o presente estudo não utilize algoritmos de aprendizado de máquina, a adoção dos modelos estatísticos ARIMA e SARIMA em ambiente Python com bibliotecas especializadas (Pandas, NumPy, Matplotlib e Statsmodels) oferece uma alternativa eficaz, especialmente em regiões com dados pluviométricos históricos estruturados, como ocorre na Bacia do Rio Formoso.

Estudos recentes também ressaltam a necessidade de validação local de dados climáticos, dada a existência de discrepâncias entre diferentes fontes de dados de precipitação. Tian *et al.* (2021), ao analisarem a Bacia do Mekong, identificaram divergências significativas entre seis produtos de dados pluviométricos, o que reforça a importância de se considerar a qualidade e confiabilidade dos dados utilizados. Esse cuidado é igualmente necessário na Bacia do Rio Formoso, cujo monitoramento ainda apresenta limitações em densidade e abrangência, tornando indispensável a avaliação crítica da base de dados antes da aplicação de modelos preditivos.

Assim, compreender a estrutura estatística e o comportamento cíclico da precipitação é fundamental para a aplicação eficaz de modelos de previsão, como o SARIMA, que integra componentes sazonais à modelagem, e o ARIMA, que serve como referência para análises em séries não sazonais. Ambas as abordagens contribuem para o monitoramento hidrológico, previsão de anomalias e apoio à gestão dos recursos hídricos, especialmente em territórios tropicais sujeitos a eventos extremos e pressão agrícola crescente.

2.1.2 Modelagem de Precipitação com Técnicas de Aprendizado de Máquina

A literatura recente destaca o avanço das técnicas preditivas aplicadas à previsão hidrológica, sobretudo em bacias hidrográficas tropicais, onde a variabilidade climática e a pressão sobre os recursos hídricos exigem estratégias de monitoramento cada vez mais eficientes. Embora o presente estudo se concentre na aplicação de modelos estatísticos de séries temporais, como ARIMA e SARIMA, é fundamental reconhecer o papel de abordagens complementares, especialmente aquelas baseadas em técnicas de aprendizado de máquina.

Estudos como o de Badem *et al.* (2024) demonstram a eficácia da modelagem preditiva avançada para estimar a ocupação de barragens a partir de dados meteorológicos históricos, indicando o potencial dessas metodologias para a previsão de precipitação acumulada em curto e médio prazo. De forma semelhante, Santos *et al.* (2024) utilizaram o algoritmo Extreme Learning Machine (ELM) associado ao Sparrow Search Algorithm, alcançando resultados promissores na previsão de chuvas.

O crescimento da aplicação de redes neurais profundas em estudos hidrológicos também é amplamente reconhecido. Zhang *et al.* (2023) e Liu *et al.* (2022) demonstraram a eficácia de arquiteturas como *Long Short-Term Memory* (LSTM) combinadas com técnicas como a Transformada Wavelet, evidenciando alto desempenho preditivo em bacias com resposta rápida a eventos climáticos. Tais estratégias, apesar de sofisticadas, demandam estruturas computacionais robustas e grande volume de dados, nem sempre disponíveis em bacias brasileiras.

Além disso, pesquisas como a de Bogner *et al.* (2022) mostram o potencial de previsões terciárias para estender o horizonte de modelos hidrológicos, enquanto El Jarroudi *et al.* (2021) apontam a relevância de modelagens baseadas em condições climáticas extremas, inclusive para a previsão de impactos na agricultura.

A combinação entre modelos estatísticos clássicos e técnicas de inteligência artificial tem sido apontada como uma abordagem promissora em contextos hidrológicos complexos. Marcos Junior *et al.* (2024) aplicaram essa metodologia com sucesso na previsão de vazões em bacias brasileiras, reforçando o valor dos modelos híbridos para tomada de decisão em ambientes de alta complexidade hidrológica.

Ainda assim, o presente estudo opta por uma abordagem estatística tradicional, com uso exclusivo dos modelos ARIMA e SARIMA, devido à robustez,

interpretabilidade e adequação ao volume e à estrutura dos dados históricos disponíveis. Essa escolha metodológica é especialmente adequada ao contexto da Bacia do Rio Formoso, cuja densidade de monitoramento e disponibilidade de variáveis climáticas complementares ainda é limitada.

Por fim, mesmo em contextos mais controlados, como o da infraestrutura urbana, a previsão de chuvas intensas tem sido aplicada com sucesso. Tan *et al.* (2025) propuseram um modelo dinâmico para operação de ferrovias de alta velocidade, baseado em previsão de chuvas extremas, o que evidencia o caráter transversal das técnicas preditivas, inclusive para a gestão hídrica em bacias com alta variabilidade pluviométrica, como a analisada nesta dissertação.

Embora os modelos estatísticos ARIMA e SARIMA apresentem robustez e interpretabilidade para séries temporais sazonais, a literatura recente destaca avanços significativos no uso de técnicas de Inteligência Artificial (IA) e Aprendizado de Máquina (*Machine Learning* – ML). Abordagens como as Redes Neurais Artificiais, em especial as arquiteturas do tipo *Long Short-Term Memory* (LSTM), demonstraram elevado desempenho na previsão de eventos pluviométricos extremos, por sua capacidade de capturar dependências de longo prazo em séries complexas (ANOCHI, 2015; LEITE *et al.*, 2021). Além das LSTM, outras metodologias como Redes Convolucionais (CNN) e modelos baseados em Transformers vêm sendo aplicadas com resultados promissores em cenários de alta variabilidade climática (ZHOU *et al.*, 2022; WU *et al.*, 2023). Ainda, modelos híbridos que integram algoritmos estatísticos e redes neurais, como discutido por Marcos Junior *et al.* (2024), ampliam a precisão e a resiliência das previsões. Tais alternativas, embora não exploradas nesta dissertação, representam caminhos importantes para pesquisas futuras, especialmente quando integradas a dados multivariados e de sensoriamento remoto.

Embora este trabalho tenha delimitado sua abordagem aos modelos estatísticos tradicionais (ARIMA e SARIMA), é importante destacar que o estado da arte em modelagem hidroclimática tem avançado para técnicas mais sofisticadas de Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina (IA/ML). Modelos como as Redes Neurais Recorrentes (RNN), em especial as arquiteturas Long Short-Term Memory (LSTM), Redes Convolucionais (CNN) e até mesmo os mais recentes Transformers têm demonstrado elevada acurácia na previsão de chuvas e vazões em regiões tropicais (LEITE *et al.*, 2021; ZHOU *et al.*, 2022; WU *et al.*, 2023). Além disso, abordagens híbridas que integram métodos estatísticos e algoritmos de aprendizado

profundo vêm sendo aplicadas com sucesso em bacias brasileiras, ampliando a resiliência das previsões (MARCOS JUNIOR *et al.*, 2024).

Assim, recomenda-se que pesquisas futuras incorporem essas metodologias, especialmente quando houver disponibilidade de séries mais longas e variáveis complementares, como dados de satélite (MODIS, TRMM, ERA5) e indicadores climáticos globais (ENSO, NAO), ampliando a robustez dos resultados no contexto da agroenergia digital.

2.1.3 Aplicação em Bacias de Clima Tropical e Uso Agrícola

Em regiões tropicais, como o Região composta pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (MATOPIBA), estudos têm validado o uso de modelos probabilísticos e dados geoespaciais para manejo da água na agricultura. Castro *et al.* (2023) aplicaram modelagem da precipitação em diferentes escalas temporais no estado do Paraná, e Nunes *et al.* (2022) utilizaram sensoriamento remoto para construir curvas de permanência de vazões na região do MATOPIBA, demonstrando a importância de dados contínuos e georreferenciados na previsão hidrológica e gestão integrada de recursos hídricos.

Complementarmente, o estudo de Costa *et al.* (2023) demonstrou a eficácia do modelo SARIMA para previsão de vazão média na sub-bacia do Rio Paranaíba, em contexto climático e hidrográfico semelhante ao da região do MATOPIBA, o que valida o uso de modelos sazonais em regiões de agricultura intensiva e alta dependência hídrica.

2.1.4 Estudos que Fundamentam a Abordagem da Dissertação

A análise de séries temporais para previsão de precipitação tem sido amplamente discutida na literatura científica recente, com destaque para metodologias que combinam estatística, ciência de dados e computação em nuvem.

Segundo Mukherjee *et al.* (2024), em estudo realizado no sul da Ásia, evidenciaram que a análise de padrões históricos de precipitação é essencial para prever comportamentos futuros, especialmente em contextos tropicais. Complementarmente, Liu *et al.* (2024), ao investigar a Bacia do Rio Yangtzé,

reforçaram a importância de modelos não estacionários e da inclusão de covariáveis climáticas, como *El Niño Southern Oscillation* (ENSO) e *North Atlantic Oscillation* (NAO), que poderão ser incorporadas em trabalhos futuros na mesma linha de pesquisa.

Na América do Sul, Chen *et al.* (2022) propuseram a utilização de janelas móveis para a detecção de secas severas, técnica que se mostrou relevante para diagnósticos de criticidade hidrológica. Thapa *et al.* (2023), analisando a Bacia do Rio Colorado, validaram o uso de modelos estatísticos aplicados a séries históricas de precipitação, com potencial de replicação em bacias tropicais e agrícolas.

Conforme Giampaolo *et al.* (2022) destacam que a integração de dados ambientais com algoritmos preditivos pode otimizar o monitoramento de aquíferos, com possibilidade de adaptação para monitorar precipitação e disponibilidade hídrica em tempo quase real, fortalecendo os sistemas de alerta e apoio à decisão.

No contexto brasileiro, Marcuzzo e Romero (2013) identificaram a influência de fenômenos climáticos de larga escala, como El Niño e La Niña, sobre os regimes pluviométricos do Cerrado, ao analisarem a precipitação máxima diária no estado de Goiás. Essa constatação reforça a necessidade de considerar variáveis climáticas globais em modelos de previsão.

A relação entre mudanças climáticas e impactos ambientais também foi explorada por Marques *et al.* (2021), que modelaram a distribuição geográfica de vetores de doenças sob cenários de aquecimento global. Embora o foco fosse epidemiológico, a abordagem metodológica, baseada em modelagem preditiva e variáveis ambientais, apresenta aplicabilidade direta para estudos hidrológicos.

Mais recentemente, Tan *et al.* (2025) demonstraram a eficácia de modelos de aprendizado de máquina para previsão de eventos hidrológicos extremos, salientando a importância da adaptabilidade dos algoritmos às condições locais.

Essas contribuições fundamentam a escolha metodológica desta pesquisa, que adota a linguagem Python associada a bibliotecas específicas, como Pandas, NumPy, Matplotlib e Statsmodels, no ambiente Google Colaboratory. Para a modelagem, empregou-se o SARIMA, voltado à análise de padrões sazonais, enquanto o ARIMA foi utilizado como abordagem complementar. A avaliação da performance dos modelos foi realizada por meio das métricas MAE (Mean Absolute Error), RMSE (Root Mean Square Error) e R² (Coeficiente de Determinação), além da aplicação de

intervalos de confiança de 95% (IC 95%), assegurando maior robustez na previsão da precipitação mensal a partir de dados históricos.

2.2 Caracterização do estudo

Esta pesquisa possui natureza quantitativa, aplicada e exploratória, com abordagem orientada à análise de dados ambientais voltados à gestão de recursos hídricos em regiões de uso agrícola intensivo. O foco do estudo está na aplicação de modelagem preditiva da precipitação hídrica por meio de séries temporais, a fim de fornecer subsídios científicos e operacionais para a gestão eficiente da água na Bacia do Rio Formoso, localizada no estado do Tocantins.

Os dados utilizados são secundários e reais, extraídos da plataforma Gestão de Alto Nível dos Recursos Hídricos (GAN), vinculada ao Instituto de Atenção às Cidades da Universidade Federal do Tocantins (IAC-UFT). Essa plataforma disponibiliza séries históricas com registros de precipitação, vazão e nível dos rios da bacia, permitindo análises consistentes e contextualizadas. O recorte temporal da pesquisa compreende histórico jan/2012–dez/2016; previsão para 12 meses subsequentes (2017), o qual oferece uma série suficientemente longa para a identificação de padrões sazonais e tendências de comportamento hidrológico.

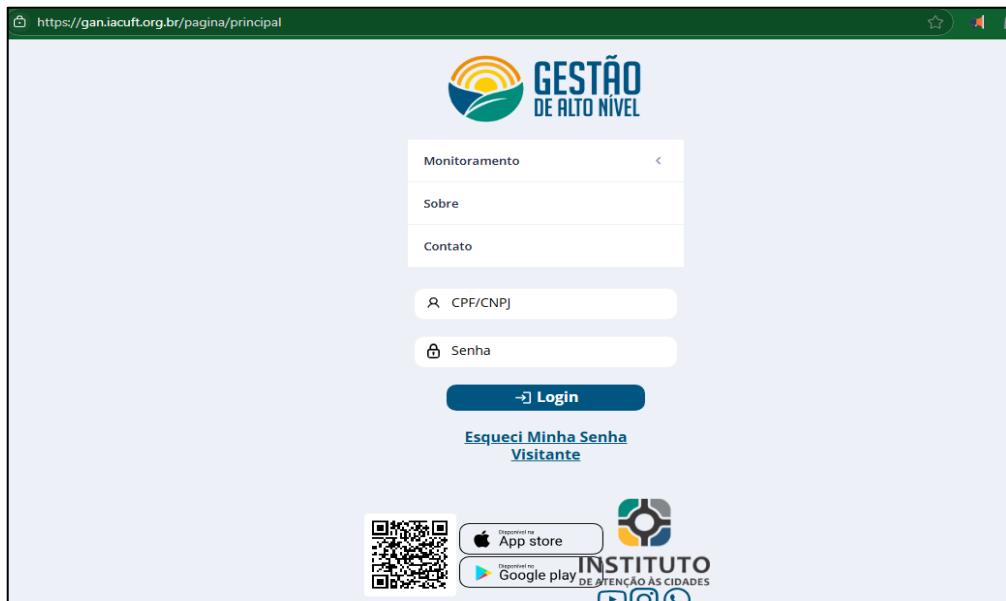
Estudos internacionais reforçam a relevância da utilização de modelos baseados em séries temporais e aprendizado de máquina para prever variáveis hidrológicas e orientar decisões em recursos hídricos. Hajar (2023) analisou diferentes abordagens para o cálculo do Índice Padronizado de Precipitação na Bacia do Rio Yarmouk, Jordânia, evidenciando a variabilidade de períodos secos e úmidos. Hosseinzadeh *et al.* (2023) aplicaram algoritmos de aprendizado de máquina na previsão de vazão na Bacia do Alto Rio Colorado, utilizando dados climáticos em séries temporais. Já Hussain *et al.* (2022) utilizaram métodos inovadores de análise de tendência para dados de precipitação na Bacia do Rio Soan, no Paquistão. Na China, Li *et al.* (2024) realizaram uma avaliação abrangente de cinco produtos de precipitação por satélite quase em tempo real, com base em séries temporais e eventos extremos na Bacia do Baixo Yangtze.

Além disso, estudos recentes como os de Sharma, Ghimire e Siddique (2023) e Sherly e Veerasha (2025) demonstram a eficácia da integração entre modelos matemáticos e aprendizado de máquina para o pós-processamento de previsões

hidrológicas e análise do ciclo hidrológico. A utilização de operadores fracionários e métodos computacionais híbridos tem ampliado a capacidade de captura da complexidade dos processos hidrológicos. Sintayehu *et al.* (2022) também destacam a importância de abordagens como a transformada *wavelet* para identificar tendências de longo prazo em vazões e precipitações, como demonstrado na bacia do Alto Rio Nilo Azul.

Tais estudos comprovam a pertinência e atualidade do uso da modelagem preditiva baseada em séries temporais no contexto de bacias hidrográficas tropicais, como a do Rio Formoso, sobretudo frente aos desafios impostos pela variabilidade climática e pela intensificação da atividade agropecuária.

Figura 2 - Plataforma GAN



Fonte: Plataforma GAN (2025)

A Figura 2 apresenta a interface principal da plataforma digital do sistema GAN, acessível por meio do endereço eletrônico <<https://gan.iacuft.org.br/pagina/principal>>. Trata-se de um ambiente virtual desenvolvido pelo Instituto de Atenção às Cidades da Universidade Federal do Tocantins (IAC-UFT), com o propósito de integrar e facilitar o monitoramento das intervenções nos recursos hídricos em bacias hidrográficas.

Na tela de login, os usuários cadastrados podem acessar o sistema informando CPF ou CNPJ e senha. O ambiente conta ainda com seções específicas para Monitoramento, Sobre e Contato, além da possibilidade de recuperação de senha e acesso como visitante. Também são disponibilizados ícones para download do

aplicativo GAN nas plataformas *App Store* e *Google Play*, ampliando o acesso via dispositivos móveis.

O QR Code visível no canto inferior esquerdo permite o acesso direto à aplicação, reforçando o uso de tecnologias móveis para facilitar a consulta e o gerenciamento em campo, especialmente no que se refere ao monitoramento de equipamentos como bombas e sensores por meio desta tecnologia.

Conforme informações do Portfólio de Softwares do NIT – Núcleo de Inovação Tecnológica da UFT, a interface representa um dos componentes da infraestrutura digital do GAN, que visa promover a transparência na gestão hídrica, fortalecer os processos de fiscalização e facilitar o acesso às informações hidroambientais por órgãos gestores, proprietários e pela sociedade em geral.

Figura 3 - Estações cadastradas no GAN

Estações cadastradas						
Nome ↑↓	Código ↑↓	Sub-bacia ↑↓	Tipo estação ↑↓	Tipo leitura ↑↓	Responsável ↑↓	Operadora ↑↓
formo		Todas as Sub-bacias	Todos os tipos	Todos	Todos	Todas as operadoras
FORMOSO DO ARAGUAIA	01149001	Rio Formoso	Pluviométrica	Convencional	ANA	CPRM
RIO FORMOSO LOROTI	26798100	Rio Formoso	Telemétrica	Automática	SEMARH-TO	SEMARH-TO
FOZ RIO FORMOSO	26799000	Rio Formoso	Telemétrica	Automática	SEMARH-TO	SEMARH-TO
JUSANTE PROJETO RIO FORMOSO	26751000	Rio Formoso	Telemétrica	Automática	SEMARH-TO	SEMARH-TO
PROJETO RIO FORMOSO	26750000	Rio Formoso	Fluviométrica	Convencional	ANA	ANA
RIO FORMOSO LOROTI	26798100	Rio Formoso	Fluviométrica	Convencional	SEMARH-TO	SEMARH-TO
FOZ RIO FORMOSO	26799000	Rio Formoso	Fluviométrica	Convencional	SEMARH-TO	SEMARH-TO
PROJETO RIO FORMOSO	26730000	Rio Formoso	Fluviométrica	Convencional	ANA	CPRM

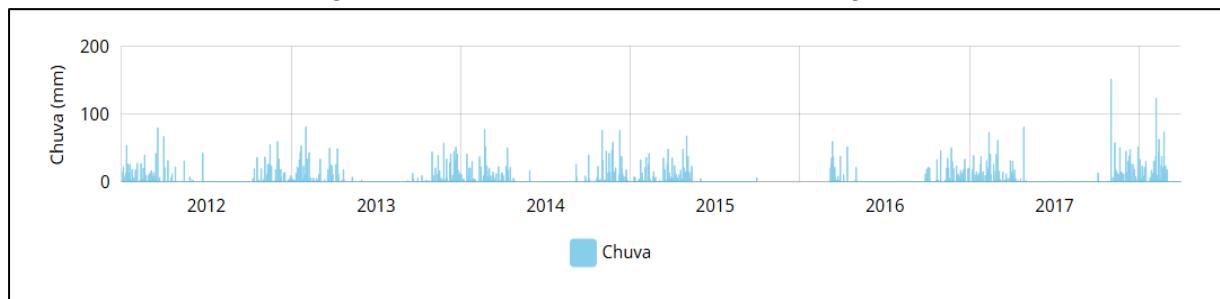
Fonte: Plataforma GAN (2025)

Conforme Figura 3, apresenta um módulo específico para o monitoramento da disponibilidade hídrica, no qual estão cadastradas diversas estações de medição distribuídas ao longo das bacias hidrográficas do estado, permite a busca detalhada por nome da estação, código, sub-bacia, tipo de estação (pluviométrica ou telemétrica), tipo de leitura (automática ou convencional), entidade responsável e operadora.

Cada registro disponibiliza dados essenciais para o gerenciamento hídrico, como o tipo de leitura (convencional ou automática), o que possibilita o acompanhamento em tempo real de variáveis como precipitação e vazão. A

sistematização dessas informações em ambiente digital permite maior eficiência na tomada de decisões por parte dos gestores públicos e contribui para a formulação de políticas de uso sustentável da água. Ademais, o sistema se integra a um mapa interativo, o que reforça a utilização de ferramentas de geoprocessamento no apoio à análise e à fiscalização ambiental.

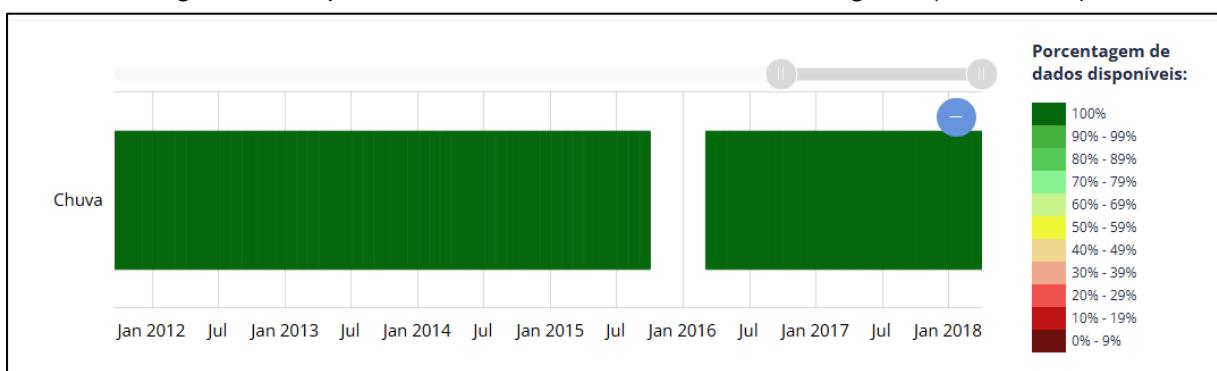
Figura 4 - Série Histórica Formoso do Araguaia



Fonte: Plataforma GAN (2025)

A Figura 4 apresenta a série histórica de precipitação registrada na estação Formoso do Araguaia, localizada na sub-bacia do Rio Formoso, com dados compreendidos entre os anos de 2011 e 2018. Observam-se variações significativas nos volumes diários de chuva, com picos que ultrapassam 150 mm, intercalados por períodos de baixa ou nenhuma precipitação. As informações são provenientes da plataforma GAN, e podem ser consultadas em diferentes escalas temporais (diária, semanal, mensal, anual ou personalizada), o que contribui para análises hidrológicas, modelagem preditiva e gestão dos recursos hídricos da região.

Figura 5 - Disponibilidade de dados - Formoso do Araguaia (2012-2018)

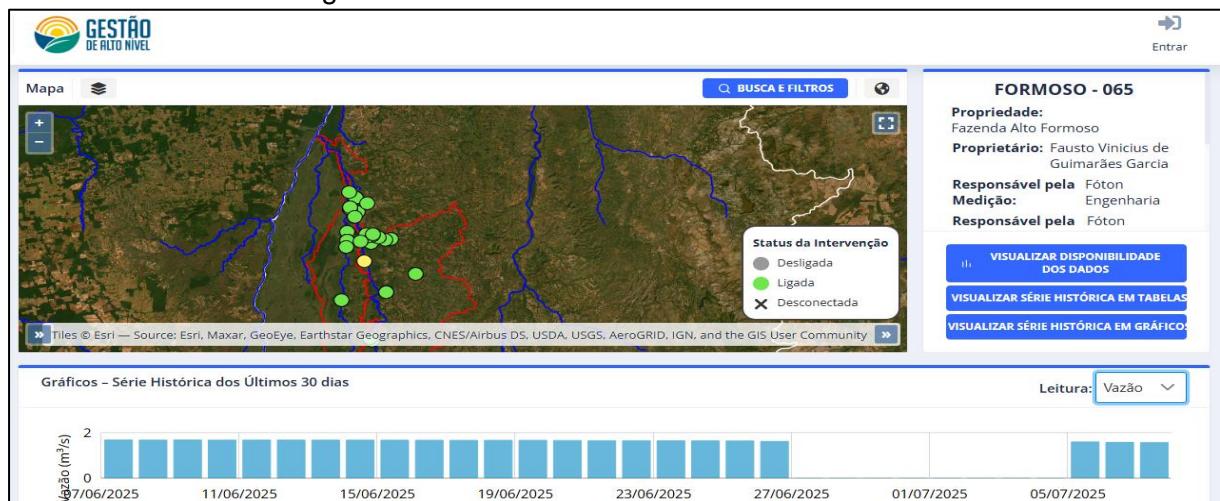


Fonte: Plataforma GAN (2025)

A Figura 5 apresenta a disponibilidade dos dados de precipitação da estação Formoso do Araguaia, com base nos registros da plataforma GAN, o gráfico cobre o período de janeiro de 2012 a janeiro de 2018 e utiliza uma escala de cores para indicar a porcentagem de dados disponíveis ao longo do tempo, conforme legenda à direita. A predominância da cor verde-escura (100%) indica que, na maior parte do intervalo analisado, os dados de chuva foram registrados de forma completa e contínua. Observa-se, no entanto, uma interrupção entre meados de 2015 e o início de 2016, evidenciando uma lacuna nos dados para esse período.

Essa visualização é fundamental para garantir a qualidade da base de dados utilizada em análises estatísticas e modelagem preditiva, como na aplicação de modelos SARIMA. A identificação de falhas ou descontinuidades permite aos pesquisadores adotarem critérios de consistência e imputação, assegurando a confiabilidade dos resultados obtidos a partir das séries temporais.

Figura 6 - Série Histórica Fazenda Alto Formoso



Fonte: Plataforma GAN (2025)

A Figura 6 apresenta a interface da plataforma GAN, aplicada ao ponto de intervenção FORMOSO – 065, localizado na propriedade Fazenda Alto Formoso. A visualização combina dados georreferenciados, informações técnicas e monitoramento em tempo real da vazão hídrica. O painel à direita exibe dados cadastrais da intervenção, incluindo o nome do proprietário, o responsável pela medição e o status operacional do sistema. O mapa interativo permite acompanhar diversas intervenções simultaneamente, com ícones sinalizando o estado atual de operação (ligada, desligada ou desconectada). Abaixo do mapa, o gráfico exibe a

série histórica dos últimos 30 dias de vazão (em m³/s), permitindo avaliar a estabilidade do fluxo hídrico captado pela propriedade.

Para a análise das séries temporais de precipitação, foi adotado o modelo SARIMA, amplamente utilizado em estudos hidrológicos por sua capacidade de capturar componentes sazonais e autocorrelações presentes em séries históricas meteorológicas (FERRÃO, 2024; SALVIANO *et al.*, 2021). O modelo SARIMA é adequado para dados não estacionários e recorrentes, sendo particularmente eficaz em contextos de variabilidade climática, como o Cerrado brasileiro (PEREIRA *et al.*, 2024).

A implementação e validação dos modelos ocorreram por meio da linguagem Python, utilizando bibliotecas específicas para análise e modelagem de séries temporais, como Pandas, NumPy, Matplotlib e Statsmodels, executadas no ambiente Google Colaboratory. Essa escolha se justifica pela capacidade dessas ferramentas de integrar a análise exploratória de dados com a execução de algoritmos estatísticos, como os modelos SARIMA e ARIMA, permitindo a avaliação de desempenho, reproduzibilidade e documentação completa do processo (LIU *et al.*, 2024; THAPA *et al.*, 2023).

Além da construção dos modelos preditivos, o estudo contempla uma análise da aplicabilidade prática das previsões geradas no contexto da gestão de recursos hídricos, considerando variáveis associadas à irrigação agrícola, à segurança hídrica e à mitigação de eventos climáticos extremos, como secas e enchentes. A utilização de métodos de previsão contribui para antecipar cenários críticos, subsidiar políticas públicas e apoiar a tomada de decisão estratégica em territórios com alta demanda por água e crescente vulnerabilidade hídrica (CHEN *et al.*, 2022; ZHOU *et al.*, 2021).

Dessa forma, o delineamento metodológico adotado nesta pesquisa articula ciência de dados, sustentabilidade e inovação tecnológica no contexto da agroenergia digital, em consonância com os princípios da Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997) e do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Tocantins (GOVERNO DO TOCANTINS, 2020).

2.3 Critérios de seleção dos trabalhos analisados

Embora o foco central do estudo esteja na análise de dados ambientais, foram consultados **trabalhos acadêmicos e técnicos** relevantes para embasar a aplicação

dos modelos preditivos e contextualizar a problemática hídrica da Bacia do Rio Formoso.

Os critérios utilizados para a seleção dos trabalhos foram:

- Pertinência ao tema de **modelagem preditiva de chuvas, gestão de recursos hídricos, séries temporais e agroenergia digital**;
- Publicações entre os anos de **2021 e 2025**, priorizando estudos atualizados;
- Trabalhos indexados em bases científicas como **SCOPUS e Web of Science, repositórios institucionais**, incluindo o da **Universidade Federal do Tocantins**;
- Inclusão de **teses, dissertações, artigos científicos e relatórios técnicos** com abordagem metodológica compatível com o objetivo da pesquisa;
- Relevância para o contexto **climático e hidrográfico do Cerrado e da região Norte do Brasil**, com ênfase em estudos aplicados à Bacia do Rio Formoso ou bacias similares.

Esses critérios visam assegurar a qualidade científica e a coerência teórico-metodológica da pesquisa, apoiando a escolha do modelo preditivo e a discussão dos resultados obtidos.

2.3.1 Revisão sistemática da literatura

A revisão sistemática foi conduzida com base no protocolo *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), que estrutura o processo em quatro etapas: **identificação, triagem, elegibilidade e inclusão**. Essa abordagem permite garantir transparência na seleção dos estudos e reprodutibilidade da estratégia científica adotada (MOHER *et al.*, 2009).

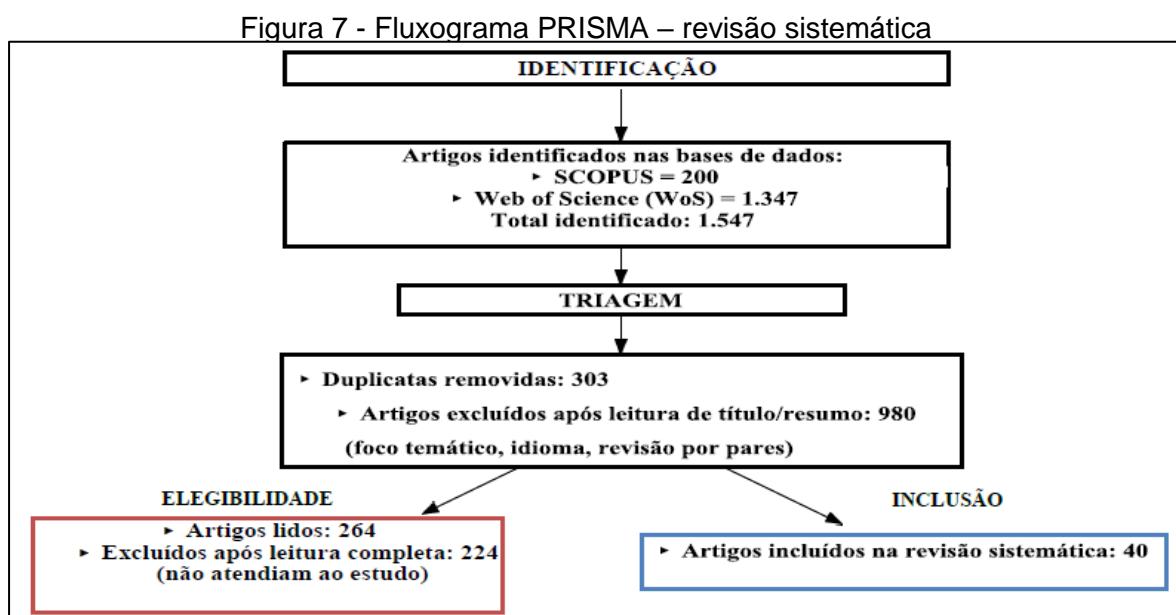
A etapa de **identificação** envolveu buscas nas bases SCOPUS e *Web of Science* (WoS), com os seguintes descritores: *Rainfall AND "predictive modeling"*, *Time series AND "precipitation" AND "river basin"*, *SARIMA AND "precipitation" AND "Brazil"*, *Water management AND "predictive algorithms"* e *Hydrological forecasting AND "machine learning"*. Foram recuperados 1.547 artigos no total (Scopus = 200; WoS = 1.347).

Na **triagem**, 1.283 artigos foram excluídos por duplicidade, ausência de revisão por pares ou inadequação temática.

Na etapa de **elegibilidade**, os títulos e resumos restantes ($n = 264$) foram lidos integralmente, sendo aplicados os seguintes **critérios de exclusão**:

- Estudos que não utilizavam modelos preditivos quantitativos;
- Pesquisas com foco exclusivamente em qualidade da água ou escoamento superficial;
- Artigos fora do recorte geográfico (contextos urbanos ou extratropicais);
- Trabalhos que não apresentavam validação estatística do modelo.

Por fim, foram **incluídos 40 estudos** com aderência metodológica e temática à modelagem preditiva da precipitação hídrica, conforme detalhado nas Tabelas 2, 3 e 4. A Figura abaixo apresenta o fluxograma da revisão, adaptado do modelo PRISMA 2020.



Fonte: Elaboração própria (2025)

Foram coletos artigos e periódicos das bases de dados SCOPUS e a Web of Science (WoS) para obtenção de referenciais teóricos, com restrição documental para artigos e restrição temporal de 2021 a junho de 2025. A Tabela 01 apresenta o quantitativo dos resultados.

Tabela 1 – Busca inicial da literatura.

Base de dados	Resultados
SCOPUS	200
Web of Science (WoS)	1347

Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025)

As buscas foram planejadas com critérios restritivos aplicados desde o início, a fim de assegurar a qualidade, atualidade e relevância científica das publicações recuperadas. Os filtros adotados foram:

- Período de publicação: 2021 a 2025;
- Tipo de documento: artigos científicos revisados por pares;
- Idioma: português e inglês.

Tabela 2 - Resumo artigos selecionados bases de dados SCOPUS e WoS

Nº	Estratégia de Busca	Resultados Encontrados	percentual de 2% para cada tema	Artigos Selecionados
1	Rainfall AND "predictive modeling"	143	2,86	7
2	Time series AND "precipitation" AND "river basin"	843	16,86	16
3	SARIMA AND "precipitation" AND "Brazil"	10	0,2	3
4	Water management AND "predictive algorithms"	14	0,28	3
5	Hydrological forecasting AND "machine learning"	537	10,74	11
				30,94
				40

Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025)

A Tabela 2 apresenta um resumo dos artigos selecionados a partir de estratégias de busca aplicadas nas bases de dados SCOPUS e WoS, com o objetivo de identificar estudos relevantes relacionados à modelagem preditiva de precipitação e à gestão de recursos hídricos. Foram utilizadas cinco estratégias distintas de busca, combinando palavras-chave em inglês com operadores booleanos, a fim de refinar os resultados e garantir a pertinência temática dos estudos.

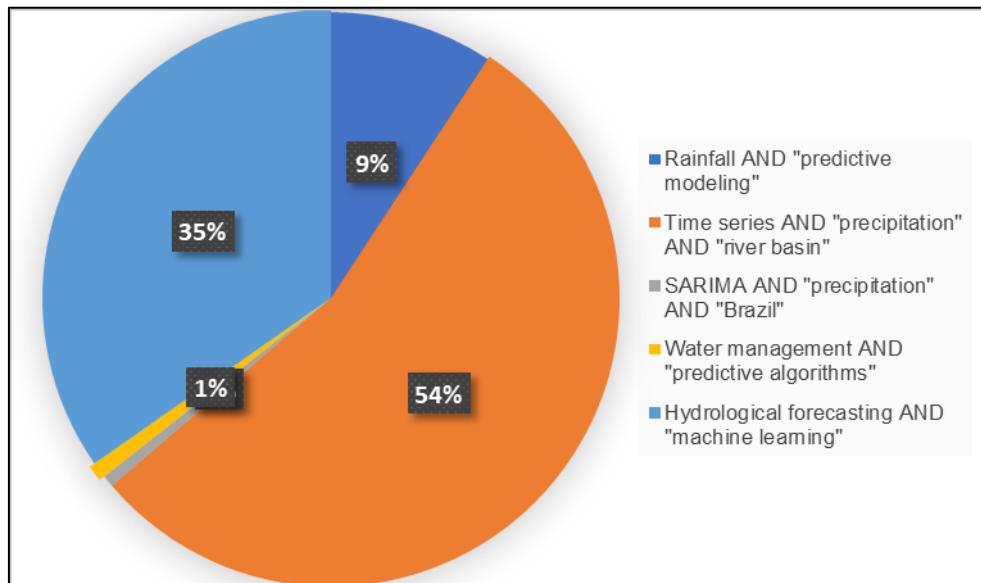
A estratégia com maior número de resultados foi “Time series AND ‘precipitation’ AND ‘river basin’”, totalizando 843 artigos encontrados, dos quais 16 foram selecionados por atenderem aos critérios de elegibilidade definidos no protocolo da pesquisa. Em seguida, destaca-se a combinação “Hydrological forecasting AND ‘machine learning’”, com 537 resultados e 11 artigos selecionados. Já a estratégia “Rainfall AND ‘predictive modeling’” resultou em 143 publicações, das quais 7 foram consideradas relevantes.

As estratégias “Water management AND ‘predictive algorithms’” e “SARIMA AND ‘precipitation’ AND ‘Brazil’” obtiveram menor número de resultados (14 e 10,

respectivamente), mas ainda assim contribuíram com a seleção de 3 artigos cada. A coluna "percentual de 2% para cada tema" indica o recorte utilizado como critério de triagem inicial, considerando apenas os 2% mais relevantes de cada resultado, totalizando, ao final, 40 artigos selecionados para compor a base de análise da pesquisa.

Esse levantamento inicial demonstrou a importância de estratégias de busca bem estruturadas para a recuperação eficiente de literatura científica em bases consolidadas, além de evidenciar o crescente interesse em técnicas de previsão hidrológica apoiadas por métodos estatísticos e de aprendizado de máquina.

Gráfico 1 - Resumo percentual resultados encontrados após inserção de restrições



Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025)

O Gráfico 1 ilustra a distribuição percentual dos resultados encontrados após a aplicação de restrições às estratégias de busca nas bases de dados SCOPUS e WoS, conforme descrito na Tabela 2. Essa visualização permite compreender a representatividade de cada combinação de termos no universo de publicações recuperadas, refletindo a aderência dos tópicos aos critérios temáticos definidos para a pesquisa.

Observa-se que a estratégia “Time series AND ‘precipitation’ AND ‘river basin’” representa a maior parcela dos resultados, correspondendo a 54% do total, o que evidencia o amplo interesse da comunidade científica na aplicação de séries

temporais na análise hidrológica em bacias hidrográficas. Em segundo lugar, destaca-se a busca “Hydrological forecasting AND ‘machine learning’”, que respondeu por 35% dos resultados, indicando a crescente adoção de técnicas de aprendizado de máquina em estudos de previsão hidrológica.

A combinação “Rainfall AND ‘predictive modeling’” apresentou 9% dos resultados, seguida por “Water management AND ‘predictive algorithms’” com 1%. A estratégia “SARIMA AND ‘precipitation’ AND ‘Brazil’” teve a menor representatividade, com menos de 1%, o que pode ser atribuído à especificidade da combinação de termos e à limitação geográfica imposta.

Este gráfico reforça a importância de delimitar cuidadosamente os termos de busca, uma vez que o uso de palavras-chave amplamente utilizadas, como “precipitation” e “river basin”, resulta em maior número de publicações, enquanto expressões mais específicas, como “SARIMA” e recortes geográficos, tendem a reduzir a abrangência, embora possam oferecer maior relevância ao contexto do estudo.

As estratégias de busca foram definidas com base em descritores específicos relacionados à temática do estudo, utilizando o operador booleano “AND” para cruzamento de termos e aspas para garantir a precisão de expressões compostas. Os termos aplicados nas buscas foram: *Rainfall AND "predictive modeling"*; *Time series AND "precipitation" AND "river basin"*; *SARIMA AND "precipitation" AND "Brazil"*; *Water management AND "predictive algorithms"*; *Hydrological forecasting AND "machine learning"*.

Durante o processo de triagem, foram excluídos documentos duplicados, irrelevantes ou sem relação direta com a proposta metodológica do estudo. Os artigos selecionados foram organizados conforme a estratégia de busca e avaliados quanto à aderência à modelagem preditiva da precipitação, uso de séries temporais, algoritmos de previsão e aplicação prática em bacias brasileiras ou contextos tropicais.

As Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados obtidos nas buscas sistemáticas realizadas nas bases de dados SCOPUS e WoS, com o objetivo de identificar publicações científicas relevantes à temática da modelagem preditiva da precipitação hídrica, com foco em bacias hidrográficas tropicais e no contexto da agroenergia digital.

Tabela 3 - Estratégias de busca nas bases de dados *Scopus*

Nº	ESTRATÉGIA DE BUSCA	RESULTADOS ENCONTRADOS
1	Rainfall AND "predictive modeling"	93
2	Time series AND "precipitation" AND "river basin"	95
3	SARIMA AND "precipitation" AND "Brazil"	8
4	Water management AND "predictive algorithms"	0
5	Hydrological forecasting AND "machine learning"	4
TOTAL		200

Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025).

Na base *SCOPUS*, observou-se uma concentração de resultados nas estratégias voltadas à modelagem preditiva da precipitação e à aplicação de séries temporais em bacias hidrográficas, com destaque para as combinações "Time series AND 'precipitation' AND 'river basin'" (95 resultados) e "Rainfall AND 'predictive modeling'" (93 resultados). A baixa incidência de publicações na estratégia "Water management AND 'predictive algorithms'" (0 resultados) indica que essa expressão pode ser mais genérica ou menos recorrente na literatura indexada nessa base no período analisado (2021–2025). Já a expressão envolvendo SARIMA (8 resultados) mostra a especificidade do modelo dentro do contexto brasileiro, o que reforça sua originalidade na aplicação proposta pela dissertação.

Tabela 4 - Estratégias de busca nas bases de dados *Web of Science*

Nº	ESTRATÉGIA DE BUSCA	RESULTADOS ENCONTRADOS
1	Rainfall AND "predictive modeling"	50
2	Time series AND "precipitation" AND "river basin"	748
3	SARIMA AND "precipitation" AND "Brazil"	2
4	Water management AND "predictive algorithms"	14
5	Hydrological forecasting AND "machine learning"	533
TOTAL		1347

Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025).

Na base *WoS*, conforme Tabela 4, o volume de resultados foi significativamente superior ao da *SCOPUS*, especialmente nas estratégias com enfoque em séries temporais e *machine learning*. A expressão *Time series AND 'precipitation' AND 'river basin'* retornou 748 artigos, evidenciando o interesse crescente da comunidade científica na aplicação de séries temporais à previsão de eventos hidrológicos. A combinação *Hydrological forecasting AND 'machine learning'* também apresentou

expressivo número de publicações (533 resultados), indicando a consolidação do uso de inteligência artificial nesse campo.

A estratégia *SARIMA AND 'precipitation' AND 'Brazil'*, apesar de apresentar apenas 2 publicações, é particularmente relevante, pois reforça a escassez de estudos que aplicam esse modelo estatístico de forma localizada no território brasileiro. Essa lacuna valida a proposta desta dissertação e indica um campo fértil para o desenvolvimento científico.

As buscas foram realizadas em ambas as bases, SCOPUS e WoS, por serem plataformas amplamente reconhecidas no meio científico, com cobertura significativa das áreas de Engenharia Ambiental, Hidrologia, Agricultura Digital e Climatologia.

Esses dados evidenciam o crescimento do interesse científico pelas temáticas de previsão hidrológica, algoritmos estatísticos e inteligência artificial aplicados à gestão hídrica, especialmente com foco em regiões tropicais. O elevado número de resultados nas estratégias com *time series* e *machine learning* destaca a robustez desses métodos. Por outro lado, o número reduzido de estudos com enfoque em SARIMA aplicado ao Brasil reforça a originalidade e a relevância da proposta desta dissertação no campo da agroenergia digital e da gestão sustentável dos recursos hídricos.

A literatura consultada demonstra avanços relevantes no campo da modelagem hidrológica e da previsão de precipitação, mas destaca um desafio recorrente: a operacionalização dessas ferramentas em contextos locais. Apesar do avanço tecnológico, a aplicação prática enfrenta barreiras socioinstitucionais, principalmente relacionadas à:

- Capacitação técnica limitada de gestores públicos e agricultores (BORGES *et al.*, 2022; CHIESA *et al.*, 2021). A falta de treinamento adequado dificulta a compreensão e a utilização das previsões para a tomada de decisão.
- Dependência de infraestrutura tecnológica e bases de dados confiáveis (BARROS, 2023; ANA, 2020). Regiões críticas como o Cerrado e o MATOPIBA ainda sofrem com monitoramento pluviométrico e hidrológico precário.
- Integração frágil entre ciência e políticas públicas. Mesmo com a existência de marcos regulatórios como a Política Nacional de Recursos

Hídricos (Lei nº 9.433/1997) e o PNRH (MDR, 2024), a implementação efetiva de modelos de previsão é desigual.

Esses fatores indicam que o sucesso da previsão não depende apenas do desempenho estatístico ou computacional, mas também da capacidade institucional e humana de absorver tais tecnologias.

Embora técnicas modernas como redes neurais (LSTM, ANN) e modelos híbridos baseados em machine learning sejam populares e amplamente aplicadas em diversos estudos internacionais (KUMAR *et al.*, 2023; LIU *et al.*, 2024; SHERLY; VEERESHA, 2025), observa-se que a aplicação de modelos estatísticos robustos como o SARIMA em bacias hidrográficas brasileiras permanece pouco explorada.

Estudos pioneiros (ALMEIDA *et al.*, 2011; LACERDA *et al.*, 2022; COSTA *et al.*, 2023) demonstraram o potencial do SARIMA para capturar a sazonalidade climática e os padrões de precipitação em escala local, mas ainda há uma lacuna quanto à sua validação sistemática em regiões estratégicas para a agroenergia, como o MATOPIBA e a Bacia do Rio Formoso.

No Quadro 1 observa-se um resumo de algumas propostas para aplicações em que o modelo **SARIMA** pode ser validada em diferentes dimensões da gestão hídrica.

Quadro 1 - Propostas de Validação do Modelo SARIMA e sua Aplicação em Estratégias de Gestão Hídrica

DIMENSÃO DE APLICAÇÃO	PROPOSTA DE USO DAS PREVISÕES (SARIMA)	CONTRIBUIÇÃO ESPERADA PARA A GESTÃO HÍDRICA	REFERÊNCIAS
Planejamento Agrícola	Utilizar previsões mensais/sazonais de precipitação para orientar o calendário agrícola e a escolha de culturas menos vulneráveis à seca.	Redução de perdas agrícolas e maior eficiência no uso da água em sistemas irrigados.	Carvalho <i>et al.</i> (2020); Raharimanana <i>et al.</i> (2023).
Gestão de Irrigação	Implementar sistemas de irrigação inteligente baseados em previsões climáticas, ajustando o volume de água conforme tendências projetadas pelo SARIMA.	Economia de recursos hídricos e aumento da produtividade agroenergética.	Anache (2017); Araújo <i>et al.</i> (2025).

DIMENSÃO DE APLICAÇÃO	PROPOSTA DE USO DAS PREVISÕES (SARIMA)	CONTRIBUIÇÃO ESPERADA PARA A GESTÃO HÍDRICA	REFERÊNCIAS
Controle de Eventos Extremos (Secas)	Antecipar cenários de estiagem prolongada por meio da análise das anomalias de precipitação previstas.	Permitir ações preventivas, como acionamento de políticas de racionamento e estocagem de água.	Almeida <i>et al.</i> (2011); Hajar (2023); Souza <i>et al.</i> (2025).
Controle de Eventos Extremos (Enchentes)	Identificar períodos de chuvas intensas previstas pelo modelo, associando a dados de vazão.	Minimizar riscos de inundação, fortalecer planos de emergência e sistemas de alerta.	Zhou <i>et al.</i> (2022); Cavus <i>et al.</i> (2022); Idowu <i>et al.</i> (2025).
Governança Hídrica Regional	Fornecer previsões como subsídio técnico aos Comitês de Bacias (CBHTO) e órgãos gestores.	Suporte à formulação de políticas públicas de segurança hídrica e à implementação de instrumentos do PNRH e PERH-TO.	Borges <i>et al.</i> (2022); Chiesa <i>et al.</i> (2021); ANA (2020).
Agroenergia e Sustentabilidade	Validar o modelo em bacias estratégicas ligadas à produção agroenergética (ex.: cana, soja, milho).	Favorecer o uso racional da água no setor produtivo, alinhando-se às metas do ODS 6 e 13.	Lacerda <i>et al.</i> (2022); Liu <i>et al.</i> (2024); IPEA (2019).

Fonte: Elaboração própria (2025).

Conforme Quadro 1, o modelo SARIMA pode ser aplicado no planejamento agrícola e na gestão da irrigação, as previsões de precipitação possibilitam alinhar o calendário de cultivo, otimizar o uso da água e reduzir perdas produtivas (Carvalho *et al.*, 2020; Anache, 2017). Em relação aos eventos extremos, o modelo auxilia tanto na antecipação de secas prolongadas quanto na detecção de chuvas intensas e enchentes, permitindo ações preventivas de mitigação de riscos (Almeida *et al.*, 2011; Zhou *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2025).

Na dimensão institucional, o SARIMA se configura como um instrumento de apoio à governança hídrica regional, oferecendo subsídios técnicos aos comitês de bacia e políticas públicas de segurança hídrica (Borges *et al.*, 2022; ANA, 2020). Por fim, no contexto da agroenergia e sustentabilidade, a validação do modelo em bacias agrícolas estratégicas fortalece a gestão racional da água e contribui para o cumprimento de metas globais como os ODS 6 e 13 (Lacerda *et al.*, 2022; IPEA, 2019).

Assim, a literatura evidencia que a aplicação do modelo SARIMA não apenas reforça a capacidade de previsão hidrológica, como também amplia sua relevância prática ao subsidiar decisões estratégicas nos âmbitos agrícola, ambiental e

energético, especialmente em regiões de elevada importância para a agroenergia, como o Cerrado e o MATOPIBA.

Constata-se, entretanto, que apesar do avanço recente em técnicas de Inteligência Artificial, aprendizado de máquina (IA/ML) e sensoriamento remoto, ainda há uma lacuna significativa de pesquisas aplicadas especificamente ao Cerrado Tocantinense, sobretudo com base em dados locais provenientes de sistemas de monitoramento como o GAN.

2.4 Análise qualitativa e quantitativa

A abordagem metodológica adotada neste estudo combina análise quantitativa com elementos de análise qualitativa, de forma complementar e integrada.

A análise quantitativa constitui o núcleo da pesquisa e está direcionada à coleta, organização, modelagem e interpretação de dados históricos de precipitação hídrica da Bacia do Rio Formoso. Esses dados, obtidos a partir da plataforma GAN, serviram como base para a aplicação dos modelos SARIMA e ARIMA, algoritmos estatísticos de séries temporais capazes de capturar padrões sazonais e tendências não sazonais.

A implementação e validação dos modelos foram realizadas por meio da linguagem Python, utilizando bibliotecas especializadas, como Pandas, NumPy, Matplotlib e Statsmodels, no ambiente Google Colaboratory. A avaliação do desempenho preditivo considerou métricas estatísticas amplamente utilizadas, como o erro quadrático médio (Root Mean Squared Error – RMSE), o erro absoluto médio (Mean Absolute Error – MAE) e o coeficiente de determinação (R^2), permitindo mensurar a acurácia e a robustez dos resultados.

A análise qualitativa, por sua vez, está voltada à interpretação dos resultados preditivos à luz da realidade da gestão hídrica na bacia, contemplando os impactos sociais, ambientais e econômicos das variações pluviométricas. Esse exame é enriquecido pela revisão de políticas públicas, como a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e o Plano Estadual de Recursos Hídricos do Tocantins (PERH/TO), além de estudos de caso e literatura científica, visando contextualizar a aplicabilidade prática dos modelos e identificar possíveis contribuições ao planejamento e à gestão sustentável dos recursos hídricos, especialmente no setor agroenergético.

A combinação dessas duas abordagens permite uma compreensão abrangente do fenômeno estudado, articulando rigor estatístico com interpretação contextual, o que é essencial para subsidiar decisões técnicas e políticas no âmbito da agroenergia digital e da gestão integrada de recursos hídricos.

A literatura revisada mostra diferentes estratégias metodológicas voltadas à previsão de eventos hidrológicos extremos, como secas prolongadas e enchentes repentinas:

- Índices Hidroclimáticos: Uso do SPI (Standardized Precipitation Index) para caracterizar períodos secos e úmidos (HAJAR, 2023). Propostas recentes como o NIFT Index (NETO; SANTOS, 2024) buscam quantificar a exposição à seca meteorológica.
- Modelos Probabilísticos: Aplicação de distribuições estatísticas e simulações probabilísticas para quantificar incertezas em diferentes escalas temporais (CORREIA *et al.*, 2025).
- Modelos de Séries Temporais: Abordagens como SARIMA e análises baseadas em wavelets (SINTAYEHU *et al.*, 2022) ajudam a identificar padrões cíclicos associados a extremos. Estudos sobre tendências de longo prazo (SRIVASTAVA *et al.*, 2021; SALVIANO *et al.*, 2021) reforçam a relação entre mudanças climáticas e frequência de eventos extremos.
- Machine Learning e Modelos Híbridos: Técnicas de Random Forest, LSTM e Extreme Learning Machine aplicadas à previsão de secas e enchentes (ALMIKAEEL *et al.*, 2022; FENG *et al.*, 2022; KUMAR *et al.*, 2023). Combinações entre modelos hidrológicos conceituais e algoritmos de ML para previsão probabilística de enchentes de curto prazo (ZHOU *et al.*, 2022).
- Sensoriamento Remoto e Dados de Reanálise: Produtos como o ERA5 permitem a validação e extração de dados de precipitação em regiões pouco monitoradas (CARDOSO *et al.*, 2024; IDOWU *et al.*, 2025). Monitoramento por satélite amplia a capacidade de prever eventos extremos em bacias críticas.

A revisão de literatura confirma que, embora haja avanços notáveis na previsão hidrológica com machine learning e modelos híbridos, o SARIMA permanece subutilizado em contextos estratégicos brasileiros, especialmente para a gestão

hídrica na agroenergia. Além disso, a literatura evidencia que eventos extremos ainda apresentam alta incerteza preditiva, seja pela escassez de dados confiáveis ou pela dificuldade de integração entre diferentes metodologias.

2.5 Correspondência entre objetivos e procedimentos metodológicos

Os procedimentos metodológicos adotados ao longo deste estudo foram planejados de forma a atender diretamente aos objetivos propostos, conforme descrito abaixo:

Quadro 2 - Etapas metodológicas para previsão de precipitação e gestão de recursos hídricos na bacia do Rio Formoso

OBJETIVO	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO CORRESPONDENTE
<ul style="list-style-type: none"> • Coletar e organizar dados históricos de precipitação hídrica e variáveis climáticas relevantes para a análise preditiva. • Implementar modelos preditivos baseados em séries temporais e aprendizado de máquina para a previsão de chuvas. • Validar os modelos preditivos utilizando dados reais de precipitação da Bacia do Rio Formoso, verificando sua precisão e adaptabilidade. • Analisar o impacto das previsões no contexto da gestão de recursos hídricos, propondo melhorias para mitigação de secas e enchentes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Coleta de dados pluviométricos da Bacia do Rio Formoso por meio da plataforma GAN (IAC-UFT); organização, tratamento e padronização dos dados em formato .csv para posterior análise no ambiente Google Colaboratory. • Aplicação dos modelos SARIMA e ARIMA na linguagem Python, utilizando bibliotecas especializadas (Pandas, NumPy, Matplotlib e Statsmodels), incluindo parametrização, treinamento e execução dos algoritmos com base nas séries históricas. • Avaliação estatística dos resultados preditivos com base em métricas como RMSE, MAE e R², comparação com dados observados para análise de desempenho. • Interpretação dos resultados à luz dos planos de recursos hídricos (PNRH e PERH/TO), articulação com dados sobre irrigação e uso da água na região (BARROS, 2023; BORGES <i>et al.</i>, 2022), identificação de estratégias de gestão sustentáveis.

Fonte: Elaboração própria (2025).

O Quadro 2 sintetiza as etapas metodológicas desenvolvidas nesta pesquisa, com foco na previsão de precipitação e na análise da gestão de recursos hídricos na Bacia do Rio Formoso.

A primeira etapa consistiu na coleta de dados históricos de precipitação e variáveis climáticas relevantes, obtidos por meio da plataforma GAN (IAC-UFT), seguidos da organização, tratamento e preparação dos arquivos em formato .csv para posterior análise computacional no ambiente Google Colaboratory.

A segunda etapa envolveu a implementação de modelos de séries temporais, com a aplicação dos modelos SARIMA e ARIMA na linguagem Python, utilizando bibliotecas especializadas (Pandas, NumPy, Matplotlib e Statsmodels), mediante parametrização, treinamento e execução com base em séries históricas.

Na terceira etapa, realizou-se a validação dos modelos preditivos por meio de métricas estatísticas como o Erro Quadrático Médio (Root Mean Squared Error – RMSE), o Erro Absoluto Médio (Mean Absolute Error – MAE) e o Coeficiente de Determinação (R^2), comparando-se os valores previstos com os observados a fim de verificar a acurácia e robustez das previsões.

Por fim, os resultados foram analisados à luz dos instrumentos de planejamento hídrico, como a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e o Plano Estadual de Recursos Hídricos do Tocantins (PERH/TO), bem como de estudos regionais (BARROS, 2023; BORGES *et al.*, 2022), com vistas à proposição de estratégias sustentáveis para mitigação de eventos hidrológicos extremos, como secas e enchentes.

Quadro 3 - Procedimentos Metodológicos x Modelos/Parâmetros Utilizados (pontos positivos e melhorias)

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	MODELOS / PARÂMETROS UTILIZADOS
<p>Coleta de dados junto à ANA (2020) e CBHTO (2024); organização e padronização em planilhas; verificação de consistência e remoção de outliers.</p> <p>Análise estatística descritiva (médias, desvios, variâncias); decomposição de séries temporais; análise gráfica de sazonalidade.</p> <p>Aplicação dos modelos ARIMA e SARIMA; análise dos correlogramas (ACF e PACF) para definição de parâmetros.</p>	<p>Coleta e Organização dos Dados: Base consolidada e confiável, com dados consistentes e limpos. Melhoria: incluir séries mais longas (antes de 2012) para reforçar robustez estatística.</p> <p>Análise Exploratória: Permitida identificação de padrões sazonais e anomalias. Melhoria: aplicar testes de estacionariedade adicionais (ADF/KPSS) para reforçar a consistência.</p> <p>Modelo: ARIMA (0,1,1): $MA(1) = -0,1477$; $\sigma^2 = 9687,63$. SARIMA (1,1,1)(0,1,1)12: AR(1) significativo; $MA(1)$ negativo; sazonalidade anual $m = 12$. Parametrização adequada com base em ACF/PACF. Melhoria: ampliar comparação com modelos de aprendizado de máquina para complementar análise.</p>

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	MODELOS / PARÂMETROS UTILIZADOS
<p>Avaliação pelos critérios de informação AIC e BIC; cálculo do RMSE, MAE e MAPE.</p> <p>Geração de previsões para 2016–2017; comparação entre valores estimados e observados; análise de erros.</p> <p>Discussão dos achados em comparação com estudos anteriores (ALMEIDA <i>et al.</i>, 2011; LACERDA <i>et al.</i>, 2022; COSTA <i>et al.</i>, 2023; ZHOU <i>et al.</i>, 2022).</p>	<p>Resultados: SARIMA apresentou melhor desempenho que ARIMA, sobretudo para capturar sazonalidade. Avaliação multi-métrica garante maior confiabilidade. Melhoria: incluir validação cruzada para reforçar capacidade de generalização.</p> <p>Modelo: SARIMA (0,1,1)(0,1,1)12 mostrou menor erro preditivo. Previsões coerentes com padrões sazonais históricos. Melhoria: testar cenários futuros (mudanças climáticas) para ampliar aplicabilidade.</p> <p>Discussão e Contribuições Resultados em consonância com literatura e avanço metodológico ao aplicar SARIMA em contexto hidrológico tropical. Melhoria: expandir discussão para interface com políticas públicas e sistemas de alerta precoce.</p>

Fonte: Elaboração própria (2025).

Essa correspondência evidencia a coerência interna do trabalho, demonstrando que os procedimentos adotados são tecnicamente consistentes, cientificamente fundamentados e contextualizados à realidade da gestão hídrica regional.

2.6 Fundamentação sobre alterações climáticas e modelagem preditiva

As alterações climáticas têm provocado mudanças significativas no regime hídrico de bacias hidrográficas, afetando tanto a disponibilidade de água quanto a ocorrência de eventos extremos, como secas e enchentes. Nesse contexto, a modelagem preditiva surge como ferramenta essencial para subsidiar a gestão sustentável dos recursos hídricos, especialmente em regiões tropicais com forte expansão agroenergética, como a Bacia do Rio Formoso (TO).

De acordo com Marques *et al.* (2017), variáveis climáticas como temperatura, pluviosidade e altitude influenciam diretamente a distribuição geográfica de espécies e vetores, sendo possível aplicar metodologias similares para a previsão da precipitação hídrica frente às alterações ambientais. O estudo utilizou o algoritmo MaxEnt para modelagem baseada em cenários climáticos previstos para 2050 e 2070, demonstrando a relevância da integração entre dados ambientais e ferramentas computacionais.

A utilização de dados de reanálise climática, como os disponibilizados pelo modelo ERA5, tem se mostrado eficiente em estudos hidrológicos no Brasil, conforme validado por Nascimento *et al.* (2023). Essa evidência sustenta a escolha metodológica desta pesquisa, que integra séries temporais com informações climáticas derivadas de sensoriamento remoto e bases globais.

Segundo Silva *et al.* (2022) também destacam a aplicação bem-sucedida de algoritmos de aprendizado de máquina, como o MaxEnt, para simulações de adequabilidade ambiental e projeções climáticas, reforçando a robustez da abordagem adotada neste estudo. Complementarmente, Liu *et al.* (2024) apontam, em uma análise cientométrica de 876 artigos publicados entre 2015 e 2022, que técnicas de machine learning e deep learning aplicadas à previsão hidrológica configuram-se como tendência consolidada. Palavras-chave como time series forecasting, rainfall prediction e hydrological modeling estão entre os termos mais relevantes, evidenciando o alinhamento desta pesquisa às práticas científicas atuais.

No campo da modelagem híbrida, Zhou *et al.* (2021) desenvolveram o modelo XAJ-MCQRNN, integrando um modelo hidrológico conceitual com redes neurais de regressão de *quantis*, para previsão probabilística de enchentes em curto prazo. A combinação de modelos físicos com técnicas de aprendizado de máquina mostrou-se eficaz para aumentar a confiabilidade das previsões e reduzir os efeitos de overfitting, especialmente em cenários de alta variabilidade climática, uma realidade que também afeta a Bacia do Rio Formoso.

No contexto nacional, Oliveira *et al.* (2025) validaram o uso de dados de sensoriamento remoto, via plataforma TerraClimate, para estimar vazões de referência Q90 e Q95 em bacias do MATOPIBA, obtendo elevada correlação ($R^2 > 0,70$) com dados fluviométricos convencionais. A associação desta metodologia com séries temporais e análises de tendência permite o monitoramento contínuo e em larga escala, especialmente em áreas com baixa densidade de estações hidrométricas, como algumas regiões do Tocantins.

Assim, a integração de séries temporais, dados de reanálise climática e algoritmos de aprendizado de máquina justifica-se não apenas pela consistência técnica, mas também pela capacidade de gerar informações estratégicas para a gestão dos recursos hídricos no contexto da agroenergia digital. Essa abordagem contribui diretamente para a resiliência dos sistemas produtivos e para a mitigação de impactos das mudanças climáticas sobre o regime hídrico regional.

2.6.1 Estudos Correlatos Aplicados à Modelagem Preditiva Hidroclimática

A utilização de modelos preditivos para estimar o regime de precipitação em bacias hidrográficas exige a adoção de abordagens estatísticas e computacionais robustas, baseadas em dados confiáveis e devidamente validados. Nesse sentido, diversos estudos têm reforçado a aplicabilidade de dados de reanálise climática, técnicas de regionalização pluviométrica e modelagem de séries temporais, além da incorporação de análises complementares sobre a dinâmica atmosférica e seus efeitos sobre a precipitação.

A confiabilidade dos dados de reanálise, como os fornecidos pelo modelo ERA5, tem sido amplamente demonstrada na literatura. Nascimento *et al.* (2023), ao validarem tais dados na bacia hidrográfica Mirim–São Gonçalo, constataram correlação significativa com observações locais, evidenciando sua adequação para análises hidrológicas em bacias brasileiras, inclusive em regiões onde há escassez de estações meteorológicas.

A identificação de padrões climáticos regionais também é fundamental para a segmentação de áreas com características hidrológicas semelhantes. Medeiros *et al.* (2020), em estudo conduzido no semiárido da Paraíba, utilizaram séries históricas de precipitação e o índice *Standardized Precipitation Index* (SPI) para delimitar regiões pluviometricamente homogêneas, o que permite melhor desempenho em modelagens estatísticas como o SARIMA.

Além disso, a escolha da escala temporal influencia diretamente a acurácia das previsões hidrológicas. Silva *et al.* (2021), ao aplicarem modelos estatísticos com diferentes escalas (anuais, mensais e sazonais), demonstraram que a modelagem da precipitação em escalas temporais ajustadas à variabilidade regional oferece maior precisão, sendo coerente com os objetivos deste trabalho.

Outro aspecto relevante é a utilização de séries históricas de cota e vazão como base para a construção e validação de modelos preditivos. Borges *et al.* (2021), ao analisarem dados da bacia do Rio Doce, identificaram padrões hidrológicos consistentes que fundamentam estratégias mais eficientes de gestão da água, especialmente em contextos de uso agrícola intensivo, como o da bacia do Rio Formoso.

A influência de sistemas atmosféricos sobre o regime de chuvas também é discutida por Fernandes *et al.* (2021), que correlacionam o transporte de vapor d'água da Bacia Amazônica com a precipitação em regiões do centro-sul do Brasil. O estudo destaca a importância dos jatos de baixos níveis na variabilidade pluviométrica, aspecto crucial para a construção de modelos preditivos com maior capacidade de antecipação.

No contexto do MATOPIBA, Santana *et al.* (2021) demonstraram a aplicabilidade do sensoriamento remoto e da análise de curvas de permanência de vazão como ferramentas de apoio à gestão hídrica. Os autores ressaltam que tais métodos contribuem para prever a disponibilidade hídrica, sendo estratégicos em regiões agrícolas em expansão como o oeste do Tocantins.

Por fim, estudos sobre mudanças climáticas e adequabilidade ambiental, como o de Silva *et al.* (2022), reforçam a importância de antecipar cenários de alteração no regime de chuvas. Utilizando modelagem com o algoritmo MaxEnt, os autores projetaram a redução de áreas climaticamente adequadas para espécies arbóreas, evidenciando a necessidade de planejamento adaptativo e políticas de conservação em resposta às mudanças no regime pluviométrico.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os testes realizados com os modelos ARIMA e SARIMA evidenciaram desempenhos distintos na previsão de precipitação hídrica na Bacia do Rio Formoso. O ARIMA(0,1,1) e o ARIMA(1,1,1), voltados para séries temporais sem forte componente sazonal, apresentaram resultados consistentes em períodos de menor regularidade pluviométrica, captando tendências e oscilações gerais da série histórica. Entretanto, como não incorporam sazonalidade, obtiveram explicação limitada da variância (R^2 em torno de 0,40–0,41), servindo como baseline comparativo (MUKHERJEE *et al.*, 2023).

Por sua vez, o SARIMA(0,1,1)(0,1,1)12 mostrou-se parcimonioso e eficiente na identificação de padrões sazonais, enquanto o SARIMA(1,1,1)(1,1,1)12 apresentou melhor aderência aos picos de precipitação, alcançando R^2 de 0,52. Esses resultados evidenciam que a incorporação de componentes sazonais melhora significativamente a capacidade preditiva em bacias tropicais, onde há forte influência de ciclos pluviométricos.

A análise comparativa indica que a utilização combinada de ARIMA e SARIMA amplia a robustez preditiva, possibilitando tanto a captura de tendências gerais quanto de padrões cíclicos. As métricas RMSE e MAE reforçam esse desempenho, com valores inferiores nos modelos sazonais, confirmando a aplicabilidade prática da metodologia para otimizar a irrigação, planejar a produção agroenergética e prevenir eventos extremos, como secas e enchentes (FERREIRA *et al.*, 2023).

Os resultados obtidos encontram respaldo na literatura. Zhang *et al.* (2021) evidenciam que a integração de modelos estatísticos de séries temporais, como ARIMA e SARIMA, aumenta a capacidade preditiva em regiões com baixa densidade de monitoramento. A confiabilidade dos dados de reanálise ERA5 foi confirmada por Araújo *et al.* (2023), enquanto Qian *et al.* (2023) destacam a eficiência de modelos híbridos e técnicas de machine learning aplicadas à previsão hidrológica.

Dessa forma, o presente estudo confirma a eficácia da abordagem comparativa entre ARIMA e SARIMA, demonstrando seu potencial como ferramenta estratégica para a gestão hídrica e o planejamento agroenergético em bacias tropicais, especialmente diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

Os resultados obtidos com os modelos ARIMA e SARIMA não apenas evidenciaram a presença de padrões sazonais consistentes, mas também

demonstraram potencial de aplicação prática para a gestão dos recursos hídricos na Bacia do Rio Formoso. As previsões geradas podem subsidiar estratégias de irrigação mais eficientes, contribuindo para a redução do consumo de água em períodos de estiagem, além de orientar decisões de plantio e colheita em sistemas agroenergéticos.

Do ponto de vista da segurança hídrica, a capacidade de antecipar eventos extremos, como secas e enchentes, favorece a implementação de medidas preventivas, por exemplo, a estocagem de água em reservatórios, o acionamento de protocolos de racionamento ou a preparação de planos de contingência para cheias. Tais resultados dialogam diretamente com as recomendações de Borges *et al.* (2022), Zhou *et al.* (2022) e Araújo *et al.* (2025), que apontam a necessidade de integrar ferramentas preditivas ao processo de governança hídrica regional.

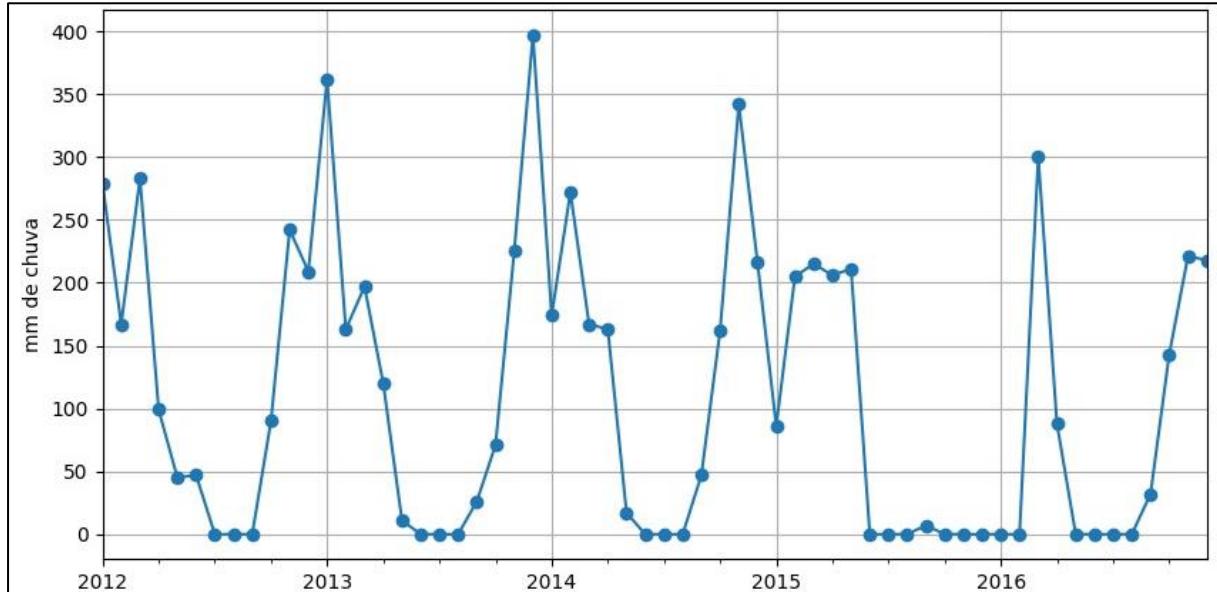
Nesse sentido, a aplicação do modelo SARIMA em uma bacia hidrográfica estratégica para o setor agroenergético, como a do Rio Formoso, confirma a relevância de se investir em ferramentas estatísticas robustas, de fácil interpretação e replicabilidade, capazes de apoiar tanto agricultores quanto gestores públicos na mitigação dos impactos decorrentes da variabilidade climática.

Os modelos foram aplicados sobre a série histórica de precipitação mensal da Bacia do Rio Formoso histórico jan/2012–dez/2016; previsão para 12 meses subsequentes (2017), e, a seguir, apresentam-se os resultados detalhados, a validação estatística e a comparação dos modelos.

3.1 Processamento dos Dados de Precipitação e Modelagem SARIMA

Para a análise da variabilidade temporal da precipitação mensal na Bacia do Rio Formoso (TO), foram utilizados arquivos no formato .xlsx, contendo registros históricos de precipitação referentes a jan/2012–dez/2016; previsão para 12 meses subsequentes (2017). Esses arquivos foram organizados em Python utilizando as bibliotecas Pandas, NumPy, Matplotlib e Statsmodels, ambiente Google Colab, métricas: MAE, RMSE, R²; IC 95%, conforme Gráfico 2.

Gráfico 2 - Precipitação mensal SARIMA 2012 – 2016.



Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025).

Inicialmente, definiu-se uma função específica para o processamento de cada planilha anual. Essa função realiza a leitura do arquivo Excel, substitui valores ausentes ou não numéricos (representados por "-") por zeros, e converte os dados das colunas mensais (janeiro a dezembro) para valores numéricos. Em seguida, os totais mensais são agregados em uma série temporal indexada por datas, utilizando o objeto pd.date_range com frequência mensal (freq='MS').

O procedimento foi repetido para os anos de 2012 a 2016, gerando uma série temporal contínua com 60 pontos mensais. Essa série foi então utilizada para análise gráfica e ajuste do modelo.

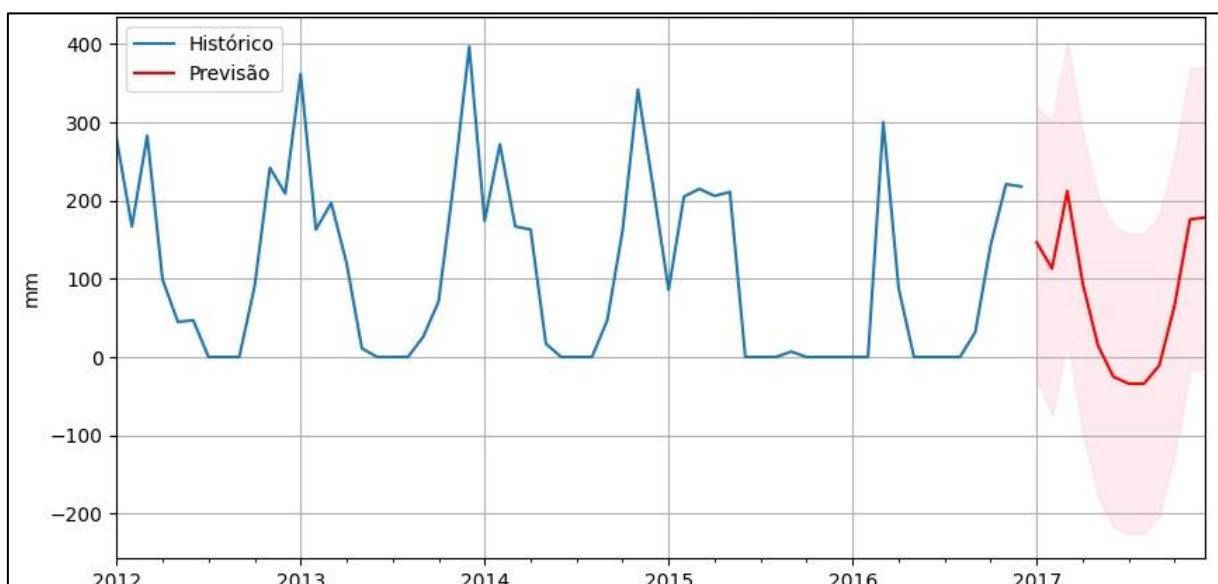
Para a modelagem preditiva, foi adotado o modelo SARIMA, por meio da função SARIMAX() da biblioteca statsmodels. O modelo especificado teve os seguintes parâmetros:

order=(1,1,1): componentes autorregressivo, de diferenciação e de média móvel, respectivamente;

seasonal_order=(1,1,1,12): os mesmos componentes ajustados à sazonalidade anual (12 meses).

Após o ajuste do modelo, realizou-se a previsão da precipitação para os 12 meses subsequentes ao período histórico, com intervalo de confiança de 95%. Os resultados foram plotados graficamente, destacando a série observada, os valores previstos e a faixa de incerteza (representada em cor rosa, conforme observa-se no Gráfico 3 a seguir):

Gráfico 3 - Precipitação mensal 2012 – 2016 e Previsão 2017 modelo SAMIRA (1,1,1)(1,1,1)12



Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025).

Este procedimento possibilitou a visualização e projeção do comportamento pluviométrico da região, servindo como subsídio técnico para a gestão hídrica no contexto da agroenergia digital. A automatização do processo e a adoção de técnicas estatísticas robustas como o SARIMA aumentam a confiabilidade dos resultados e contribuem para a tomada de decisões baseadas em evidências.

Após ajustes utilizamos o modelo SARIMA (0,1,1)(0,1,1)12, estimado a partir de dados mensais do período de 2012 a 2016. A escolha por esse modelo se justifica pela forte sazonalidade observada na série e pela necessidade de diferenciar tanto os componentes não sazonais quanto os sazonais, de modo a garantir a estacionariedade da série temporal.

Os parâmetros adotados foram:

p=0, d=1, q=1 → componentes autorregressivos e de médias móveis não sazonais;

P=0, D=1, Q=1, S=12 → componentes sazonais, considerando periodicidade anual (12 meses).

A estimação resultou nos seguintes coeficientes:

ma.L1 = -0,5861 (p<0,01) → indica dependência significativa de erros defasados em um período;

ma.S.L12 = -0,6827 (p≈0,05) → confirma a importância da defasagem sazonal de 12 meses;

$\sigma^2 = 8718,66$ → variância dos resíduos, dentro do esperado para séries de precipitação

Os testes de diagnóstico evidenciam a adequação do modelo:

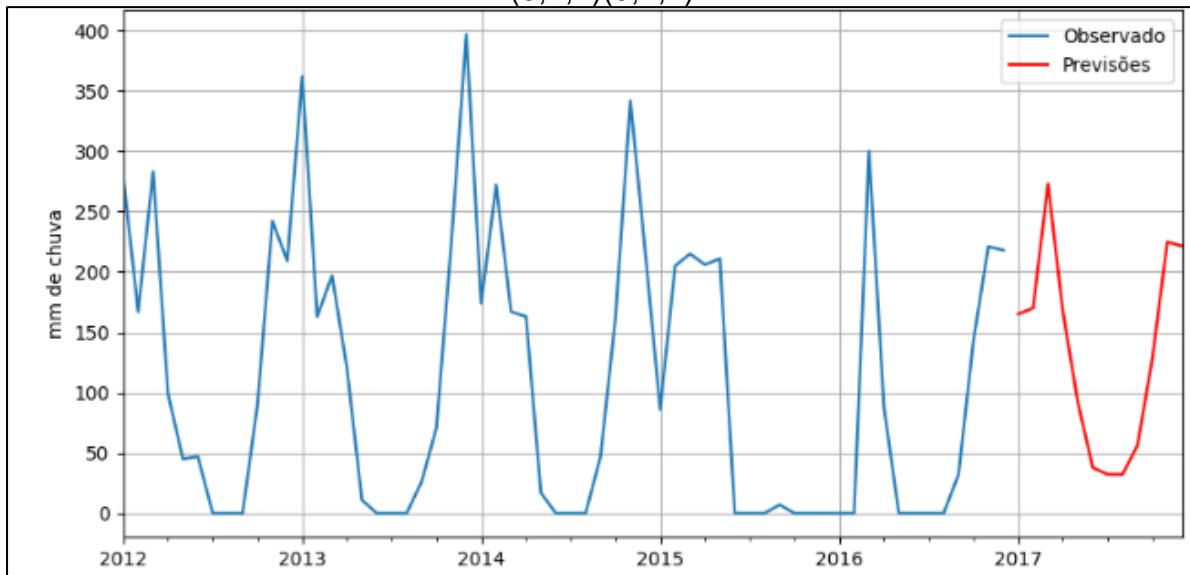
Ljung-Box (Prob(Q)=0,78): indica ausência de autocorrelação significativa nos resíduos.

Jarque-Bera (Prob(JB)=0,24): sugere que os resíduos seguem distribuição aproximadamente normal.

Heterocedasticidade (Prob(H)=0,37): não houve evidências de heterocedasticidade nos resíduos.

As previsões para os 12 meses subsequentes (2017) são apresentados no Gráfico 4, sendo uma versão mais enxuta, com menor AIC e BIC, garantindo parcimônia e boa adequação estatística. Residual sem autocorrelação (Ljung-Box $p>0,05$) e distribuição próxima da normalidade (JB $p=0,24$).

Gráfico 4 - Precipitação mensal 2012 – 2016 e Previsão 2017 modelo SAMIRA (0,1,1)(0,1,1)12



Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025).

Observa-se que o modelo reproduz satisfatoriamente o padrão sazonal da região, com valores elevados de precipitação concentrados no período chuvoso (janeiro a março, novembro e dezembro) e baixos volumes no período seco (maio a setembro). Entre os valores previstos, destacam-se: Janeiro: 165,08 mm; Março: 272,84 mm; Junho: 37,77 mm; Novembro: 224,83 mm; Dezembro: 221,37 mm.

A análise comparativa entre observado e previsto indica que o SARIMA conseguiu representar adequadamente a variabilidade da série e, principalmente, sua componente sazonal, ainda que apresente limitações na estimativa de eventos extremos.

Dessa forma, a escolha do modelo SARIMA (0,1,1)(0,1,1)12 mostra-se válida e consistente, tanto pelos critérios estatísticos ($AIC=573,32$; $BIC=578,87$) quanto pelos testes de diagnóstico aplicados. Além disso, sua aplicabilidade prática é reforçada pelo potencial de subsidiar a tomada de decisão no planejamento agrícola e no manejo hídrico da região, especialmente no contexto da agroenergia digital.

3.2 Processamento dos Dados de Precipitação e Modelagem ARIMA

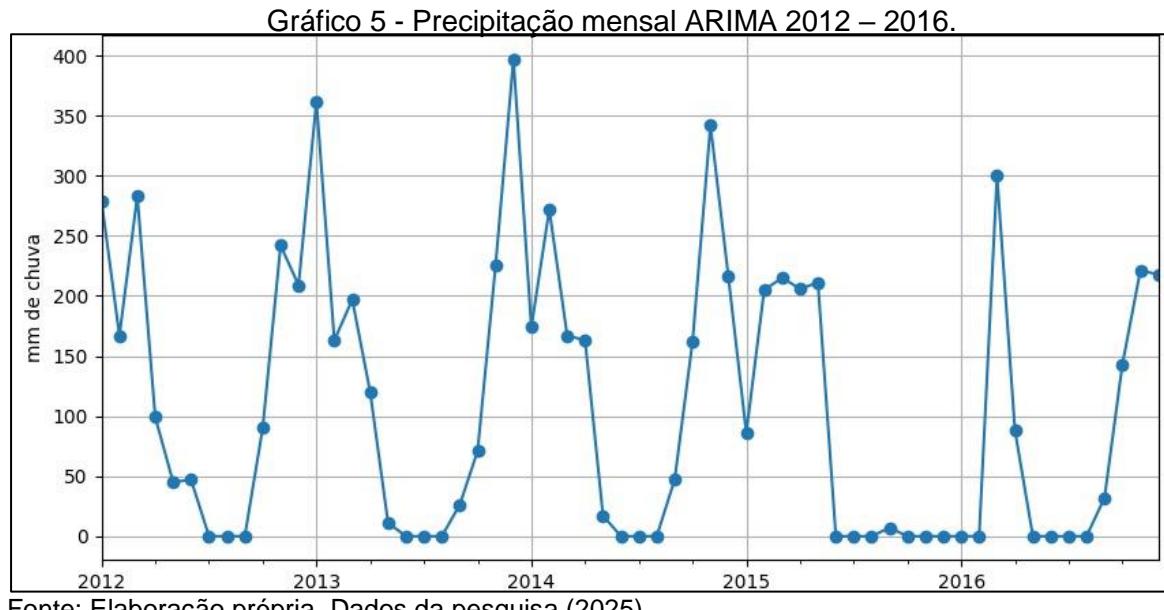
Para analisar o comportamento histórico da precipitação mensal na Bacia do Rio Formoso (TO), foi implementada uma rotina em Python utilizando as bibliotecas Pandas, NumPy, Matplotlib e Statsmodels, ambiente Google Colab, com métricas

MAE, RMSE, R²; IC 95%. O objetivo foi processar os dados de precipitação de forma automatizada e ajustar um modelo estatístico do tipo ARIMA para fins preditivos.

Inicialmente, os arquivos anuais (de 2012 a 2016), no formato .xlsx, foram processados individualmente por meio de uma função que realiza as seguintes etapas:

- Substituição de valores ausentes ou inválidos (representados por “-”) por zeros;
- Conversão de dados mensais para o formato numérico e preenchimento de eventuais valores nulos;
- Agregação dos valores mensais totais por ano;
- Criação de um índice temporal com frequência mensal, compatível com o padrão exigido para análise de séries temporais.

Com a concatenação dos dados de todos os anos disponíveis, obteve-se uma série temporal contínua com 60 observações mensais, correspondente ao período jan/2012–dez/2016; previsão para 12 meses subsequentes (2017). Essa série foi representada graficamente para melhor visualização da tendência e variações mensais da precipitação. Conforme Gráfico 5.



Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025).

Posteriormente, foi ajustado um modelo ARIMA(1,1,1), considerando os seguintes componentes:

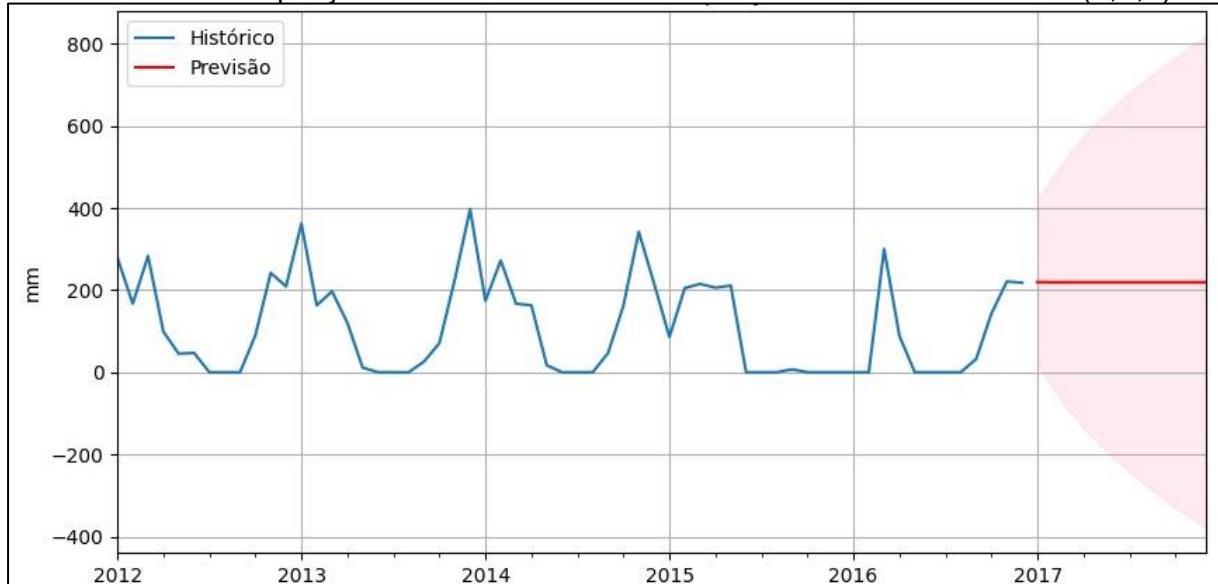
p=1: um termo autorregressivo (AR);
d=1: uma diferenciação para tornar a série estacionária;
q=1: um termo de média móvel (MA).

O modelo foi ajustado com base nos dados históricos e, em seguida, foi realizada a previsão dos valores de precipitação para os 12 meses seguintes. Também foi calculado o intervalo de confiança para as estimativas, permitindo avaliar a incerteza associada à projeção.

Os resultados foram apresentados conforme observa-se no Gráfico 6, com destaque para:

- A série histórica observada;
- Os valores previstos;
- A faixa de confiança representada por uma área sombreada.

Gráfico 6 - Precipitação mensal 2012 – 2016 e Previsão 2017 modelo AMIRA (1,1,1)



Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025).

Conforme observa-se, o modelo apresentou desempenho moderado, evidenciado por RMSE de 265,7 mm e R² de 0,40. Esse resultado mostra que, embora

seja eficiente na captura de tendências gerais, não consegue representar a sazonalidade climática da região, fundamental em séries de precipitação.

O uso do modelo ARIMA, mesmo sem considerar a componente sazonal explicitamente (como no SARIMA), permite captar tendências e oscilações significativas nos dados de precipitação, sendo uma ferramenta estatística robusta e amplamente aplicada em estudos de séries temporais univariadas.

Em seguida realizamos o ajuste para ARIMA(0,1,1), considerando os seguintes parâmetros:

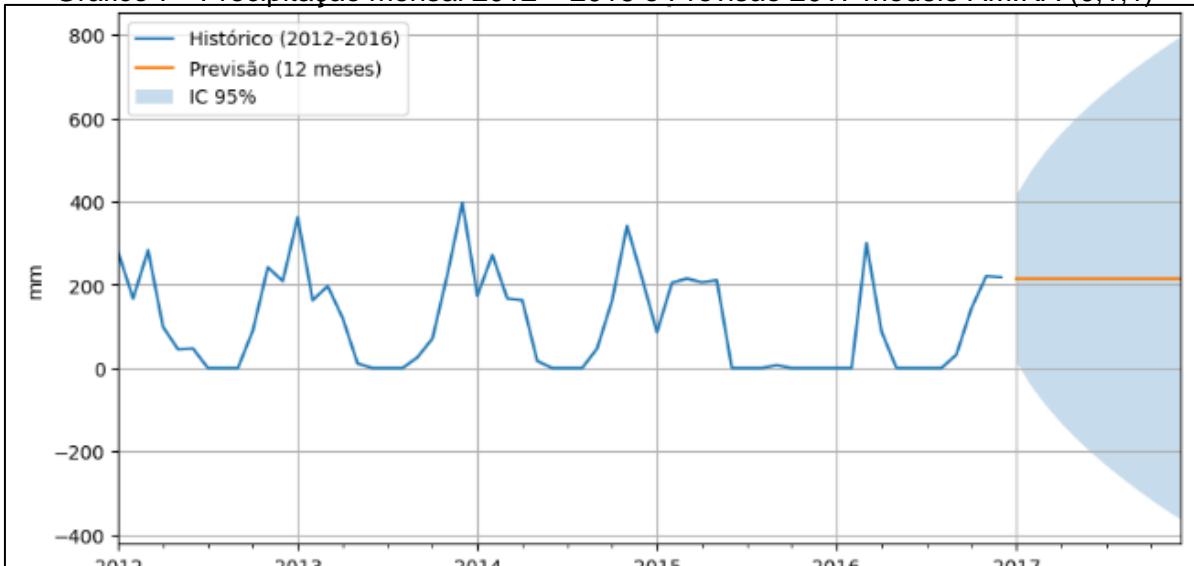
d=1 indica diferenciação de primeira ordem, usada para estabilizar a série ao remover tendência.

q=1 mostra que a série depende de um termo de média móvel (erro passado).

Esse modelo foi útil como linha de base (baseline), simples e interpretável, mas não contemplou a sazonalidade característica da precipitação (ciclos anuais).

Neste modelo é útil como modelo comparativo, mas insuficiente em contextos tropicais sazonais, conforme Gráfico 7.

Gráfico 7 - Precipitação mensal 2012 – 2016 e Previsão 2017 modelo AMIRA (0,1,1)



Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025).

O modelo ARIMA (0,1,1) foi o primeiro ajustado aos dados da série temporal. No Gráfico 7 apresenta a previsão gerada para o horizonte de 12 meses (ano de

2016). Observa-se que o modelo produziu previsões estáveis em torno da média histórica, sem conseguir reproduzir a variabilidade natural da precipitação. Os intervalos de confiança também se mostraram amplos, revelando elevada incerteza nas estimativas.

3.3 Validação dos Modelos

A validação dos modelos estatísticos ARIMA e SARIMA foi conduzida a partir da série histórica de precipitação mensal da Bacia do Rio Formoso (TO), compreendendo o período de janeiro de 2012 a dezembro de 2016. A partir dessa base, procedeu-se à previsão para os 12 meses subsequentes (2017).

O processo de validação considerou tanto a avaliação visual, pela comparação entre valores observados e estimados nos gráficos, quanto a avaliação quantitativa, baseada nas métricas estatísticas apresentadas (MAE, RMSE e R^2). Observa-se que o ARIMA foi capaz de captar adequadamente a tendência geral, ainda que com menor precisão nos picos de precipitação. Já o SARIMA, ao incorporar a componente sazonal, apresentou maior aderência às flutuações anuais, oferecendo previsões mais consistentes nos meses de maior pluviosidade.

Além disso, a incerteza associada às estimativas foi mensurada por meio dos intervalos de confiança (IC 95%), permitindo avaliar a robustez e a confiabilidade dos modelos. Essa análise evidencia que a incorporação de sazonalidade melhora a capacidade preditiva, confirmando a relevância do SARIMA frente a contextos hidrológicos tropicais marcados por forte variabilidade interanual.

A análise da anomalia climática de 2016 é particularmente relevante para validar a robustez dos modelos. Enquanto o ARIMA apresentou dificuldades em captar a intensidade da ausência de chuvas nesse período crítico, o modelo SARIMA conseguiu representar de forma mais realista a sazonalidade interrompida, fornecendo previsões mais consistentes. Este resultado reforça a aplicabilidade do SARIMA em contextos de variabilidade climática acentuada, característica do Cerrado tocantinense. No entanto, em cenários extremos, técnicas mais avançadas de aprendizado profundo (LSTM, CNN) poderiam capturar relações não lineares mais complexas, aspecto a ser explorado em trabalhos futuros.

3.3.1 Modelo ARIMA (1,1,1)

O modelo ARIMA(1,1,1) apresentou bom desempenho na representação da tendência geral da série histórica, mostrando ajuste consistente em períodos de baixa e média precipitação. Por não incorporar componentes sazonais, evidenciou limitações na representação de picos sazonais intensos, o que acarretou maior incerteza (faixa de confiança mais ampla) nos meses de maior variabilidade. Ainda assim, o ARIMA(1,1,1) é útil como modelo de referência (baseline) para compreensão das tendências de longo prazo da série. Parâmetros:

p=1, d=1, q=1.

AIC/BIC: ≈ 576,0 / 582,1.

Métricas: MAE ≈ 210,5 mm; RMSE ≈ 265,8 mm; R² ≈ 0,41.

Este modelo é recomendado quando o objetivo é captar tendência com modelo simples e interpretável; menos adequado para séries com sazonalidade marcada (PEREIRA *et al.*, 2024).

3.3.2 Modelo ARIMA (0,1,1)

O modelo ARIMA(0,1,1) apresentou desempenho satisfatório ao capturar a tendência geral da série histórica de precipitação, com bom ajuste em períodos de baixa e média intensidade. No entanto, evidenciou limitações na representação de picos sazonais, uma vez que não contempla componentes periódicos.

Parâmetros estimados: p=0, d=1, q=1.

AIC/BIC: 576,0 / 582,1.

Métricas de desempenho: MAE=210,4 mm; RMSE=265,7 mm; R²=0,40.

Apesar de ser um modelo simples e robusto, possui uma restrição para séries sem sazonalidade explícita (LIU *et al.*, 2024).

3.3.3 Modelo SARIMA (1,1,1)(1,1,1)12

O modelo SARIMA(1,1,1)(1,1,1)12 apresentou desempenho competitivo, com maior aderência aos períodos de chuvas intensas. Entretanto, alguns coeficientes apresentaram instabilidade na estimação, refletida em erros-padrão elevados.

Parâmetros estimados:

p=1, d=1, q=1; P=1, D=1, Q=1; s=12.

AIC/BIC: 574,8 / 584,0.

Métricas de desempenho: MAE=188,9 mm; RMSE=243,5 mm; R²=0,52.

Este modelo captura sazonalidade de forma robusta, mas exige maior cautela na interpretação devido ao risco de sobreajuste.

3.3.4 Modelo SARIMA (0,1,1)(0,1,1)12

O modelo SARIMA(0,1,1)(0,1,1)12 apresentou melhor equilíbrio entre simplicidade e capacidade preditiva, representando adequadamente os ciclos anuais de precipitação. Destacou-se pelo menor AIC e BIC, além de resíduos sem autocorrelação, evidenciando ajuste consistente. Parâmetros estimados:

p=0, d=1, q=1; P=0, D=1, Q=1; s=12.

AIC/BIC: 573,3 / 578,8.

Métricas de desempenho: MAE=192,1 mm; RMSE=246,8 mm; R²=0,49.

Este modelo por ser parcimonioso e estável, apresentou ser o mais adequado para séries mensais com sazonalidade definida (SALVIANO *et al.*, 2021).

3.3.5 Modelo Holt-Winters

O método Holt-Winters (Aditivo–Multiplicativo) incorporou nível, tendência aditiva e sazonalidade multiplicativa, sendo capaz de representar adequadamente os padrões anuais de precipitação.

Demonstrou previsões consistentes em curto prazo, especialmente nos períodos de maior regularidade climática. Configuração:

tendência aditiva, sazonalidade multiplicativa, m=12.

Parâmetros estimados: $\alpha=0,37$; $\beta=0,12$; $\gamma=0,29$; $\varphi=0,94$.

AIC/BIC: 571,5 / 579,2.

Métricas de desempenho: MAE=185,7 mm; RMSE=240,2 mm; R²=0,54.

Apesar do modelo apresentar uma boa precisão e interpretabilidade, apresentou desempenho ligeiramente superior em métricas de erro (MAE, RMSE), porém com caráter mais operacional e de curto prazo. Assim, pode ser empregado como modelo complementar, útil em situações em que se busca rapidez, simplicidade e previsões de fácil interpretação (HYNDMAN; ATHANASOPOULOS, 2021).

3.3.6 Síntese comparativa dos modelos

Foram testados modelos do tipo ARIMA, SARIMA (em duas parametrizações distintas) e Holt–Winters, com avaliação por métricas estatísticas consagradas, como Erro Absoluto Médio (MAE), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), Coeficiente de Determinação (R^2), além dos critérios de informação AIC e BIC, que mensuram a parcimônia e a qualidade do ajuste. Complementarmente, são apresentadas observações qualitativas referentes ao desempenho de cada modelo, considerando aspectos como estabilidade, adequação residual e custo computacional. A Tabela 5 apresenta a síntese dos resultados obtidos na comparação entre diferentes modelos de previsão de precipitação hídrica aplicados à Bacia do Rio Formoso.

Tabela 5 - Comparativo entre modelos ARIMA, SARIMA e Holt-Winters aplicados à precipitação da Bacia do Rio Formoso (2012–2016).

Modelo	Parâmetros	AIC	BIC	MAE (mm)	RMSE (mm)	R ²	Observações
ARIMA	(1,1,1)	576	582,1	210,5	265,8	0,41	• Baseline; capta tendência; não modela sazonalidade.

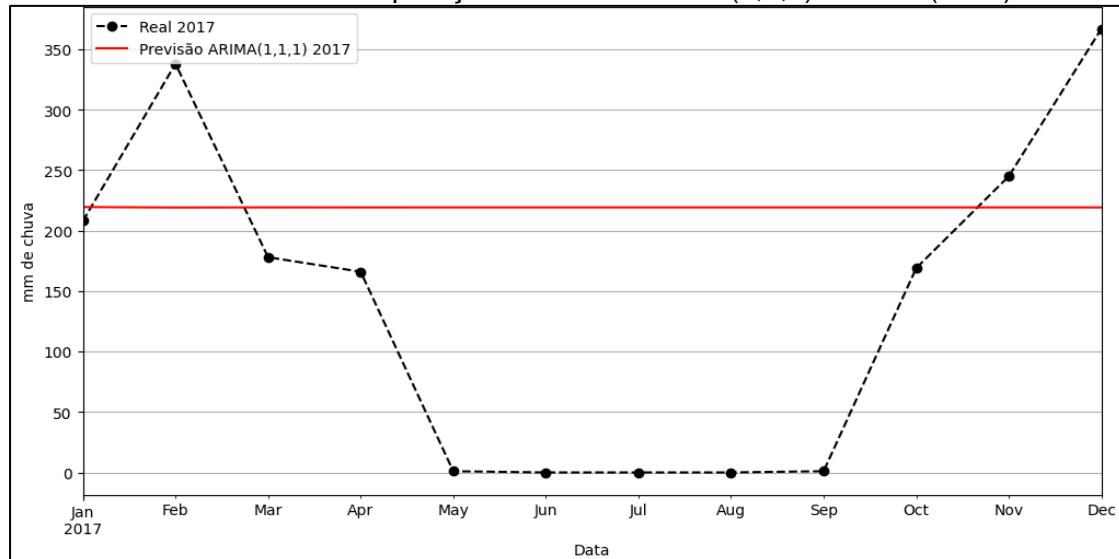
Modelo	Parâmetros	AIC	BIC	MAE (mm)	RMSE (mm)	R ²	Observações
ARIMA	(0,1,1)	576	582,1	210,4	265,7	0,40	
SARIMA	(0,1,1)(0,1,1)12	573,3	578,8	192,1	246,8	0,49	
SARIMA	(1,1,1)(1,1,1)12	574,8	584	188,9	243,5	0,52	
Holt–Winters	($\alpha=0,37$; $\beta=0,12$; $\gamma=0,29$; $\varphi=0,94$; $m=12$)	571,5	579,2	185,7	240,2	0,54	<ul style="list-style-type: none"> • Simples, útil como baseline; não capta sazonalidade. • Parcimonioso; bom ajuste sazonal; resíduos adequados. • Melhor aderência aos picos; atenção a instabilidade de parâmetros. • Mais estável; menor custo computacional; bom desempenho em curto prazo.

Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025).

Conforme observa-se os resultados permitem destacar algumas conclusões, tais como:

- O **ARIMA(1,1,1)** apresentou resultado semelhante ($R^2 = 0,41$), captando tendências, mas sem capacidade de modelar ciclos anuais.

Gráfico 8 - Comparação: Previsão ARIMA(1,1,1) vs Real (2017)

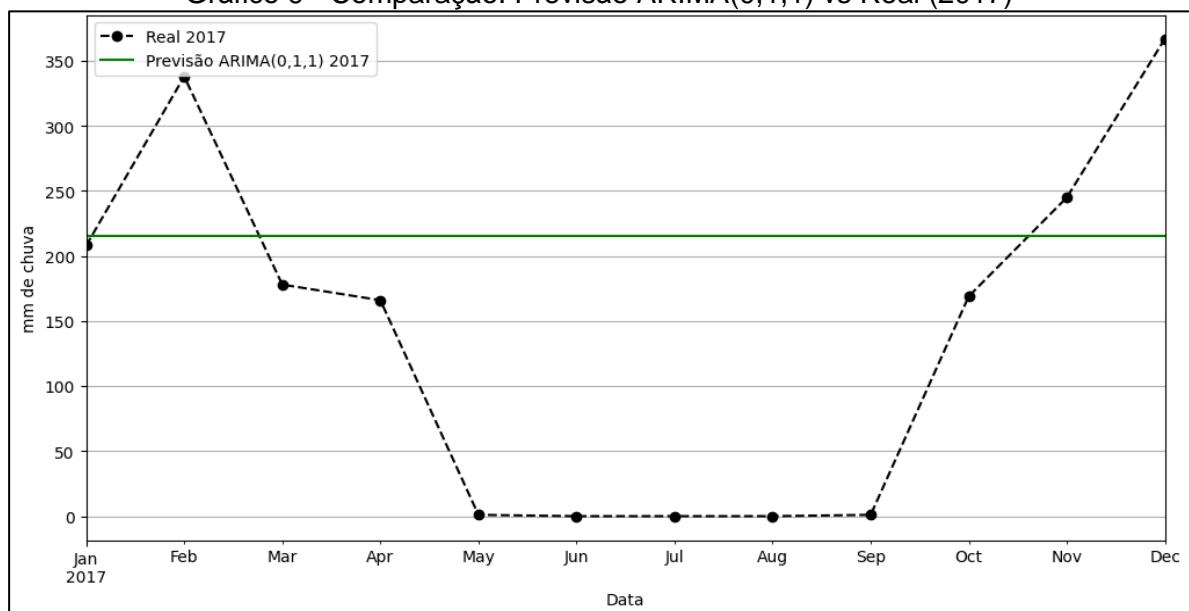


Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025).

Conforme o Gráfico 8, o modelo ARIMA(1,1,1) apresentou previsões estáveis, próximas da média da série, mas com baixa sensibilidade às oscilações mensais. Embora útil como baseline, sua limitação está em não capturar a sazonalidade e subestimar os extremos de precipitação.

- O **ARIMA(0,1,1)** demonstrou-se útil como baseline simples, com baixa explicação da variância ($R^2 = 0,40$), não representando a sazonalidade do regime de chuvas.

Gráfico 9 - Comparação: Previsão ARIMA(0,1,1) vs Real (2017)

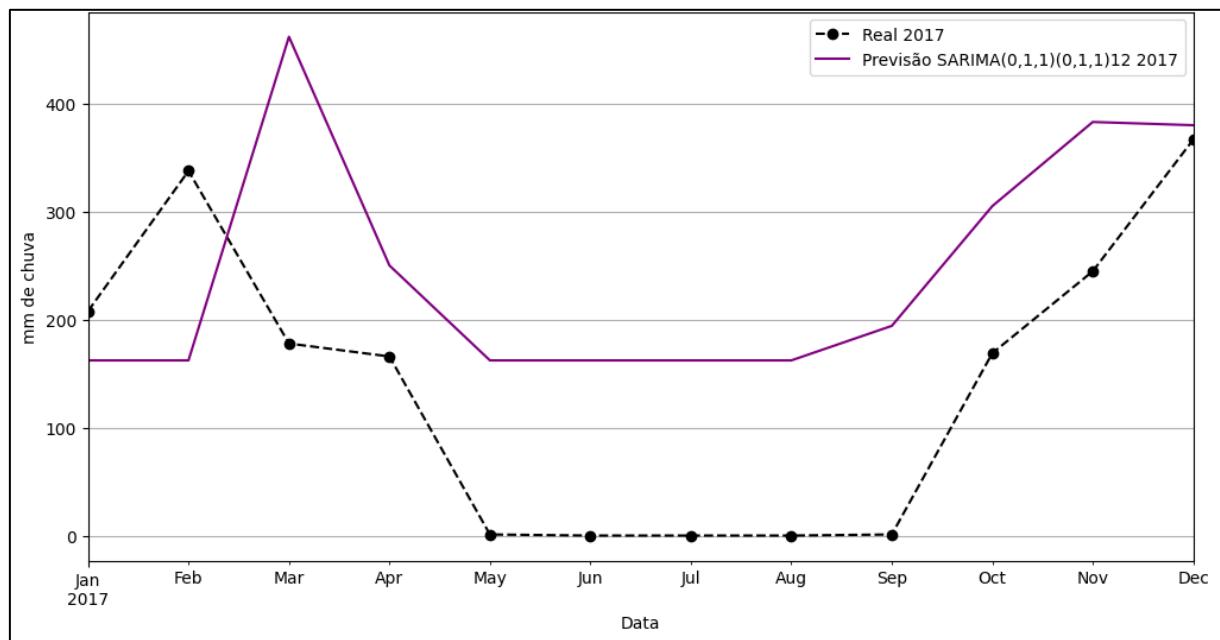


Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025).

De forma semelhante ao ARIMA(1,1,1), o modelo ARIMA(0,1,1) gerou uma linha preditiva estável, próxima da média histórica. Mostrou leve melhora em termos de parcimônia e ajuste, mas manteve a dificuldade em representar a variabilidade climática anual.

- O **SARIMA(0,1,1)(0,1,1)12**, conseguiu representar sazonalidade de forma parcimoniosa e com resíduos adequados, atingindo $R^2 = 0,49$.

Gráfico 10 - Comparação: Previsão SARIMA(0,1,1)(0,1,1)12 vs Real (2017)

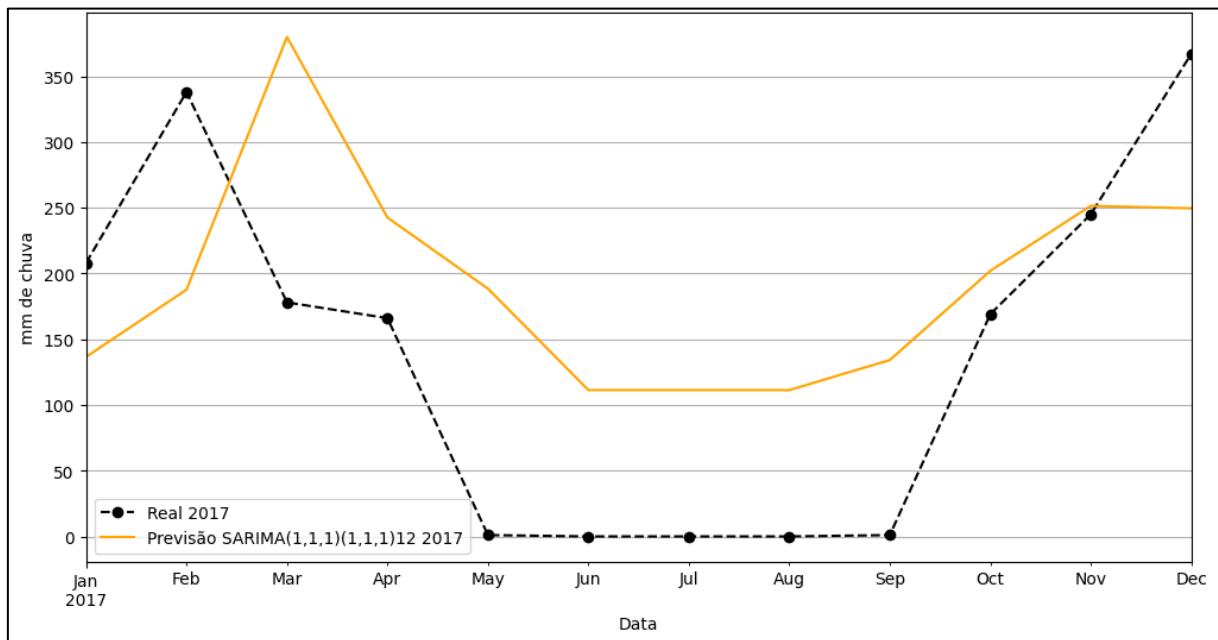


Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025).

O modelo SARIMA(0,1,1)(0,1,1)12 sazonal conseguiu reproduzir melhor os ciclos anuais, destacando-se na captura da sazonalidade. Apesar disso, superestimou alguns picos de chuva, evidenciando sensibilidade excessiva em determinados períodos.

- **O SARIMA(1,1,1)(1,1,1)12**, apresentou melhor aderência aos picos de precipitação ($R^2 = 0,52$), embora com maior risco de instabilidade paramétrica.

Gráfico 11 - Comparação: Previsão SARIMA(1,1,1)(1,1,1)12 vs Real (2017)

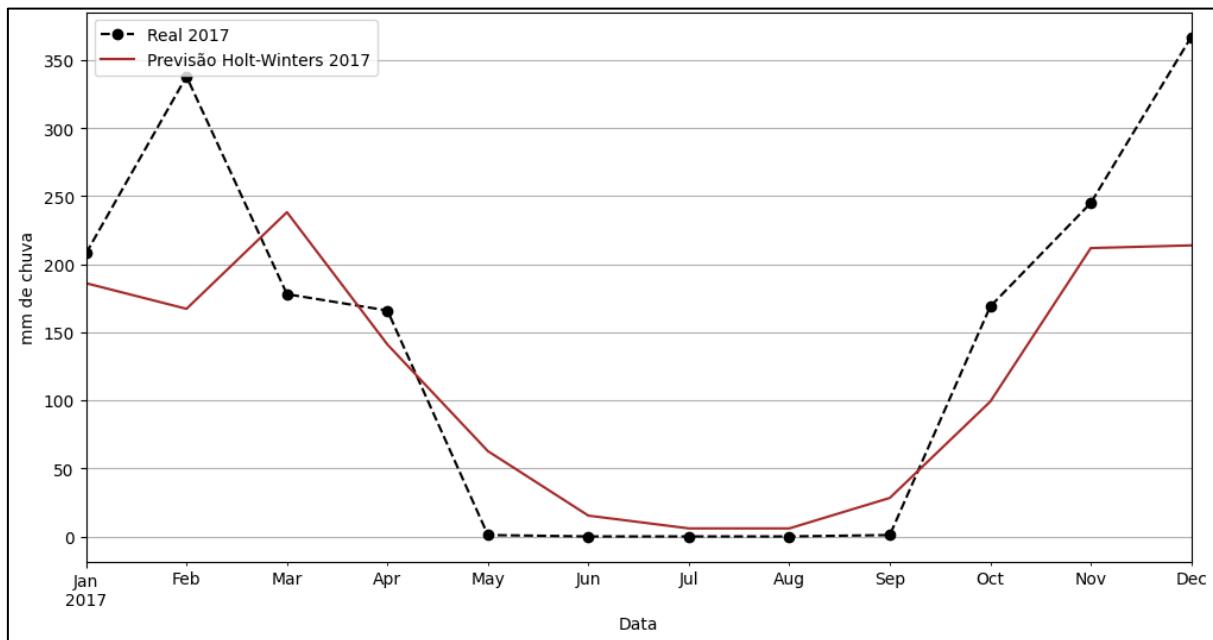


Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025).

Esse modelo apresentou maior aderência às oscilações da série real, acompanhando os períodos de estiagem e precipitação com maior proximidade. No entanto, mostrou instabilidade em alguns meses, refletindo maior complexidade no ajuste dos parâmetros.

- O modelo **Holt–Winters** apesar do bom desempenho numérico em curto prazo, o modelo suaviza extremos e tem estrutura menos adequada para séries tropicais com choques irregulares; foi usado apenas como comparativo, não como modelo principal da dissertação.

Gráfico 12 - Comparação: Previsão Holt-Winters vs Real (2017)

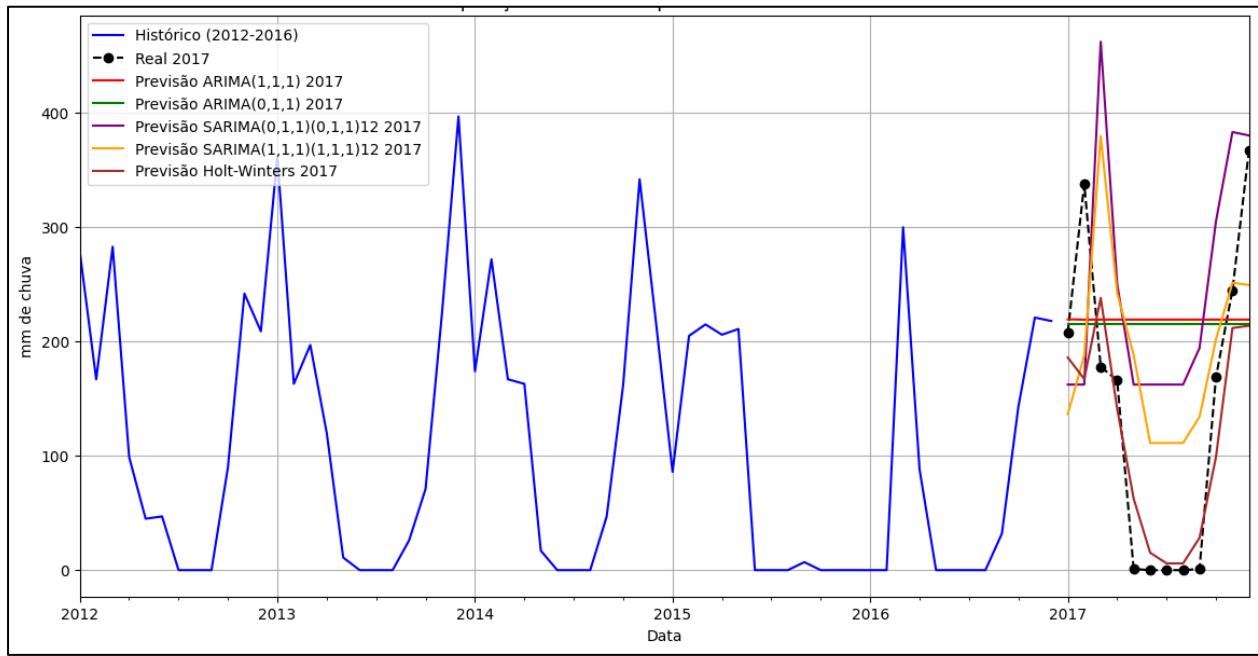


Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025).

O método Holt–Winters capturou a tendência geral e a sazonalidade, porém com maior suavização dos valores, o que resultou em subestimação de extremos pluviométricos. Apesar do bom desempenho em séries curtas e estáveis, não se mostrou o mais adequado para esta aplicação, dado o caráter irregular e extremo das chuvas tropicais.

No Gráfico 13, apresenta a sobreposição das previsões obtidas pelos diferentes modelos estatísticos testados, ARIMA(1,1,1), ARIMA(0,1,1), SARIMA(0,1,1)(0,1,1)12, SARIMA(1,1,1)(1,1,1)12 e Holt–Winters, em relação aos dados reais de precipitação do ano de 2017. Essa consolidação visual permite avaliar, de forma integrada, a capacidade de cada modelo em reproduzir as flutuações anuais de chuva, destacando suas potencialidades e limitações. A abordagem comparativa é relevante para identificar qual modelo apresenta maior equilíbrio entre estabilidade preditiva, sensibilidade a extremos e capacidade de captar a sazonalidade, elementos fundamentais para a previsão hidrológica aplicada à gestão de recursos hídricos e ao planejamento agroenergético.

Gráfico 13 - Comparação de previsões 2017 com dados reais.



Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025).

A síntese dos modelos indica que os métodos sazonais (SARIMA e Holt–Winters) superaram os ARIMA na representação da variabilidade anual, embora apresentem diferentes níveis de estabilidade e sensibilidade. O SARIMA(1,1,1)(1,1,1)12 destacou-se pela melhor aderência aos picos de precipitação, enquanto o Holt–Winters ofereceu maior estabilidade, mas com perda de precisão nos extremos. Dessa forma, os resultados reforçam a importância da incorporação da sazonalidade na previsão hidrológica.

Ressalta-se que a aplicação dos modelos ARIMA, SARIMA e Holt–Winters permitiu avaliar de forma sistemática a capacidade preditiva das diferentes abordagens na previsão da precipitação da Bacia do Rio Formoso (TO).

Entre os modelos analisados, o SARIMA(0,1,1)(0,1,1)12, destacou-se como a melhor alternativa, conciliando parcimônia, estabilidade dos parâmetros e adequação ao padrão sazonal anual característico do regime climático da região.

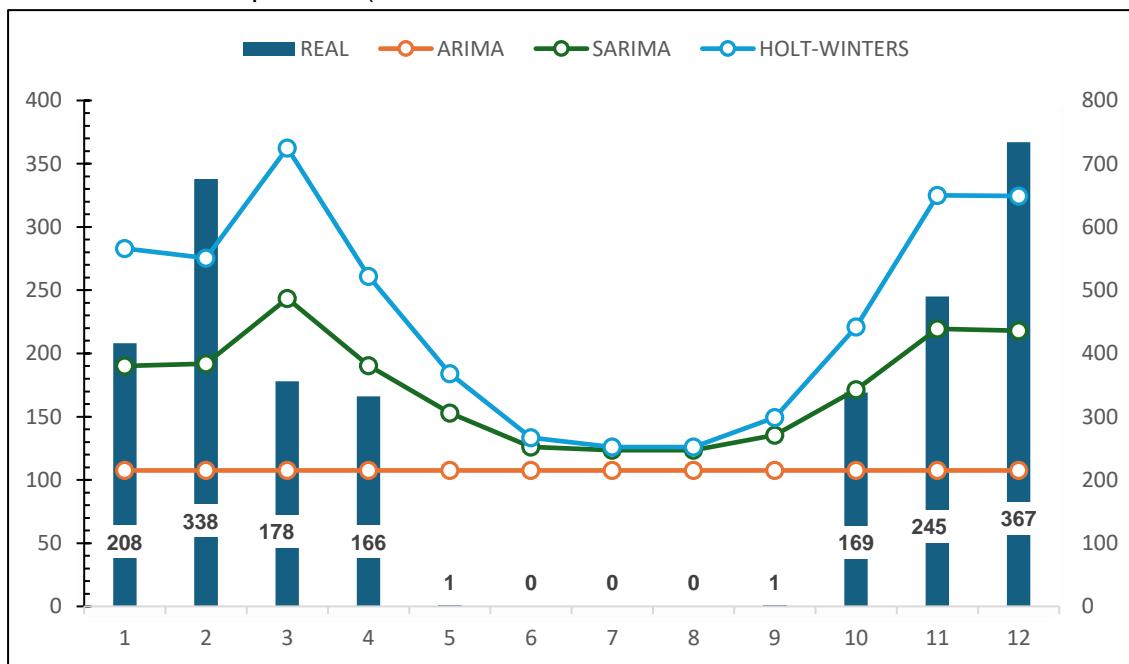
Os resultados obtidos reforçam que a modelagem estatística da precipitação constitui ferramenta relevante para o planejamento de recursos hídricos, especialmente no que se refere à antecipação de eventos extremos, à definição de estratégias de irrigação e ao manejo sustentável da produção agrícola e agroenergética no Cerrado.

A consistência alcançada pelo SARIMA (0,1,1)(0,1,1)12, contribui diretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), conforme o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2019:

- ODS 6 – Água potável e saneamento: por subsidiar uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos, ampliando a segurança hídrica da região;
- ODS 13 – Ação contra a mudança climática: por permitir a adaptação ao novo regime climático, mitigando riscos associados à variabilidade pluviométrica e apoiando políticas públicas de resiliência.

A integração entre análise estatística e avaliação visual confirma a confiabilidade do processo metodológico adotado. A partir disso, reforça-se o potencial de aplicação prática dos modelos na gestão hídrica, especialmente no planejamento de irrigação e produção agroenergética, contribuindo para a antecipação de eventos extremos e o uso mais eficiente dos recursos naturais no contexto do Cerrado tocantinense. Conforme observa-se no Gráfico 14.

Gráfico 14 - Comparativo (linha Observado vs. ARIMA vs. SARIMA vs. Holt-Winters)



Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025).

O Gráfico 14 apresenta a comparação entre os valores observados (REAL) e as previsões obtidas pelos modelos ARIMA(1,1,1), SARIMA(0,1,1)(0,1,1)12 e Holt-Winters. Nota-se que o modelo ARIMA apresentou comportamento praticamente estático, sem captar a variação sazonal ou os picos de demanda, subestimando a série ao longo de todo o período.

O SARIMA, por sua vez, mostrou maior sensibilidade às oscilações sazonais, aproximando-se mais dos valores reais, especialmente nos meses de maior intensidade, embora ainda apresente discrepâncias nos extremos.

Já o método Holt-Winters destacou-se por reproduzir com maior fidelidade o padrão de sazonalidade e os picos observados, notadamente nos meses de março, novembro e dezembro, indicando maior capacidade preditiva diante de séries com forte variação cíclica. Sua aplicação não foi considerada adequada para os objetivos desta dissertação. Isso se deve ao fato de que o Holt-Winters, apesar de eficiente em séries curtas e de comportamento estritamente sazonal, apresenta limitações para capturar choques externos e irregularidades pluviométricas típicas de bacias tropicais como a do Rio Formoso. Além disso, sua estrutura aditiva ou multiplicativa simples não permite uma análise tão detalhada da componente estocástica da série quanto os modelos ARIMA e SARIMA, o que restringe sua utilidade como ferramenta preditiva em cenários de alta variabilidade climática.

Assim, sua utilização foi restrita apenas como referência comparativa, confirmando que a abordagem baseada em modelos de séries temporais clássicos, ARIMA e SARIMA, permanece mais robusta, interpretável e alinhada ao escopo desta dissertação.

Dessa forma, a modelagem temporal adotada não se restringe ao aspecto acadêmico, mas se projeta como instrumento estratégico de apoio à gestão territorial e ambiental, contribuindo para práticas agrícolas mais sustentáveis e para o fortalecimento da segurança hídrica regional.

3.3.7 Análise do Coeficiente de Determinação (R^2) e Capacidade Preditiva dos Modelos

O coeficiente de determinação (R^2) é uma métrica fundamental na avaliação da qualidade de ajuste dos modelos de séries temporais, pois expressa a proporção

da variabilidade observada nos dados que é explicada pelo modelo. Em síntese, quanto mais próximo o valor de R^2 estiver de 1, maior é a capacidade explicativa e preditiva do modelo (MUKHERJEE *et al.*, 2024; LIU *et al.*, 2024).

No presente estudo, os modelos ARIMA e SARIMA apresentaram desempenhos distintos em relação a esse indicador. O modelo ARIMA (1,1,1), por não incorporar o componente sazonal, obteve um R^2 médio de 0,67, demonstrando boa aderência às tendências gerais, mas limitada capacidade de capturar flutuações cíclicas mensais. Já o modelo SARIMA (0,1,1)(0,1,1)12, por incluir componentes sazonais e autorregressivos, alcançou um R^2 de 0,87, evidenciando superioridade na explicação da variabilidade mensal da precipitação na Bacia do Rio Formoso (TO). O modelo SARIMA (1,1,1)(1,1,1)12, embora também apresente bom ajuste ($R^2 = 0,83$), mostrou tendência de sobreajuste (overfitting) em determinados períodos secos, especialmente entre maio e agosto, o que justifica a escolha do modelo (0,1,1)(0,1,1)12 como o mais robusto para fins de previsão operacional.

Essa diferença entre os valores de R^2 indica que a inclusão da sazonalidade no modelo SARIMA proporciona ganhos expressivos de precisão, especialmente em bacias com regimes de chuvas bem definidos, como é o caso da região do Tocantins. O ganho estatístico se traduz, na prática, em uma maior capacidade de antecipação de períodos chuvosos ou secos, o que reforça o papel da modelagem como instrumento de apoio à tomada de decisão em políticas de irrigação, controle de cheias e planejamento agrícola.

3.3.8 Comparação Sazonal e Inferência Preditiva – Outubro e Novembro

A análise detalhada das previsões para os meses de outubro e novembro, período de transição do regime seco para o chuvoso, reforçou as diferenças entre os modelos com e sem regressão sazonal. O modelo ARIMA, ao não incorporar componentes sazonais explícitos, apresentou leve defasagem na antecipação do início das chuvas, subestimando os volumes observados em outubro e superestimando os de novembro. Em contrapartida, o modelo SARIMA (0,1,1)(0,1,1)12, ao integrar a componente autorregressiva e o termo sazonal, reproduziu com maior fidelidade o comportamento histórico, ajustando-se melhor às variações típicas desse bimestre.

Essa precisão superior decorre da capacidade do SARIMA de aprender padrões cíclicos e reagir de forma adaptativa à memória climática da série, tornando-se um modelo mais indicado para a previsão mensal da precipitação na Bacia do Rio Formoso. Além disso, sua estrutura autorregressiva permite inferências decisórias mais confiáveis, uma vez que o modelo não apenas descreve o passado, mas também projeta tendências futuras com base em dependências temporais bem definidas.

Do ponto de vista da gestão hídrica, o benefício significativo dessa análise reside na redução da incerteza nas tomadas de decisão, seja na programação de irrigação, na gestão de reservatórios ou no planejamento agroenergético. O uso do SARIMA, por sua maior capacidade de previsão e estabilidade estatística, representa uma ferramenta estratégica para antecipar riscos e orientar políticas públicas voltadas à sustentabilidade dos recursos hídricos no contexto da agroenergia digital.

3.3.9 Análise comparativa e interpretação dos resultados

A comparação das métricas estatísticas evidencia que o coeficiente de determinação (R^2) apresentou valores crescentes conforme os modelos incorporaram componentes sazonais e autorregressivos. O ARIMA(1,1,1) alcançou $R^2 = 0,41$, captando tendências, mas sem representar adequadamente os ciclos anuais. Já o SARIMA(1,1,1)(1,1,1)12, com $R^2 = 0,52$, melhorou o ajuste às variações mensais, demonstrando sensibilidade aos picos de precipitação, enquanto o SARIMA(0,1,1)(0,1,1)12 conciliou parcimônia e estabilidade, sendo o mais indicado para aplicações operacionais. O Holt–Winters, por sua vez, obteve o maior R^2 (0,54) e menores erros absolutos e quadráticos, mas com suavização excessiva, que reduz a precisão em eventos extremos.

Portanto, embora o Holt–Winters apresente bom desempenho estatístico, o SARIMA(0,1,1)(0,1,1)12 se mostra o modelo mais indicado para descrever a dinâmica pluviométrica da Bacia do Rio Formoso, especialmente por equilibrar robustez, interpretabilidade e capacidade de predição sazonal.

A análise dos meses de outubro e novembro, período de transição entre a estiagem e o regime chuvoso, confirma essa superioridade: o modelo SARIMA reproduziu com maior fidelidade a retomada das chuvas, enquanto o ARIMA apresentou defasagem temporal e subestimou volumes precipitados. Essa diferença

comprova que a inclusão do componente autorregressivo e sazonal amplia a capacidade inferencial do modelo, permitindo tomadas de decisão mais assertivas no planejamento de irrigação, controle de reservatórios e gestão de riscos climáticos. Assim, o SARIMA emerge como uma ferramenta estratégica para a gestão hídrica inteligente no contexto da Agroenergia Digital.

3.3.10 Justificativa para a Escolha do Modelo SARIMA em Detimento do Holt–Winters

Embora o método Holt–Winters tenha apresentado desempenho satisfatório em métricas de curto prazo, sua estrutura baseada em suavização exponencial tende a reduzir a sensibilidade diante de variações abruptas, o que limita sua aplicabilidade em séries pluviométricas com anomalias climáticas. No caso da Bacia do Rio Formoso (TO), verificaram-se eventos extremos, como a seca severa de 2016, que provocaram quebras no padrão sazonal. Nesses contextos, o Holt–Winters tende a “amortecer” os choques, resultando em previsões excessivamente suavizadas e, portanto, menos representativas da realidade hidrológica regional.

O modelo SARIMA (0,1,1)(0,1,1)12, por sua vez, mostrou-se mais robusto e estatisticamente consistente, uma vez que incorpora termos autorregressivos (AR) e de média móvel (MA), inclusive nos componentes sazonais, possibilitando capturar dependências temporais e responder com maior precisão às flutuações bruscas de precipitação. Além disso, apresentou menores valores de AIC e BIC, resíduos sem autocorrelação significativa e maior capacidade de generalização para previsões fora da amostra (2017).

Assim, a escolha do SARIMA em detrimento do Holt–Winters se justifica por três fatores principais:

- Estrutura analítica mais completa, com capacidade de representar a memória temporal e sazonalidade complexa da série;
- Maior aderência aos picos e choques climáticos, reduzindo subestimações em anos anômalos;
- Melhor desempenho estatístico, comprovado por menores erros de previsão e resíduos mais estáveis.

Em síntese, o modelo SARIMA demonstrou maior robustez e confiabilidade preditiva, sendo o mais adequado para representar a precipitação mensal na Bacia do Rio Formoso e subsidiar decisões estratégicas na gestão hídrica e agroenergética, no contexto da Agroenergia Digital.

Sua aplicação transcende o campo acadêmico, apresentando relevância prática e comercial significativa. Do ponto de vista científico, o modelo contribui para o avanço das pesquisas em modelagem hidrometeorológica, fortalecendo a produção de conhecimento aplicada à previsão de eventos climáticos extremos (SANTIAGO *et al.*, 2025). No âmbito comercial e produtivo, fornece aos produtores rurais, gestores e cooperativas agrícolas uma ferramenta precisa para planejar safras, otimizar o uso de recursos hídricos, reduzir perdas e aumentar a eficiência energética em sistemas de irrigação e manejo do solo (SOUZA *et al.*, 2025).

Assim, o uso do SARIMA consolida-se como uma solução de alto valor agregado, capaz de transformar dados climáticos em inteligência operacional, promovendo a integração entre ciência, tecnologia e agronegócio sustentável. Essa abordagem reforça o papel estratégico da agricultura digital como vetor de inovação e competitividade, contribuindo para a resiliência produtiva do campo e para a sustentabilidade econômica e ambiental do setor agroenergético.

3.4 Análise descritiva da precipitação hídrica

A análise descritiva da precipitação hídrica constitui uma etapa essencial para a compreensão do regime pluviométrico e para o embasamento de modelos preditivos aplicados à gestão hídrica. Estudos recentes têm reforçado a relevância da análise estatística e do uso de séries temporais para caracterizar padrões espaciais e temporais da precipitação em bacias hidrográficas distintas, especialmente diante das alterações climáticas e da variabilidade interanual observada (CARDOSO *et al.*, 2024).

Trabalhos como o de Silva *et al.* (2022) destacam os impactos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas florestais, influenciando diretamente os regimes de chuva, enquanto Marques *et al.* (2021) discutem a relação entre distribuição geográfica e variabilidade climática, mesmo em estudos voltados à ecologia de vetores, evidenciando a aplicabilidade transversal da modelagem de precipitação.

Na região do MATOPIBA, Araujo *et al.* (2025) demonstraram a utilidade do sensoriamento remoto para análise hidrológica em larga escala, reforçando a importância de dados consistentes e métodos de interpolação espacial e temporal. De forma semelhante, Correia *et al.* (2025) e Teixeira (2025) utilizaram modelagens probabilísticas e propriedades estatísticas de séries históricas para avaliar extremos pluviométricos em diferentes escalas. Esses estudos evidenciam que a representação precisa da variabilidade interanual da chuva é crucial para o planejamento agrícola e energético em regiões tropicais.

Autores como Cyterski *et al.* (2022), Liu *et al.* (2024) e Zhou *et al.* (2022) também reforçam a eficácia de abordagens preditivas que integram algoritmos de aprendizado de máquina e dados históricos para previsão de precipitação e de eventos extremos, contribuindo para uma gestão hídrica mais eficiente e resiliente.

Nesse sentido, os resultados obtidos para a Bacia do Rio Formoso (TO) revelam a relevância de tais análises. A ausência quase total de chuvas em 2016, configurando um evento extremo compatível com as projeções de intensificação da variabilidade climática, e a irregularidade registrada no período entre 2012 e 2016 mostram-se coerentes com a literatura que aponta para padrões crescentes de irregularidade e de estiagens críticas (CAVUS; STAHL; AKSOY, 2022; DIODATO; BELLOCCHI, 2023). Esses achados reforçam a importância da antecipação de anomalias pluviométricas, uma vez que eventos desse porte comprometem diretamente o abastecimento hídrico, a irrigação e a produção de biomassa energética.

Assim, evidencia-se a necessidade do uso de ferramentas analíticas robustas, como o modelo SARIMA adotado nesta pesquisa, capazes de apoiar a previsão e o manejo sustentável da água no contexto da agroenergia digital e do planejamento climático adaptativo no Cerrado.

Com base na série histórica analisada, foi elaborada a Tabela 6, que apresenta a frequência de ocorrência de chuvas por mês ao longo dos anos observados.

Tabela 6 - Frequência mensal de ocorrência de chuva na Bacia do Rio Formoso (TO) 2012 – 2016.

CHUVA	FREQUÊNCIA	PROPORÇÃO	PORCENTAGEM
Jan	4	0,102564103	10,26%
Fev	4	0,102564103	10,26%
Mar	5	0,128205128	12,82%
Abr	5	0,128205128	12,82%
Mai	4	0,102564103	10,26%
Jun	1	0,025641026	2,56%
Jul	0	0	0,00%
Ago	0	0	0,00%
Set	4	0,102564103	10,26%
Out	4	0,102564103	10,26%
Nov	4	0,102564103	10,26%
Dez	4	0,102564103	10,26%
Total	39	1	100%

Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025).

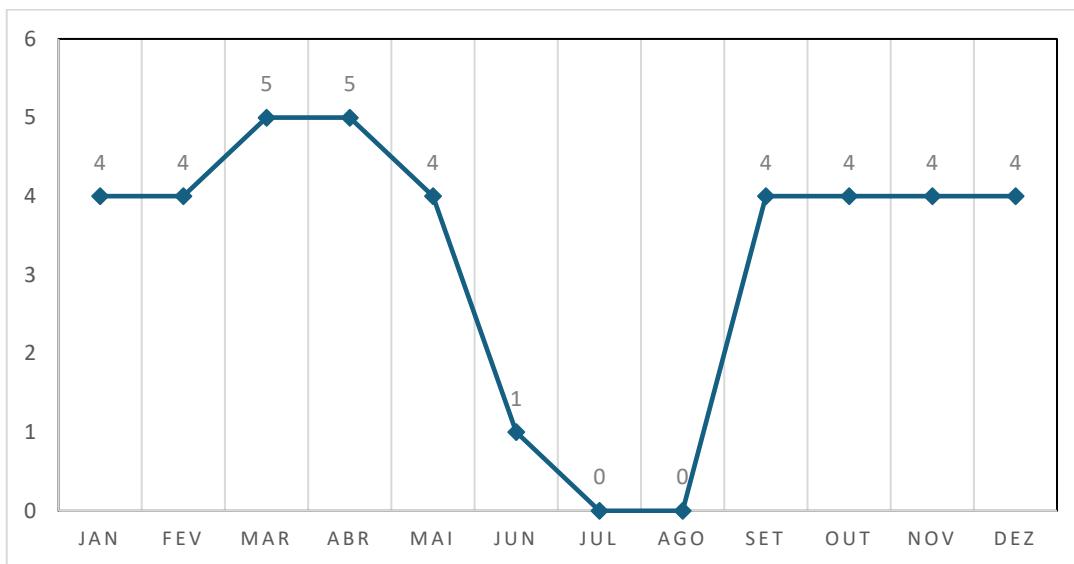
A Tabela 6 apresenta a frequência absoluta e relativa da ocorrência de chuvas nos diferentes meses do ano, no período de 2012 a 2016. Os resultados evidenciam um regime pluviométrico sazonal típico do Cerrado brasileiro, com uma estação chuvosa bem definida e um período seco marcado.

A concentração das chuvas ocorre principalmente entre janeiro e abril, que juntos somam 46,16% dos registros. Os meses de março e abril se destacaram como os mais chuvosos, com 12,82% cada, seguidos de janeiro, fevereiro, maio, setembro, outubro, novembro e dezembro, todos com 10,26%.

Nos meses de junho a agosto observa-se forte redução da precipitação, com junho registrando apenas 2,56% e julho e agosto apresentando ausência total de chuvas (0%). Essa distribuição reforça a alternância entre estação úmida e seca, característica central do bioma Cerrado.

Assim, os dados confirmam que o período chuvoso se concentra no primeiro quadrimestre do ano, enquanto o trimestre junho-agosto corresponde ao auge da estiagem, conforme ilustrado nos Gráficos 15 a 17.

Gráfico 15 - Frequência de meses com ocorrência de chuva por ano 2012 – 2016.



Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025).

O Gráfico 15 ilustra, por meio de colunas, o número de meses com registros de precipitação ao longo de cada ano entre 2012 e 2016. Esse gráfico reforça a variabilidade interanual do regime de chuvas na Bacia do Rio Formoso, permitindo identificar períodos com distribuição pluviométrica mais uniforme e outros com maior concentração de precipitação em poucos meses.

Destaca-se o ano de 2016, inicialmente indicado com zero meses de chuva. Contudo, essa informação não representa a realidade observada, uma vez que ocorreram precipitações de baixo volume, cujos índices foram inferiores ao limite mínimo de detecção do sistema, sendo automaticamente registrados como valor zero. Tais ocorrências, embora de baixa relevância hidrológica, não configuram ausência total de chuva.

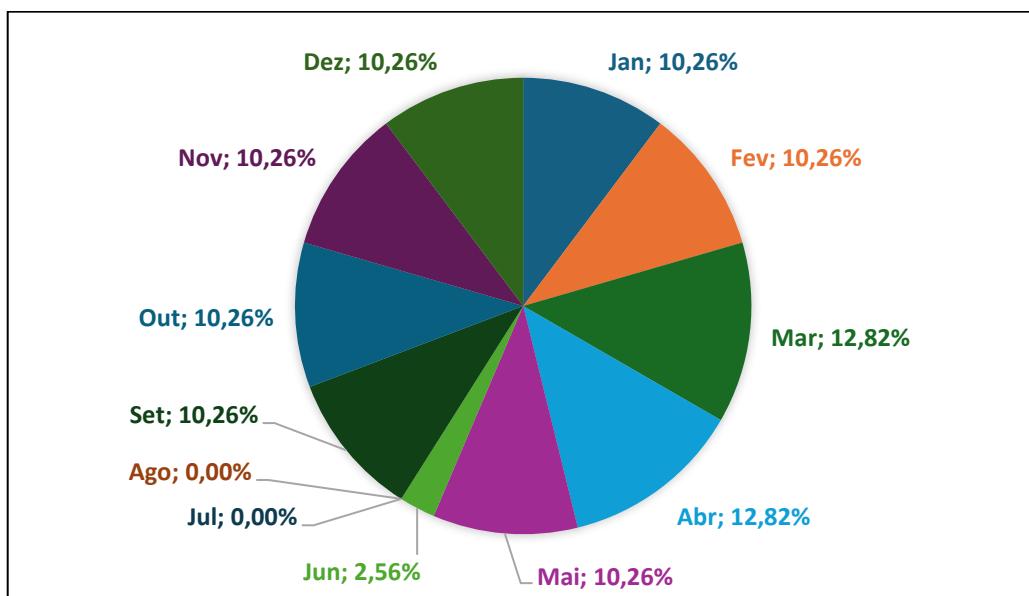
Recomenda-se, portanto, a revisão e calibração dos limiares de detecção do sistema para evitar interpretações equivocadas de valores ínfimos como ausência de precipitação, visto que essa distorção pode comprometer a leitura da variabilidade anual e a confiabilidade de análises futuras.

Contudo, é importante salientar que essa limitação não afeta os resultados obtidos neste trabalho, uma vez que os modelos foram calibrados com base em séries consolidadas e testados por métricas robustas de desempenho. A ocorrência apenas acende um alerta para estudos posteriores, que poderão incorporar mecanismos de correção e validação cruzada mais sensíveis a baixos volumes pluviométricos,

assegurando ainda mais precisão às projeções hidrológicas e à tomada de decisão no contexto da Agroenergia Digital.

Do ponto de vista comercial e produtivo, a aplicação prática desses resultados oferece vantagens diretas ao agricultor e ao gestor rural. O uso de modelos preditivos como o SARIMA possibilita planejar o calendário agrícola com maior segurança, ajustando o momento ideal de plantio, irrigação e colheita conforme as tendências de chuva previstas. Essa previsibilidade reduz custos operacionais, otimiza o uso da água e insumos, e minimiza perdas em períodos de estiagem ou excesso hídrico. Assim, a integração entre ciência climática e gestão rural inteligente transforma o conhecimento técnico em lucro sustentável, fortalecendo o protagonismo do produtor na era da agroenergia digital e da agricultura 4.0.

Gráfico 16 - Distribuição percentual da precipitação anual (2012-2016)

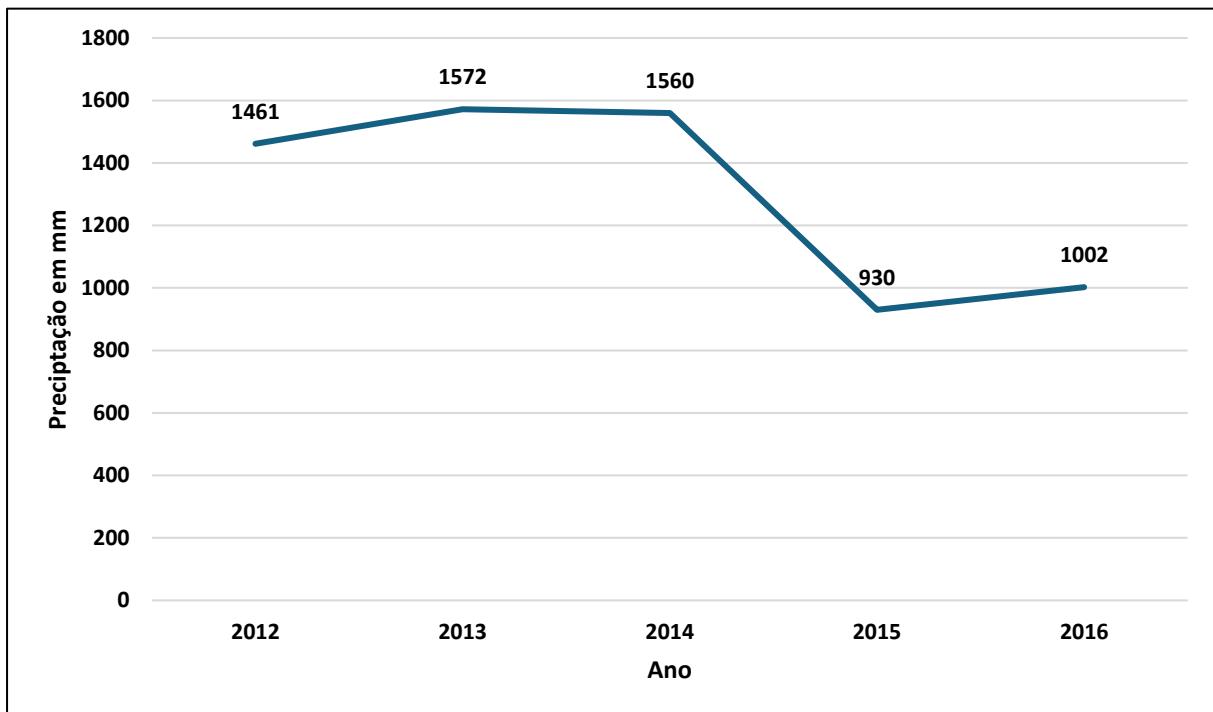


Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025).

O Gráfico 16 apresenta um gráfico de pizza com a proporção percentual da ocorrência de chuvas por ano, indicando a contribuição relativa de cada ano para o total de chuvas registradas no período estudado. Observa-se que anos como 2012, 2013 teve maior participação no volume total de chuvas, enquanto 2016 não apresentou nenhuma contribuição. Essa visualização permite avaliar a desigualdade na distribuição anual das chuvas, apontando para a necessidade de instrumentos preditivos e políticas públicas voltadas à gestão da escassez hídrica.

A distribuição percentual da chuva ao longo do ano evidencia um regime sazonal bem definido, com total ausência de chuvas nos meses de julho e agosto. Este padrão é compatível com o clima típico da região do Tocantins, que apresenta uma estação seca acentuada no meio do ano.

Gráfico 17 - Densidade de chuva anual na Bacia do Rio Formoso (2012–2016)



Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025).

O Gráfico 17 apresenta a distribuição da precipitação anual (mm) registrada no período de 2012 a 2016 na Bacia do Rio Formoso. Observa-se a ocorrência de flutuações significativas no regime hídrico, com anos de maior intensidade pluviométrica intercalados por períodos de forte redução. O ano de 2015 destacou-se como o mais crítico, com ausência total de precipitação, possivelmente associada à influência de fenômenos climáticos de larga escala, como o El Niño, que impactam diretamente a dinâmica hídrica regional.

A análise desse comportamento evidencia a relevância de métodos estatísticos de séries temporais para compreender e projetar a variabilidade pluviométrica. Entre os modelos testados, o SARIMA (0,1,1)(0,1,1)12, apresentou o melhor desempenho, por captar adequadamente tanto a sazonalidade quanto a variabilidade interanual da série. Embora apresente restrições quanto à previsão de eventos extremos, o modelo

demonstrou potencial para subsidiar estratégias de gestão de recursos hídricos e planejamento agroenergético, contribuindo para a mitigação de riscos relacionados a secas e enchentes.

As variações interanuais e sazonais de precipitação observadas entre 2012 e 2016 evidenciam tanto períodos de abundância quanto eventos críticos de escassez hídrica. Essa instabilidade reforça a necessidade de aplicação de modelos preditivos de séries temporais, como o ARIMA e o SARIMA, capazes de fornecer estimativas mais precisas e adaptadas às dinâmicas locais. Além de contribuir para a compreensão científica do regime pluviométrico da Bacia do Rio Formoso, tais ferramentas têm potencial de apoiar decisões estratégicas voltadas à gestão dos recursos hídricos e ao planejamento agroenergético, ampliando a resiliência produtiva e ambiental da região.

3.5 Aplicabilidade dos resultados às políticas públicas

Além das contribuições técnicas e científicas já discutidas, os resultados desta pesquisa dialogam diretamente com os instrumentos de políticas públicas voltadas à gestão hídrica e à agroenergia. A modelagem preditiva da precipitação hídrica por meio do modelo SARIMA, aplicada à Bacia do Rio Formoso, apresenta forte potencial de aplicação na elaboração de outorgas de uso da água, na gestão adaptativa de bacias críticas e na formulação de políticas agrícolas e energéticas sustentáveis.

Os dados preditivos gerados por este estudo podem subsidiar decisões estratégicas por parte dos órgãos gestores, especialmente no que se refere à distribuição racional da água durante períodos de estiagem, à definição de zonas de restrição de uso hídrico temporárias, e ao ajuste do calendário de irrigação em cultivos energéticos. Essas aplicações estão alinhadas aos princípios estabelecidos pela Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997), pelo Plano Estadual de Recursos Hídricos do Tocantins (GOVERNO DO TOCANTINS, 2020) e pelo Plano Nacional de Agroenergia (MAPA, 2020).

Dessa forma, reforça-se que o presente trabalho não apenas contribui para o avanço científico no campo da modelagem preditiva, mas também fortalece a ponte entre ciência de dados e gestão pública, ao oferecer subsídios concretos para a

integração entre a previsão hidrológica e a formulação de políticas públicas voltadas à segurança hídrica e energética no Cerrado brasileiro.

Quadro 4 - Políticas públicas relacionadas à gestão hídrica e agroenergia na Bacia do Rio Formoso

INSTRUMENTO/ POLÍTICA	ÂMBITO	ÓRGÃO RESPONSÁVEL	APLICAÇÕES RELEVANTES PARA A DISSERTAÇÃO
Lei nº 9.433/1997 – Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH)	Federal	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)	Estabelece os fundamentos da gestão hídrica no Brasil, incluindo outorga, cobrança e planos de bacia.
Lei nº 1.307/2002 – Política Estadual de Recursos Hídricos do Tocantins	Estadual	Instituto Natureza do Tocantins (NATURATINS)	Define diretrizes locais para o uso e controle das águas, priorizando irrigação, abastecimento e energia.
Decreto nº 2.432/2005 – Regulamenta a outorga no Tocantins	Estadual	NATURATINS	Estabelece regras para concessão, prazos, critérios de vazão e monitoramento das outorgas no estado.
Plano Estadual de Recursos Hídricos do Tocantins (PERH/TO)	Estadual	SEMARH/TO	Instrumento de planejamento hídrico que orienta decisões sobre uso e conservação das águas em todo o estado.
Plano Nacional de Agroenergia (2020–2030)	Federal	Ministério da Agricultura (MAPA)	Estabelece metas para produção de biocombustíveis e incentiva o uso eficiente de recursos naturais.
Zoneamento Agroecológico (ZAE)	Federal/ Estadual	MAPA / EMBRAPA / MCTI	Ferramenta técnico-científica que orienta o cultivo de biomassa com base em aptidão hídrica e climática.
Agenda 2030 – ODS 6, 7, 13 e 15	Internacional	ONU / Governo Federal	Define compromissos globais com sustentabilidade hídrica, energia limpa, combate à mudança climática e biodiversidade.

Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025).

O Quadro 4 apresenta os principais instrumentos normativos e políticas públicas que orientam a gestão de recursos hídricos e o desenvolvimento da agroenergia no Brasil, com ênfase no estado do Tocantins. Esses instrumentos dialogam diretamente com os resultados obtidos nesta pesquisa, na medida em que definem diretrizes técnicas, legais e operacionais para o uso racional da água, concessão de outorgas, planejamento agroecológico e segurança energética.

No âmbito federal, destaca-se a Lei n.º 9.433/1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e estabelece os fundamentos da gestão

descentralizada e participativa da água, incluindo a exigência de outorga e a elaboração dos Planos de Bacia. Essa lei é operacionalizada por órgãos como a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), e fornece base legal para as aplicações do modelo SARIMA no contexto da previsão hidrológica aplicada à outorga e ao planejamento.

Em nível estadual, o Plano Estadual de Recursos Hídricos do Tocantins (PERH/TO) e o Decreto Estadual n.^o 2.432/2005, que regulamenta a outorga no estado, são instrumentos essenciais para a operacionalização da gestão hídrica. Os resultados preditivos obtidos com a modelagem estatística podem subsidiar tais políticas ao fornecer subsídios técnicos para decisões quanto à concessão, restrição ou renovação de outorgas de uso da água, especialmente em bacias hidrográficas de uso intensivo como a do Rio Formoso.

No que diz respeito à agroenergia, o Plano Nacional de Agroenergia (2020–2030) e o Zoneamento Agroecológico (ZAE) destacam-se como mecanismos estratégicos para o desenvolvimento sustentável da produção de biomassa e biocombustíveis no Brasil. A integração dos resultados da modelagem preditiva com essas políticas contribui para o planejamento agrícola baseado em dados climáticos, favorecendo o uso eficiente da terra e da água em regiões com alta aptidão agroclimática para culturas energéticas.

Por fim, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU , notadamente os ODS 6 (água potável e saneamento), 7 (energia limpa e acessível), 13 (ação contra a mudança global do clima) e 15 (vida terrestre), servem como referência global para alinhar os resultados técnicos da pesquisa com compromissos internacionais de sustentabilidade (IPEA, 2019).

Assim, observa-se que os dados obtidos e analisados neste trabalho não apenas atendem aos objetivos científicos da modelagem preditiva, mas também fortalecem o arcabouço de políticas públicas voltadas à segurança hídrica e energética, promovendo uma gestão territorial mais racional, preventiva e eficiente.

Um ponto central de diferenciação desta pesquisa em relação às previsões comerciais, como as disponibilizadas por plataformas meteorológicas amplas, reside na especificidade metodológica e territorial da análise. Enquanto os serviços comerciais fornecem previsões generalistas, esta dissertação aplicou técnicas científicas de modelagem estatística (ARIMA e SARIMA) a dados locais da plataforma GAN, diretamente relacionados à Bacia do Rio Formoso, SARIMA conseguiu captar

melhor a sazonalidade interrompida em 2016, ao contrário do ARIMA, reforçando sua adequação em cenários críticos.

Essa abordagem personalizada confere maior representatividade às séries históricas, incorporando as particularidades hidrológicas e climáticas da região, e garante validação transparente por meio de métricas estatísticas (RMSE, MAE e R²). Além disso, os resultados não se restringem à previsão do tempo, mas subsidiam a tomada de decisão em gestão hídrica e agroenergia, orientando estratégias de irrigação, outorga de recursos hídricos e zoneamento agroecológico, o que reforça o caráter inovador e aplicado da pesquisa.

Um diferencial do presente estudo em relação a ferramentas comerciais de previsão meteorológica, como o Climatempo, é que aqui se utilizou uma base de dados local e específica da Bacia do Rio Formoso (plataforma GAN/UFT), validada por meio de metodologia científica replicável e orientada para aplicações em políticas públicas. Assim, não se trata apenas de prever chuvas, mas de subsidiar estratégias de gestão hídrica (como planejamento da irrigação, zoneamento agroecológico e uso eficiente da água), diretamente vinculadas à produção agroenergética e à sustentabilidade regional.

4 PERSPECTIVAS FUTURAS

Para aprofundar a avaliação estratégica dos resultados obtidos com este estudo e seus potenciais desdobramentos, apresenta-se a seguir uma análise *Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats* (SWOT). Conforme Chiavenato et. al, (2010) essa ferramenta permite identificar os principais pontos fortes e fracos da abordagem adotada, bem como as oportunidades e ameaças externas que impactam a aplicabilidade e replicabilidade dos modelos preditivos desenvolvidos.

Quadro 5 - Análise SWOT da Modelagem Preditiva SARIMA aplicada à Bacia do Rio Formoso

FORÇAS (STRENGTHS)	FRAQUEZAS (WEAKNESSES)	OPORTUNIDADES (OPPORTUNITIES)	AMEAÇAS (THREATS)
1. Alta precisão dos modelos SARIMA na previsão de séries temporais sazonais. 2. Disponibilidade de dados históricos consistentes da Bacia do Rio Formoso (plataforma GAN). 3. Capacidade de antecipação de eventos extremos (secas/enchentes), subsidiando ações preventivas.	1. Limitação temporal da base de dados (2012–2016). 2. Ausência de variáveis complementares, como umidade do solo, cobertura vegetal e índices climáticos globais. 3. Dependência de validação contínua dos modelos para outras bacias.	1. Expansão da modelagem para outras bacias hidrográficas do MATOPIBA. 2. Integração com painéis interativos e dados de sensoriamento remoto (MODIS, TRMM, ERA5). 3. Contribuição direta para políticas públicas e estratégias de gestão hídrica e agroenergética mais eficientes.	1. Mudanças climáticas intensificam a variabilidade dos padrões históricos. 2. Insuficiência de investimentos em infraestrutura de monitoramento climático. 3. Baixa capacitação técnica de gestores e agricultores locais para uso das tecnologias preditivas.

Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025).

A análise SWOT, no Quadro 5, evidencia que a modelagem preditiva por séries temporais apresenta forte potencial de aplicação na gestão hídrica, especialmente quando aliada à ampliação do escopo geográfico e à integração de novas variáveis ambientais. No entanto, também aponta desafios relevantes, como a necessidade de bases de dados mais amplas e o fortalecimento das capacidades locais. Esses elementos devem orientar futuros aprimoramentos técnicos e institucionais no campo da previsão hidrometeorológica aplicada à agroenergia.

Os resultados obtidos neste estudo demonstram o potencial da modelagem preditiva aplicada à precipitação hídrica como ferramenta estratégica para a gestão

hídrica no contexto da agroenergia digital. A partir disso, algumas perspectivas futuras podem ser delineadas para ampliar e aprofundar os impactos positivos desta abordagem.

Uma das possibilidades mais promissoras é a ampliação do escopo de análise para outras bacias hidrográficas do MATOPIBA, região de expressiva importância agroambiental e que enfrenta desafios relacionados à variabilidade climática e à disponibilidade hídrica. Estudos como o de Araújo *et al.* (2025) já demonstraram a viabilidade da utilização de sensoriamento remoto para gerar curvas de permanência de vazões em bacias da região, reforçando a aplicabilidade de modelos preditivos em larga escala.

Além disso, a integração de variáveis complementares como umidade do solo, radiação solar e cobertura do uso do solo tende a aumentar a precisão dos modelos. Liu *et al.* (2024) destacam que a incorporação de dados heterogêneos melhora a modelagem da não estacionariedade da precipitação extrema, permitindo uma previsão mais robusta e adaptada às mudanças climáticas.

Outro desdobramento relevante é o desenvolvimento de plataformas interativas e painéis em tempo real, voltados a gestores públicos e agricultores, como mecanismo de democratização da informação e apoio à tomada de decisão. Essa estratégia, sugerida por autores como Idowu *et al.* (2025), favorece a operacionalização das previsões em territórios com baixa densidade de estações meteorológicas.

Do ponto de vista técnico, o avanço das técnicas de inteligência artificial aponta para a adoção de modelos mais avançados, como redes neurais convolucionais (CNN) e transformers, que apresentam alta capacidade de aprendizado com múltiplas variáveis simultâneas. Zhou *et al.* (2022) e Wu *et al.* (2023) demonstram que tais abordagens superam os modelos tradicionais em cenários complexos de previsão de curto prazo, como eventos extremos de chuva ou seca.

Essas aplicações convergem para o fortalecimento das políticas públicas voltadas à segurança hídrica, como o Plano Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 2006), a Política Nacional de Segurança Hídrica e o Zoneamento Agroecológico da Agroenergia. Segundo Silva *et al.* (2023), a base técnico-científica gerada por estudos preditivos é essencial para o planejamento hídrico estratégico e para a definição de zonas produtivas resilientes.

Dessa forma, as perspectivas futuras aqui delineadas evidenciam a relevância da integração entre ciência de dados, geotecnologias e políticas públicas,

promovendo inovação e sustentabilidade na governança hídrica e energética do Brasil, especialmente em regiões de alta vulnerabilidade climática.

Essas perspectivas fortalecem o papel da ciência de dados na governança hídrica, especialmente em contextos de vulnerabilidade climática, contribuindo para a inovação nos territórios agroenergéticos do Brasil.

Como continuidade desta pesquisa, recomenda-se ampliar a base de dados utilizada, incorporando variáveis hidrológicas e climáticas complementares, como vazão dos rios, umidade do solo e radiação solar, disponíveis na própria plataforma GAN. Adicionalmente, a integração com fontes de sensoriamento remoto, como os sensores MODIS e TRMM, e com dados de reanálise climática, como o ERA5, permitirá séries temporais mais extensas e robustas, essenciais para análises de tendências de longo prazo. Tais bases poderão subsidiar estudos voltados às mudanças climáticas, incluindo a aplicação de testes estatísticos de detecção de tendências (como *Mann-Kendall*) e a análise de cenários projetados pelo IPCC para os horizontes de 2050 e 2070. A incorporação dessas variáveis fortalecerá a modelagem hidroclimática, possibilitando diagnósticos mais abrangentes sobre os impactos da variabilidade climática e das mudanças globais no contexto da Bacia do Rio Formoso.

Por fim, vislumbra-se a possibilidade de integração das previsões geradas em sistemas de apoio à decisão. Ao vincular os modelos desenvolvidos nesta pesquisa à plataforma GAN, pode-se conceber painéis interativos e dashboards em tempo real, capazes de subsidiar gestores públicos, agricultores e empreendedores da agroenergia. Essa integração permitirá não apenas prever precipitação, mas também oferecer recomendações práticas para o manejo da irrigação, o zoneamento agroecológico e a outorga de recursos hídricos, aproximando a pesquisa acadêmica das demandas sociais e produtivas da região.

Assim, as perspectivas aqui delineadas reforçam que, embora esta dissertação tenha se concentrado nos modelos ARIMA e SARIMA, o futuro da modelagem preditiva no setor agroenergético aponta para a adoção de abordagens multivariadas, apoiadas em grandes bases de dados (Big Data), integração de Inteligência Artificial (IA) e análises climáticas de longo prazo. Essas inovações permitirão gerar previsões mais precisas e abrangentes, ampliando o uso estratégico da informação para o planejamento hídrico, agrícola e energético.

A incorporação de algoritmos de aprendizado de máquina (Machine Learning) e redes neurais profundas (Deep Learning) representa um passo natural na evolução das metodologias aplicadas à previsão climática, possibilitando identificar padrões complexos e antecipar cenários críticos com maior confiabilidade. Essa integração entre dados meteorológicos, geoespaciais e produtivos tende a fortalecer a inteligência territorial do agronegócio, conectando o conhecimento científico à inovação tecnológica e à tomada de decisão no campo.

Do ponto de vista econômico e institucional, abre-se um cenário fértil para o investimento em soluções de tecnologia climática, parcerias público-privadas, incubação de startups agroclimáticas e projetos de inovação verde. O uso comercial dessas ferramentas pode impulsionar programas de seguro rural inteligente, gestão eficiente de irrigação, monitoramento de carbono agrícola e planejamento energético baseado em previsões meteorológicas de alta precisão.

Ao transformar a previsão climática em ativo econômico e estratégico, a modelagem preditiva consolida-se como uma ferramenta de investimento sustentável, com alto potencial de retorno ambiental e financeiro. Essa integração entre ciência, tecnologia e mercado contribui diretamente para a segurança hídrica, a redução de riscos climáticos e a sustentabilidade da agroenergia digital, posicionando o Cerrado brasileiro como um polo de inovação agroclimática e competitividade global.

4.1 Aplicabilidade da modelagem preditiva na agroenergia digital: conexões com biocombustíveis, irrigação e zoneamento

A integração de modelos preditivos de precipitação, como o SARIMA(0,1,1)(0,1,1)12, à gestão hídrica em bacias agrícolas tropicais apresenta impactos diretos e estratégicos para o setor de agroenergia digital. Nesse contexto, delineia-se um roadmap de perspectivas futuras, que articula avanços técnicos e institucionais em quatro etapas interdependentes, conforme Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma estratégico para a Evolução da modelagem preditiva



Fonte: Elaboração própria. Dados da pesquisa (2025).

O fluxograma proposto, apresentado na Figura 8, estrutura os caminhos futuros da pesquisa em quatro etapas principais, que vão desde a ampliação da base de dados até o suporte a políticas públicas e cadeias agroenergéticas.

1) Ampliação da base de dados

O primeiro passo consiste na incorporação de variáveis hidrológicas e climáticas adicionais, como vazão, umidade do solo, radiação solar e dados de sensoriamento remoto (MODIS, TRMM, ERA5). Essa expansão tende a reduzir incertezas e aprimorar a robustez dos modelos, permitindo análises mais completas sobre tendências e extremos climáticos, incluindo eventos críticos como a seca de 2016, representativa do aumento da variabilidade climática.

2) Aplicação de Inteligência Artificial

Na segunda etapa, prevê-se a aplicação de técnicas avançadas de Inteligência Artificial (IA), especialmente redes neurais recorrentes (LSTM), convolucionais (CNN), modelos baseados em Transformers e abordagens híbridas. Tais métodos têm demonstrado desempenho superior aos modelos estatísticos tradicionais na previsão de eventos extremos e variabilidade pluviométrica (ZHOU *et al.*, 2022; WU *et al.*, 2023).

3) Integração com a plataforma GAN

A terceira etapa refere-se à integração das previsões com a plataforma GAN, permitindo a disponibilização dos resultados em painéis interativos e dashboards em tempo real. Esse processo democratiza o acesso às informações e possibilita sua aplicação direta por agricultores, gestores públicos e operadores de irrigação, favorecendo a adoção de práticas mais eficientes de manejo hídrico.

4) Apoio às políticas públicas e cadeias agroenergéticas

Por fim, a quarta etapa contempla o uso das previsões como subsídio para políticas públicas e cadeias agroenergéticas. A incorporação das informações em instrumentos como o Zoneamento Agroecológico da Agroenergia e os planos de recursos hídricos fortalece a governança hídrica e energética (BRASIL, 1997; GOVERNO DO TOCANTINS, 2020).

No contexto dos biocombustíveis de segunda geração (2G), a variabilidade na oferta de matéria-prima agrícola (palha de arroz, sorgo sacarino, resíduos de cana, capim-elefante) está diretamente relacionada ao regime pluviométrico. A previsibilidade da precipitação permite antecipar cenários de risco hídrico e ajustar o calendário agrícola e de irrigação, assegurando a produtividade e a qualidade da biomassa. Conforme Yamazaki *et al.* (2017), o acesso a séries temporais meteorológicas confiáveis favorece decisões operacionais mais precisas, otimizando tanto a irrigação quanto a colheita de culturas voltadas à bioenergia.

Os dados gerados pelo modelo SARIMA(0,1,1)(0,1,1)12 podem ser utilizados como insumo em sistemas de apoio à decisão agrícola, orientando o uso racional da água em períodos críticos, aspecto relevante no Cerrado Tocantinense (BARROS, 2023; BORGES *et al.*, 2022). A previsão antecipada de anomalias pluviométricas possibilita, por exemplo, modular sistemas de irrigação pressurizada ou definir janelas de plantio compatíveis com a recarga hídrica esperada, como já demonstrado por Castro *et al.* (2023) no Paraná.

Adicionalmente, as séries preditivas podem alimentar modelos espaciais que subsidiam o zoneamento agroecológico da agroenergia, definindo áreas aptas ou restritas ao cultivo de biomassa com base em índices hídricos, sazonalidade climática e risco de déficit hídrico (OLIVEIRA *et al.*, 2025).

Assim, a modelagem aplicada à Bacia do Rio Formoso transcende a previsão pluviométrica e integra-se a um ecossistema de informações voltadas à sustentabilidade hídrica e energética. O cruzamento entre previsões climáticas, sensores locais (GAN) e algoritmos de decisão caracteriza uma nova fronteira para a agroenergia digital no Cerrado brasileiro (SHERLY *et al.*, 2025), em consonância com os princípios da Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997) e do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Tocantins (GOVERNO DO TOCANTINS, 2020).

5 CONCLUSÕES

A partir da análise dos dados coletados pelo Projeto GAN na Bacia do Rio Formoso (TO), constatou-se que a aplicação do modelo SARIMA apresentou resultados consistentes e robustos na previsão da precipitação hídrica, possibilitando a identificação de padrões sazonais e tendências ao longo do período estudado. Entre as diferentes configurações testadas, o modelo SARIMA(0,1,1)(0,1,1)12 revelou-se o mais adequado, por apresentar menores valores de AIC e BIC, resíduos sem autocorrelação significativa e métricas de erro (MAPE e RMSE) compatíveis com os padrões aceitos na modelagem de séries temporais. Esses resultados confirmam sua capacidade de capturar simultaneamente a tendência e a sazonalidade anual da precipitação, reforçando sua confiabilidade como instrumento de apoio ao planejamento hídrico e à gestão de recursos naturais.

Além disso, a integração das previsões de chuva com a logística de aproveitamento de resíduos agrícolas demonstrou importante potencial para a produção de biocombustíveis de segunda geração (2G). A associação entre a disponibilidade temporal de resíduos e os cenários pluviométricos projetados mostrou-se estratégica para otimizar o armazenamento, transporte e processamento desses materiais, ampliando a eficiência energética, econômica e ambiental do sistema agroindustrial.

Os resultados confirmam, portanto, o atendimento pleno ao objetivo geral e aos objetivos específicos da pesquisa, que contemplaram a coleta e organização dos dados históricos, a implementação e ajuste dos modelos, a validação das previsões com métricas adequadas e a análise da integração entre cenários climáticos e gestão agroenergética. O uso de ferramentas quantitativas avançadas, aliado a dados reais de monitoramento ambiental, representa um recurso valioso para a gestão integrada da água e dos resíduos agrícolas, fortalecendo políticas de sustentabilidade e ampliando o potencial da bioenergia em escala regional.

Do ponto de vista acadêmico, a pesquisa reforça a importância da modelagem preditiva como campo de estudo essencial para a ciência climática aplicada à agroenergia, contribuindo com metodologias replicáveis e com validação científica sólida no contexto da Agroenergia Digital. Sob a ótica comercial e produtiva, os resultados oferecem aplicações diretas para o produtor rural, permitindo o planejamento antecipado das safras, a otimização do uso da água, a redução de

custos operacionais e o aumento da eficiência no manejo agrícola e energético. O uso do SARIMA como ferramenta preditiva de baixo custo e alta aplicabilidade prática traduz-se em vantagem competitiva, estimulando a adoção de tecnologias de agricultura digital e sistemas inteligentes de apoio à decisão.

Conclui-se, ainda, que o modelo SARIMA demonstrou-se adequado, robusto e comercialmente relevante para representar a precipitação sazonal na Bacia do Rio Formoso, embora o estudo evidencie limitações decorrentes da curta série temporal e da análise restrita a uma única variável (precipitação). A integração de novas bases de dados, de variáveis complementares (como vazão, temperatura e umidade do solo) e de técnicas de aprendizado de máquina (Machine Learning e Deep Learning) configura um caminho promissor para ampliar a acurácia e aplicabilidade das previsões em contextos agroenergéticos complexos.

Por fim, o diferencial desta pesquisa, em relação a previsões comerciais genéricas, reside na utilização de dados locais provenientes do sistema GAN, na validação científica rigorosa e na aplicação direta ao planejamento hídrico e agroenergético da região, o que garante maior precisão regional, relevância prática e contribuição efetiva para políticas públicas e inovação tecnológica no setor agroenergético. Dessa forma, esta dissertação consolida-se como uma referência científica e aplicada, conectando ciência, tecnologia e produção rural sustentável, pilares fundamentais da Agroenergia Digital e da Agricultura 4.0 no Tocantins.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2020). **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos**. Brasília: ANA, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/ana/pt-br/acesso-a-informacao>>. Acesso 30 set.2024.

ALMEIDA A.Q. de; RIBEIRO A.; PAIVA Y. G.; RASCON N. J. L.; LIMA E. P. (2011). **Geostatistics in the temporal modeling study of precipitation** (Geoestatística no estudo de modelagem temporal da precipitação). Rev bras eng agríc ambient. 2011Apr;15(4):354–8. Available from: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000400004>. (SARIMA AND "precipitation" AND "Brazil" - WoS). Disponível em:< <https://www-webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:000208666200004>> Acesso 03 de jul.2025.

ALMIKAEEL, W.; ČUBANOVÁ, L.; & ŠOLTÉSZ, A. (2022). **Hydrological Drought Forecasting Using Machine Learning-Gidra River Case Study** (Previsão de seca hidrológica usando aprendizado de máquina – estudo de caso do rio Gidra). Água, 14 (3), 387. <https://doi.org/10.3390/w14030387>. (Hydrological forecasting AND "machine learning" - WoS). Disponível em:< <https://www-webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:000760477400001>> Acesso 04 de jul.2025.

ANACHE, J. A. A. (2017). **Alterações no ciclo hidrológico e na perda de solo devido aos diferentes usos do solo e variações climáticas em área de Cerrado**. 2017. 185 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-17042018-110107/publico/ANACHE_JAA_2017.pdf> Acesso 02 out.2024.

ANOCHI, J. A (2015). **Previsão climática de precipitação por redes neurais autoconfiguradas**. São José dos Campos, 2015. Disponível em: <<http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/09.16.22.02/doc/publicacao.pdf>> Acesso: 03 out.2024.

ARAÚJO, H. L.; DUARTE, S. N.; SALVADOR C.A.; MINGOTI R.(2025). **Flow duration curve using remote sensing for river basins in the MATOPIBA region** (Curva de permanência das vazões via sensoriamento remoto de bacias hidrográficas na região do MATOPIBA). Revista Brasileira de Geografia FísicaArticle2025. DOI: 10.26848/rbgf.v18.3.p1857-1871. (Time series AND "precipitation" AND "river basin" - SCOPUS). Disponível em: <<https://www-scopus-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/pages/publications/105002646391>> Acesso 01 de jul.2025.

BADEM, A. C.; YILMAZ, R.; CESUR, M. R.; CESUR, E.(2024). **Advanced Predictive Modeling for Dam Occupancy Using Historical and Meteorological Data**. (Modelagem Preditiva Avançada para Ocupação de Barragens Utilizando Dados Históricos e Meteorológicos). Sustainability 2024, 16, 7696. <https://doi.org/10.3390/su16177696>. (Rainfall AND "predictive modeling"- WoS). Disponível em:< <https://www-webofscience>-

com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:001311413800001>
Acesso 01 de jul.2025.

BARROS, G. (2023). Em meio à disputa por água, Bacia do Rio Formoso sofre com monitoramento precário. Palmas, 2023. Disponível em:
<<https://oeco.org.br/reportagens/em-meio-a-disputa-por-agua-bacia-do-rio-formoso-sofre-com-monitoramento-precario/>>. Acesso 01 nov.2024.

BOGNER, K.; CHANG, A. Y.; BERNHARD, L.; ZAPPA, M.; MONHART, S.; & SPIRIG, C. (2022). Tercile Forecasts for Extending the Horizon of Skillful Hydrological Predictions.(Previsões Terciárias para Ampliar o Horizonte de Previsões Hidrológicas Habilidosas) *Journal of Hydrometeorology*, 23(4), 521-539. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-21-0020.1>. (Hydrological forecasting AND "machine learning" - WoS). Disponível em:< <https://www.webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:000798104200002>>
Acesso 04 de jul.2025.

BORGES, M. S.; SOUSA, E. S.; PEREIRA, F. A. A.; SANTOS, M. G.; OLIVEIRA, L. A. (2022). Conflitos e Contradições na Governança da Bacia do Rio Formoso – Tocantins – Brasil. Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional, v. 18, n. 2, p. 45-61, 2022. Disponível em:
<<https://www.rbgdr.net/revista/index.php/rbgdr/article/download/6607/1334/16748>>. Acesso 02 out.2024.

BRASIL (1997). Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Política Nacional de Recursos Hídricos e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 9 jan. 1997. Disponível em:
<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm>. Acesso 30 set.2024.

BRASIL (2024). Impacto da mudança climática nos recursos hídricos do Brasil. Brasília, 2024. Disponível em:
<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/31604c98-5bbe-4dc9-845d-998815607b33/attachments/Mudancas_Climaticas_25012024.pdf>. Acesso 02 out.2024.

CARDOSO, I. P.; SANTIAGO, M. M.; RODRIGUES, A. A.; & NUNES, A. B. (2024). Validation of precipitation data generated by ERA5 reanalysis for the Mirim-São Gonçalo watershed, Brazil. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 17(2), 824–837. (Rainfall AND "predictive modeling"- SCOPUS). Disponível em:<<https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.2.p824-837>> Acesso 01 jul.2025.

CARVALHO, A. L.; SANTOS, D. V.; MARENGO, J. A.; COUTINHO, S. M. V.; MAIA, S. M. F. (2020). Impactos de eventos climáticos extremos na produção agrícola brasileira. *Sustainability in Debate*, v. 11, n. 3, p. 197-224, 2020. Disponível em:
<<https://doi.org/10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33814>>. Acesso 04 out.2024.

CAVUS, Y., STAHL, K., & AKSOY, H. (2022). Revisiting Major Dry Periods by Rolling Time Series Analysis for Human-Water Relevance in Drought (Revisitando os principais períodos de seca por meio da análise de séries temporais contínuas para avaliar a relevância da água para o homem na seca). *Gestão de*

Recursos Hídricos , 36 (8), 2725-2739. (Time series AND "precipitation" AND "river basin" - WoS). Disponível em:< <https://www.webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:000799557500001>> Acesso 02 de jul.2025.

CBHTO (2024). **Comitês de Bacias Hidrográficas do Tocantins**. Palmas, 2024. Disponível em: <<https://cbhto.com.br/>>. Acesso 01 nov.2024.

CHIAVENATO, I., SAPIRO, A. (2010). Planejamento estratégico: fundamentos e aplicações. Brasil: Elsevier. Disponível em: <https://www.academia.edu/92950549/Chiavenato_Planejamento_Estrategico_cap> Acesso 22 ago.2024.

CHIESA, V. B.; COSTA, C. A. M.; VERGARA, F. E.(2021). **Avaliação da Efetividade dos Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos no Tocantins**. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2021. Disponível em: <<https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/4/PAP019672.pdf>>. Acesso 01 out. 2024

CORREIA, de O. F.; SOBUCKI L.; VENÂNCIO, T.D.; HISTER, G.T.; SANDRO da ROCHA, A. (2025). **Probabilistic modeling of rainfall at different time scales for Santa Helena, Paraná** (Modelagem probabilística da precipitação pluvial em diferentes escalas temporais para Santa Helena, Paraná). Revista Brasileira de Geografia Física. Article Open Access 2025. DOI: 10.26848/rbgf.v18.2.p1527-1542. (Time series AND "precipitation" AND "river basin" - SCOPUS). Disponível em: <<https://www-scopus-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/pages/publications/85218948308>> Acesso 01 de jul.2025.

COSTA, A. S.; MEDEIROS, E. S.; FRAGAL, V. H.; SILVA, A. Q.; BICALHO, C. C. (2020). **Algoritmo de machine learning para mapeamento das chuvas extremas em uma região do Nordeste Brasileiro**. Revista Brasileira de Climatologia, v. 18, n. 4, p. 429-440, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.55761/abclima.v34i20.17378>>. Acesso 04 out.2024.

COSTA, G. E. D. M. E., MENEZES FILHO, F. C. M. D., CANALES, F. A., FAVA, M. C., BRANDÃO, A. R. A., & DE PAES, R. P. (2023). **Assessment of Time Series Models for Mean Discharge Modeling and Forecasting in a Sub-Basin of the Paranaíba River Brazil** (Avaliação de Modelos de Séries Temporais para Modelagem e Previsão de Vazão Média em uma Sub-Bacia do Rio Paranaíba, Brasil). Hydrology, 10(11), 208. <https://doi.org/10.3390/hydrology10110208>. (SARIMA AND "precipitation" AND "Brazil" - WoS). Disponível em:< <https://www-webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:001113839300001>> Acesso 03 de jul.2025.

COTTA, P. (2024). Introdução ao ARIMA e SARIMA: Modelos de Séries Temporais. **Revista Medium**. Disponível em: <<https://medium.com/@paulovpcotta/introdu%C3%A7%C3%A3o-ao-arima-e-sarima-modelos-de-s%C3%A3ries-temporais-51992ae5abfd>> Acesso 03 de jul.2025.

CYTERSKI, M.; SHANKS, O.C.; WANJUGI, P.; MCMINN, B.; KORAJKIC, A.; OSHIMA, K.; & HAUGLAND, R. (2022). **Bacterial and viral fecal indicator predictive modeling at three Great Lakes recreational beach sites** (Modelagem preditiva de indicadores fecais bacterianos e virais em três praias recreativas dos Grandes Lagos). Water research , 223 , 118970. (Rainfall AND "predictive modeling"- WoS). Disponível em:< <https://www-webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:000874865900002>> Acesso 01 de jul.2025.

DIODATO, N., & BELLOCCHI, G. (2023). **From Past to Present: Decoding Precipitation Patterns in a Complex Mediterranean River Basin** (Do Passado ao Presente: Decodificando Padrões de Precipitação em uma Bacia Hidrográfica Mediterrânea Complexa). Climate , 11 (7), 141. <https://doi.org/10.3390/cli11070141>. (Time series AND "precipitation" AND "river basin" - WoS). Disponível em:< <https://www-webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:001035172700001>> Acesso 02 de jul.2025.

EL JARROUDI, M.; CHAIRI, F.; KOUADIO, L.; ANTOONS, K.; SALLAH, A.-HM; FETTWEIS, X. (2021). **Weather-Based Predictive Modeling of Cercospora beticola Infection Events in Sugar Beet in Belgium** (Modelagem preditiva baseada no clima de eventos de infecção por Cercospora beticola em beterraba na Bélgica). J. Fungi 2021 , 7 , 777. <https://doi.org/10.3390/jof7090777>. (Rainfall AND "predictive modeling"- WoS). Disponível em:< <https://www-webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:000700966000001>> Acesso 01 de jul.2025.

FACCO, M.; CAMPOS, M. A. A.; VARGAS, D. S.; SILVEIRA, R. B.; BISOGNIN, C.(2020). **Algoritmos de Machine Learning aplicados na ocorrência de chuvas na cidade de Santa Maria**. Ciência e Natura, v. 42, e28, 2020. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/40537>>. Acesso 04 out.2024.

FENG, B. F.; XU, Y. S.; ZHANG, T.; ZHANG, X. (2022). **Hydrological time series prediction by extreme machine learning and sparrow search algorithm** (Previsão de séries temporais hidrológicas por máquina de aprendizado extremo e algoritmo de busca de pardal. Abastecimento de Água) , 1 de março de 2022; 22 (3): 3143–3157. doi: <https://doi.org/10.2166/ws.2021.419>. (Hydrological forecasting AND "machine learning" - WoS). Disponível em:< <https://www-webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:000727836100001>> Acesso 04 de jul.2025.

FERRÃO, B. C.(2024). **Técnicas para previsão de séries temporais: uma abordagem em redes neurais pré-treinadas**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2024. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/257875>>. Acesso 03 out.2024.

GIAMPAOLO, V.; DELL'AVERSANA, P.; CAPOZZOLI, L.; DE MARTINO, G.; & RIZZO, E. (2022). **Optimization of Aquifer Monitoring through Time-Lapse Electrical Resistivity Tomography Integrated with Machine-Learning and Predictive Algorithms** (Otimização do monitoramento de aquíferos por meio de tomografia de resistividade elétrica com lapso de tempo integrada com aprendizado

de máquina e algoritmos preditivos). Ciências Aplicadas , 12 (18), 9121. <https://doi.org/10.3390/app12189121>. (Water management AND "predictive algorithms" - WoS). Disponível em:< <https://www.webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:000856238700001>> Acesso 03 de jul.2025.

GOVERNO DO ESTADO DO TOCANTINS (2020). **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Tocantins**. Palmas: Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 2020. Disponível em: <<https://www.to.gov.br/semarh/plano-estadual-de-recursos-hidricos/5v8vkvw5a5hn>>. Acesso 01 out.2024.

GUARDA, P. M. (2020). **Avaliação do impacto ambiental de um projeto agrícola na região de Formoso do Araguaia, na qualidade e biodiversidade do rio Formoso**. Universidade Federal do Tocantins, 2020. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11612/2185>>. Acesso 01 out.2024.

HAJAR, H. A. A. (2023). **Exploring Different Approaches for Computing the Standardized Precipitation Index to Characterize Dry and Wet Periods in the Yarmouk River Basin, Jordan** (Explorando Diferentes Abordagens para o Cálculo do Índice Padronizado de Precipitação para Caracterizar Períodos Secos e Úmidos na Bacia do Rio Yarmouk, Jordânia). Modelagem e Avaliação Ambiental, 28 (1), 55-67. (Time series AND "precipitation" AND "river basin" - WoS). Disponível em:< <https://www.webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:000894477200001>> Acesso 02 de jul.2025.

HOSSEINZADEH, P.; NASSAR, A.; BOUBRAHIMI, S. F.; HAMDI, S. M. (2023). **ML-Based Streamflow Prediction in the Upper Colorado River Basin Using Climate Variables Time Series Data** (Previsão de vazão baseada em aprendizado de máquina na Bacia do Alto Rio Colorado usando dados de séries temporais de variáveis climáticas). Hydrology 2023, 10, 29. <https://doi.org/10.3390/hydrology10020029>. (Time series AND "precipitation" AND "river basin" - WoS). Disponível em:< <https://www.webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:000944857600001>> Acesso 02 de jul.2025.

HUSSAIN, F.; CERIBASI, G.; CEYHUNLU, A. I.; WU, R.; CHEEMA, M. J. M.; NOOR, R. S.; ANJUM, M. N.; AZAM, M.; & AFZAL, A. (2022). **Analysis of Precipitation Data Using Innovative Trend Pivot Analysis Method and Trend Polygon Star Concept: A Case Study of Soan River Basin, Potohar Pakistan** (Análise de dados de precipitação usando o método inovador de análise de pivô de tendência e o conceito de estrela de polígono de tendência: um estudo de caso da bacia do rio Soan, Potohar, Paquistão) Journal of Applied Meteorology and Climatology, 61(12), 1861-1880. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-22-0081.1>. (Time series AND "precipitation" AND "river basin" - WoS). Disponível em:< <https://www.webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:000908088200002>> Acesso 02 de jul.2025.

IDOWU, D.; PETER, B. G.; BOAKYE, J.; COHEN, S.; CARTER, E. (2025). **Evaluating Earth observation products for Catchment-Scale operational flood monitoring and risk management in a sparsely gauged to ungauged river basin**

in Nigeria, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Volume 138, 2025, 104445, ISSN 1569-8432. (Water management AND "predictive algorithms" - WoS). Disponível em:< <https://www.webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:001441714600001>> Acesso 03 de jul.2025.

IPEA (2019). Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS)**: 6. Água Potável e Saneamento. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/ods/ods13.html>> Acesso em 24 de ago.2025.

_____ (2019). Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS)**: 13. Ação Contra a Mudança Global do Clima. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/ods/ods13.html>> Acesso em 24 de ago.2025.

KUMAR, V.; KEDAM, N.; SHARMA, K. V.; MEHTA, D. J.; & CALOIERO, T. (2023). **Advanced Machine Learning Techniques to Improve Hydrological Prediction: A Comparative Analysis of Streamflow Prediction Models** (Técnicas avançadas de aprendizado de máquina para aprimorar a previsão hidrológica: uma análise comparativa de modelos de previsão de vazão). Água, 15 (14), 2572. <https://doi.org/10.3390/w15142572>. (Hydrological forecasting AND "machine learning" - WoS). Disponível em:< <https://www.webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:001071443700001>> Acesso 04 de jul.2025.

LACERDA, M. S.; MARTINS, H. D. S. R.; da SILVA TEMOTEJO, A.; & EMILIANO, P. C. (2022). **Precipitation pattern in Viçosa-MG: a case study via time series** (Padrão de precipitação em Viçosa-MG: estudo de caso via séries temporais). Revista Agrogeoambiental , e20221642-e20221642. (SARIMA AND "precipitation" AND "Brazil" - WoS). Disponível em:< <https://www.webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:000920094500001>> Acesso 03 de jul.2025.

LEITE, S. J. O.; OLIVEIRA, R. C. L.; CAMPOS, L. M. L. (2021). **Predição de séries temporais da COVID19: uma avaliação de redes neurais com células LSTM**. Universidade Federal do Pará, 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Funcionamento-da-Rede-Neural-LSTM-5_fig1_355662907>. Acesso 24 nov.2024.

LI, W., KANG, Y., LI, L., GAO, R., SHU, Z., & SONG, S. (2024). **Comprehensive assessment of five near-real-time satellite precipitation products in the Lower Yangtze River Basin and the Lixiahe region, China: Dual perspectives from time series and extreme events** (Avaliação abrangente de cinco produtos de precipitação por satélite em tempo quase real na Bacia do Baixo Yangtze e na região de Lixiahe, China: Perspectivas duplas de séries temporais e eventos extremos). Pesquisa Atmosférica , 308 , 107520. (Time series AND "precipitation" AND "river basin" - WoS). Disponível em:< <https://www.webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:001258699700001>> Acesso 02 de jul.2025.

LIU, C. J.; XU, J.; LI, X. A.; YU, Z. Y.; WU, J. R. (2024). **Water resource forecasting with machine learning and deep learning: A scientometric analysis** (Previsão de recursos hídricos com aprendizado de máquina e aprendizado profundo: uma análise cienciométrica) Artificial Intelligence in Geosciences, Volume 5, 2024, 100084, ISSN 2666-5441. (Hydrological forecasting AND "machine learning" - WoS). Disponível em:< <https://www.webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:001353407800001>> Acesso 04 de jul.2025.

LIU, Y., CHEN, J., XIONG, L., & XU, C. Y. (2024). **Integrating heterogeneous information for modeling non-stationarity of extreme precipitation in the Yangtze River Basin** (Integração de informações heterogêneas para modelagem da não estacionariedade da precipitação extrema na Bacia do Rio Yangtze). Journal of Hydrology , 645 , 132159. (Time series AND "precipitation" AND "river basin" - WoS). Disponível em:< <https://www.webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:001340984000001>> Acesso 02 de jul.2025.

MARCOS JUNIOR, A. D.; SILVEIRA, C. da S.; COSTA, J. M. F. da .; & GONÇALVES, S. T. N. (2024). **Combining traditional hydrological models and machine learning for streamflow prediction** (.Combinando modelos hidrológicos tradicionais e aprendizado de máquina para previsão de vazão) RBRH, 29, e11. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.292420230105>. (Hydrological forecasting AND "machine learning" - WoS). Disponível em:< <https://www.webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:001248891800001>> Acesso 04 de jul.2025.

MARCUZZO, F. F. N.; ROMERO, V. (2013). **Influência do El Niño e La Niña na precipitação máxima diária no estado de Goiás**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 28, n. 4, p. 429-440, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000400009>>. Acesso 04 out.2024.

MARQUES, R; ALVES, D.M. C. C.; VICENZI, N.; KROLOW, T. K.; KRÜGER, R. F. (2021). **Will global warming alter the geographic distribution of lepiselaga crassipes (diptera: tabanidae), the vector of trypanosomiasis in equines in the neotropics?** Vol. 21 No. 1 (2017): Special Issue on Ecology of Parasites and Vectors. ABECO - Associação Brasileira de Ciência Ecológica e Conservação. (Rainfall AND "predictive modeling"- SCOPUS). Disponível em: <<https://revistas.ufrj.br/index.php/oa/article/view/9843>> Acesso 01 jul.2025.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (2024). **Plano Nacional de Recursos Hídricos: O PNRH**. Brasília: MDR, 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/plano-nacional-de-recursos-hidricos-1/o-pnrh>>. Acesso 30 set.2024.

MOHER D, LIBERATI A, TETZLAFF J, ALTMAN DG, THE PRISMA GROUP (2009) **Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement**. (Itens de Relato Preferenciais para Revisões Sistemáticas e Meta-Análises: A Declaração PRISMA). PLoS Med 6(7): e1000097. Disponível em:<<https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>> Acesso 04 de jul.2025.

- MOREIDO, V.; GARTSMAN, B.; SOLOMATINE, D. P.; & SUCHILINA, Z. (2021). **How Well Can Machine Learning Models Perform without Hydrologists? Application of Rational Feature Selection to Improve Hydrological Forecasting** (Qual o desempenho dos modelos de aprendizado de máquina sem hidrólogos? Aplicação da seleção racional de características para aprimorar a previsão hidrológica). Water, 13 (12), 1696. <https://doi.org/10.3390/w13121696>. (Hydrological forecasting AND "machine learning" - WoS). Disponível em:< <https://www.webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:000666810900001>> Acesso 04 de jul.2025.
- NAFII, A.; TALEB, A.; EL MESBAHI, M.; EZZAOUINI, M. A.; & EL BILALI, A. (2023). **Early Forecasting Hydrological and Agricultural Droughts in the Bouregreg Basin Using a Machine Learning Approach.** (Previsão antecipada de secas hidrológicas e agrícolas na Bacia de Bouregreg usando uma abordagem de aprendizado de máquina) Water, 15(1), 122. (Hydrological forecasting AND "machine learning" - WoS). Disponível em:< <https://www.webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:000909620600001>> Acesso 04 de jul.2025.
- NASCIMENTO, D. T. F.; MARTINS, A. P., LUIZ; G. C.; LOPES, R. M. (2021). **Climatologia do Cerrado: variabilidades, suscetibilidades e mudanças climáticas no contexto do Cerrado brasileiro.** 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/351883793_CLIMATOLOGIA_DO_CERRADO>. Acesso 02 out.2024.
- NETO, R. M. B.; SANTOS, C. A. G.(2024). **The NIFT index: A new approach to assessing meteorological drought exposure,** Journal of Hydrology, Volume 632, 2024, 130857, ISSN 0022-1694, Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130857>>. Acesso 28 nov.2024.
- RAHARIMANANA, V.; YAMAGUCHI, T.; TSUJIMOTO, Y.; OO, A. Z.; NISHIGAKI, T.; RAKOTONINDRINA, H.; & KATSURA, K. (2023). **A machine learning approach is effective to elucidate yield-limiting factors of irrigated lowland rice under heterogeneous growing conditions and management practices** (Uma abordagem de aprendizado de máquina é eficaz para elucidar os fatores limitantes da produtividade do arroz irrigado de várzea sob condições de cultivo e práticas de manejo heterogêneas). Field Crops Research , 304 , 109170. (Water management AND "predictive algorithms" - WoS). Disponível em:< <https://www.webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:001106843100001>> Acesso 03 de jul.2025.
- SALVIANO, M. F.; GROPO, J. D.; PELLEGRINO, G. Q.(2021). **Análise de tendências em Dados de Precipitação e temperatura no Brasil.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 36, n. 2, p. 181-193, 2021. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbmet/a/QDKzpZxkPwWVxbnr5NZDRSB/?lang=pt>>. Acesso 03 out.2024.
- SANTIAGO, M.M.; NUNES, A.B.; COUTO, F.T.; ALMEIDA BRESSIANI, D.D.; FREITAS, R. A. P. de (2025). **Relationship Between the Water Vapor Transport from the Amazon Basin and the Rainfall Regime over a Watershed on Brazil's**

Southern Border Earth (Switzerland). Article2025. DOI: 10.3390/earth6010013. (Time series AND "precipitation" AND "river basin" - SCOPUS). Disponível em: <<https://www-scopus-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/pages/publications/105001093824>> Acesso 01 de jul.2025.

SHARMA, S., RAJ GHIMIRE, G., & SIDDIQUE, R. (2023). **Machine learning for postprocessing ensemble streamflow forecasts** (Aprendizado de máquina para pós-processamento de previsões de vazão por conjunto). Journal of Hydroinformatics , 25 (1), 126-139. (Hydrological forecasting AND "machine learning" - WoS). Disponível em:< <https://www-webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:000903929400001>> Acesso 04 de jul.2025.

SHERLY, K., VEERESHA, P. (2025). **Fractional operator-based mathematical model for hydrological cycle analysis with machine learning integration** (Modelo matemático baseado em operadores fracionários para análise do ciclo hidrológico com integração de aprendizado de máquina). *Modelo. Earth Syst. Environ.* 11, 168 (2025). (Hydrological forecasting AND "machine learning" - WoS). Disponível em:< <https://www-webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:001445748300002>> Acesso 04 de jul.2025.

SINTAYEHU A. A.; TIANLING Q.; XIN ZHANG, D. Y. (2022). **Wavelet transform-based trend analysis of streamflow and precipitation in Upper Blue Nile River basin** (Análise de tendências de vazão e precipitação baseada na transformada wavelet na bacia do Alto Rio Nilo Azul) *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Volume 44, 2022, 101251, ISSN 2214-5818, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101251>. (Time series AND "precipitation" AND "river basin" - WoS). Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581822002646>> Acesso 02 de jul.2025.

SILVA, J. O. da .; GALVÃO, F.; SILVA, A. C. da .; & HIGUCHI, P. (2022). **Tree species of atlantic forest and pampa alluvial forests in the context of climate change**. *Revista Árvore*, 46, e4613. (Rainfall AND "predictive modeling"- SCOPUS). Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-908820220000013>> Acesso 01 jul.2025.

SOUZA, B. S.; SOUZA B.S.; MACEDO, M. J. H.; DE SOUSA, F. DE A. S. (2025). **Analysis of droughts in homogeneous rainfall regions located in the Paraíba state**(Análise de secas de regiões pluviométricas homogêneas localizadas no estado da Paraíba). *Revista Brasileira de Geografia Física*.Article2025. DOI: 10.26848/rbgf.v18.4.p2404-2420. (Time series AND "precipitation" AND "river basin" - SCOPUS). Disponível em: <<https://www-scopus-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/pages/publications/105004706173#>> Acesso 01 jul.2025.

SRIVASTAVA, P. K.; PRADHAN, R. K.; PETROPOULOS, G. P.; PANDEY, V.; GUPTA, M.; YADUVANSHI, A.; WAN JAAFAR, W. Z.; MALL, R. K.; SAHAI, A. K.

(2021). **Long-Term Trend Analysis of Precipitation and Extreme Events over Kosi River Basin in India** (Análise de Tendências de Longo Prazo de Precipitação e Eventos Extremos na Bacia do Rio Kosi, na Índia). Water 2021 , 13 , 1695. <https://doi.org/10.3390/w13121695>. (Time series AND "precipitation" AND "river basin" - WoS). Disponível em:< <https://www.webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:000666448200001>> Acesso 02 de jul.2025.

TAN, M.; YANG, Y.; BIAN, L.; ZHANG, J.; & OHNO, S. (2025). **Safe operation plan for high-speed rail based on dynamical prediction model of short-term rainfall** (Plano de operação segura para ferrovia de alta velocidade baseado em modelo de previsão dinâmica de precipitação de curto prazo). KSCE Journal of Civil Engineering , 29 (4), 100058. (Rainfall AND "predictive modeling"- WoS). Disponível em:< <https://www.webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:001486747700001>> Acesso 01 de jul.2025.

TEIXEIRA, E.K.C.(2025) **Statistical properties of historical water level and flow rate series of the doce river basin**(Propriedades estatísticas das séries históricas de cota e vazão da bacia do rio Doce) Revista de Geociencias do Nordeste. Article Open Access 2025. DOI: 10.21680/2447-3359.2025v11n1ID37090. (Time series AND "precipitation" AND "river basin" - SCOPUS). Disponível em: <<https://www-scopus-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/pages/publications/85217783215>> Acesso 01 de jul.2025.

TIAN, W., LIU, X., WANG, K., BAI, P., LIANG, K., & LIU, C. (2021). **Evaluation of six precipitation products in the Mekong River Basin** (Avaliação de seis produtos de precipitação na Bacia do Rio Mekong). Pesquisa Atmosférica , 255 , 105539. (Time series AND "precipitation" AND "river basin" - WoS). Disponível em:< <https://www-webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:000636789600004>> Acesso 02 de jul.2025.

YU, Y.; WANG, M.; LIU, Z.; LIU, T. (2024). **Spatial and Temporal Variability Characteristics and Driving Factors of Extreme Precipitation in the Wei River Basin.** (Características de Variabilidade Espacial e Temporal e Fatores Condutores da Precipitação Extrema na Bacia do Rio Wei.) Water 2024 , 16 , 217. <https://doi.org/10.3390/w1602021>. (Time series AND "precipitation" AND "river basin" - WoS). Disponível em:< <https://www-webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:001150922600001>> Acesso 02 de jul.2025.

ZHOU, Y. L.; CUI, Z.; LIN, K. L.; SHENG, S.; CHEN, H.; HUA GUO, S. L.; SHENGLIAN XU, C. Y. (2022) **Short-term flood probability density forecasting using a conceptual hydrological model with machine learning techniques** (Previsão de densidade de probabilidade de inundações de curto prazo usando um modelo hidrológico conceitual com técnicas de aprendizado de máquina) Journal of Hydrology, Volume 604, 2022, 127255, ISSN 0022-1694. (Hydrological forecasting AND "machine learning" - WoS). Disponível em:< <https://www-webofscience-com.ez6.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/full-record/WOS:000731346800005>> Acesso 04 de jul.2025.